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

УДК: 006.91:621.317.7

СОБСТВЕННЫЕ ШУМЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА КАК ФАКТОР ОГРАНИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ: ОЦЕНКА ВКЛАДА И ПУТИ СНИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.Ф.Фозилов., К.Ж.Сатторов., Г.К.Тайманова
Бухарский государственный технический университет
Doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.22505123

Аннотация: Работа посвящена оценке того, в какой мере собственные шумы элементов измерительного тракта ограничивают достижимую точность генераторов (калибраторов) электрических сигналов, применяемых на объектах нефтегазовой отрасли. Источники шума систематизированы по физической природе и спектральной зависимости; для теплового, дробового и фликкер-шума, а также для фазового шума задающего генератора (модель Лисона) приведены расчётные соотношения. Числовые оценки показывают, что при воспроизведении сигнала уровнем 1 В относительный вклад собственного шума остаётся в пределах $1{,}3\cdot10^{-6}$, тогда как при уровне 10 мВ он возрастает до $1{,}29\cdot10^{-4}$ и превращается в доминирующую составляющую неопределённости. Для двух указанных уровней составлен бюджет неопределённости: расширенная неопределённость ($k = 2$) равна $123\cdot10^{-6}$ и $447\cdot10^{-6}$ соответственно. Обоснован комплекс схемотехнических, конструктивных и алгоритмических решений, позволяющих уменьшить шумовую составляющую в 3–10 раз, а также аргументирована необходимость дифференцированного по поддиапазонам нормирования шумовых характеристик в методиках поверки калибраторов, эксплуатируемых при повышенных электромагнитных и температурных воздействиях.

Ключевые слова: генератор электрических сигналов, калибратор, метрологические характеристики, собственные шумы, тепловой шум, фликкер-шум, фазовый шум, модель Лисона, бюджет неопределённости, дисперсия Аллана, нефтегазовая отрасль, электромагнитная совместимость.

1. ВВЕДЕНИЕ

Метрологическое обеспечение контрольно-измерительных систем нефтегазовых предприятий опирается прежде всего на генераторы и калибраторы электрических сигналов. Именно они используются при поверке и калибровке преобразователей давления, температуры, расхода и уровня, при проверке каналов систем автоматизации, а также при воспроизведении унифицированных сигналов 0–5 мА, 4–20 мА и 0–10 В. От точности воспроизведения этих сигналов напрямую зависит достоверность коммерческого учёта углеводородного сырья, погрешность которого регламентирована нормативными документами по измерению расхода и количества жидкостей и газов [13].

Сложившаяся практика нормирования метрологических характеристик генератора сводится к заданию основной и дополнительной погрешностей воспроизведения. Такой подход оказывается недостаточным при работе с сигналами малого уровня и в широкой полосе частот: здесь на первый план выходит составляющая, порождаемая собственными шумами элементов тракта — резисторов, полупроводниковых приборов, операционных усилителей и источников

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

опорного напряжения. Принципиальная особенность этой составляющей состоит в её случайном характере: она не устраняется калибровкой и не поддаётся компенсации введением поправки, а потому задаёт предел достижимой точности прибора [11; 12].

Физические механизмы шумообразования изучены достаточно детально. Тепловой шум описан в классических работах Дж. Джонсона и Г. Найквиста [5; 6]; систематизация представлений о фликкер-шуме дана в обзоре М. Кешнера [17]; основы теории фазового шума автогенераторов заложены Д. Лисоном [7] и развиты А. Хаджимири и Т. Ли [8]. Однако в прикладной метрологии эти результаты, как правило, не доводятся до формы, пригодной для практического оценивания вклада шума в бюджет неопределённости конкретного калибратора, работающего в промышленной обстановке. Действующие методики поверки нормируют погрешность воспроизведения, но не содержат требований к спектральной плотности шума выходного сигнала — в этом и заключается исследовательский пробел, на восполнение которого направлена настоящая работа.

Остроту задачи усиливают условия эксплуатации на нефтегазовых объектах: широкий диапазон рабочих температур, вибрационные нагрузки, протяжённые линии связи и мощные источники электромагнитных помех — частотно-регулируемые приводы, сварочное оборудование, высоковольтная коммутационная аппаратура. Суммарное шумовое воздействие на измерительный тракт в такой обстановке заметно превосходит значения, характерные для лабораторных условий. Правовую основу соответствующих работ в Республике Узбекистан образует Закон «О метрологии» в новой редакции [1] с изменениями, расширившими участие негосударственного сектора в поверке средств измерений [2].

Цель работы — получить количественную оценку вклада собственных шумов элементов в метрологические характеристики генераторов электрических сигналов и обосновать комплекс мер по их улучшению применительно к условиям нефтегазовых предприятий. Для достижения цели решались следующие задачи: систематизировать источники шума в тракте генератора; получить расчётные оценки шумовых составляющих для типовых схемных решений; сформировать бюджет неопределённости для двух характерных уровней выходного сигнала; предложить методы снижения шумовой составляющей и оценить их эффективность количественно.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование носит расчётно-аналитический характер. Объектом рассмотрения выбрана обобщённая структура генератора электрических сигналов, в состав которой входят источник опорного напряжения, задающий генератор (для переменного сигнала), масштабирующий усилитель, аттенюатор и выходной каскад. Для каждого узла установлены преобладающие механизмы шумообразования и получены оценки спектральной плотности шума.

Расчёты проводились при температуре $T = 300$ К и значении постоянной Больцмана $k = 1{,}380649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Неопределённость оценивалась согласно руководству по выражению неопределённости измерения [3]: составляющие типа B с равномерным распределением приводились к стандартной неопределённости делением границ на $\sqrt{3}$, расширенная неопределённость вычислялась при коэффициенте охвата $k = 2$, что отвечает доверительной вероятности около 0,95. Требования к компетентности лабораторий, выполняющих подобные оценки, регламентированы международным стандартом [4]. Для описания нестабильности во временной области привлекалась дисперсия Аллана [9; 10; 18].

Ограничение исследования состоит в том, что приведённые числовые значения получены расчётным путём для типовых параметров схемных решений и требуют экспериментального

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

подтверждения на конкретных образцах средств измерений. Они предназначены для сопоставительной оценки соотношения составляющих, а не для нормирования характеристик определённого типа прибора.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Систематизация источников шума в тракте генератора

Собственные шумы элементов измерительного тракта различаются физической природой, характером спектральной зависимости и способом воздействия на метрологические характеристики. Результаты систематизации представлены 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 авторами 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

3.2. Тепловой шум и его вклад в погрешность воспроизведения

Среднеквадратическое значение напряжения теплового шума на резистивном элементе задаётся соотношением Найквиста:

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

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

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

где q — заряд электрона; I — постоянный ток через переход. Из (1) видно, что снижение шума достигается двумя путями — уменьшением сопротивления критических узлов и ограничением полосы пропускания, причём в обоих случаях выигрыш подчиняется закону квадратного корня. Результаты расчёта спектральной плотности напряжения теплового шума и его относительного вклада сведены в таблицу 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_T, 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 авторов по формуле (1).

Полученные данные приводят к принципиальному заключению. При воспроизведении сигнала уровнем 1 В собственный тепловой шум даже при сопротивлении 100 кОм даёт относительный вклад порядка $4 \cdot 10^{-6}$, 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 или превышает его. Отсюда следует, что требования к шумовым характеристикам должны нормироваться дифференцированно по поддиапазонам воспроизведения.

Иная картина складывается для токового выхода 4–20 мА — наиболее распространённого в системах автоматизации нефтегазовых объектов. При сопротивлении нагрузки 250 Ом спектральная плотность равна 2,03 нВ/√Гц, чему в полосе 10 кГц отвечает напряжение 0,203 мкВ и ток 0,81 нА. При допускаемой погрешности 0,02 % от диапазона 16 мА, то есть 3,2 мкА, собственный шум не достигает и 0,03 % предела допускаемой погрешности и практического значения не имеет. Следовательно, на токовых выходах определяющую роль играют не собственные шумы, а внешние электромагнитные наводки и термо-ЭДС контактных соединений.

3.3. Фликкер-шум и фазовый шум задающего генератора

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

Спектральная плотность фликкер-шума подчиняется степенной зависимости

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

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

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 f_0 — частота несущей; $Q_н$ — нагруженная добротность резонатора; f_m — отстройка от несущей; f_c — частота излома фликкер-шума активного элемента; F — коэффициент шума усилителя; P_c — мощность сигнала на входе активного элемента. Результаты расчёта для типовых параметров (f_0 = 10 МГц, $Q_н = 10^4$, f_c = 10 кГц, F = 2, P_c = 1 мВт) представлены в таблице 3.

Таблица 3. Расчёт спектральной плотности фазового шума по модели Лисона

Отстройка f_m, Гц	**Вклад резонаторного множителя, дБ**	**Вклад фликкер-множителя, дБ**	**$L(f_m)$, дБн/Гц**	**Преобладающая область спектра**
10	34,0	30,0	−109,8	$1/f^3$ (фликкерная ЧМ)
100	14,2	20,0	−139,6	переход $1/f^3 \rightarrow 1/f^2$
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 авторов по формуле (4) при f_0 = 10 МГц, $Q_н = 10^4$, f_c = 10 кГц, F = 2, P_c = 1 мВт.

Расчёт демонстрирует, что в ближней зоне отстроек — наиболее значимой для метрологических применений — уровень фазового шума определяется совместным действием добротности резонатора и фликкер-шума активного элемента. Трёхкратное увеличение нагруженной добротности снижает составляющую $1/f^3$ на 9,5 дБ, а уменьшение частоты излома f_c на порядок ослабляет вклад фликкер-множителя примерно на 10 дБ в области малых отстроек. Во временной области соответствующая нестабильность характеризуется двухвыборочной дисперсией Аллана [9]:

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

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

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

3.4. Бюджет неопределённости воспроизведения сигнала

Чтобы установить реальное соотношение 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

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

в предположении 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	$U = 100 \cdot 10^{-6}$, k = 2	50,0	50,0
Нестабильность за межповерочный интервал	B	равномерное	$\pm 30 \cdot 10^{-6}$	17,3	17,3
Температурный коэффициент ($5 \cdot 10^{-6}$/°C, ±5 °C)	B	равномерное	$\pm 25 \cdot 10^{-6}$	14,4	14,4
Влияние сопротивления нагрузки	B	равномерное	$\pm 10 \cdot 10^{-6}$	5,8	5,8
Нелинейность и коэффициент гармоник	B	равномерное	$\pm 20 \cdot 10^{-6}$	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	$s/\sqrt{n}$	8,0	8,0
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

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

Источник неопределённости	**Тип**	**Распределение**	**Границы (значение)**	**u_i при 1 В, $\cdot 10^{-6}$**	**u_i при 10 мВ, $\cdot 10^{-6}$**
Расширенная неопределённость U (k = 2)	—	—	—	122,9 (0,012 %)	446,7 (0,045 %)

Источник: расчёт авторов в соответствии с [3].

Анализ бюджета обнаруживает качественную перестройку структуры неопределённости при переходе к малым уровням сигнала. На уровне 1 В доминирует погрешность, унаследованная от эталона при калибровке (около 66 % суммарной дисперсии), а вклад собственного шума пренебрежимо мал. На уровне 10 мВ соотношение меняется на противоположное: собственный шум и наводки в совокупности дают около 93 % суммарной дисперсии, а расширенная неопределённость возрастает в 3,6 раза. Отсюда вытекает, что нормирование единого значения основной погрешности на весь диапазон воспроизведения методически некорректно и ведёт к завышению фактической точности на младших поддиапазонах.

3.5. Методы улучшения метрологических характеристик

На основе полученных соотношений сформирован комплекс мер, направленных на снижение шумовой составляющей. Количественная оценка их эффективности 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 Кф и частоты излома в (3)	фликкер-шум	сдвиг fc на порядок вниз	стоимость и доступность элементной базы
Модуляционный (chopper) метод и автоматическая коррекция нуля	перенос полезного сигнала в область выше fc	фликкер-шум, дрейф нуля	практически полное подавление 1/f-составляющей	появление тактовых помех, ограничение полосы

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

Метод	Механизм воздействия	Снижаемая составляющая	Ожидаемый эффект	Ограничения
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 $(f_0/2Qhf_m)^2$ в (4)	фазовый шум в области $1/f^3$	на 9,5 дБ	габариты и стоимость резонатора

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

Совместное применение первых двух мер уменьшает тепловую составляющую в 10 раз, что для уровня 10 мВ снижает её вклад со $129 \cdot 10^{-6}$ до $12{,}9 \cdot 10^{-6}$. Если одновременно довести наводки до $\pm 10 \cdot 10^{-6}$ ($u = 5{,}8 \cdot 10^{-6}$), суммарная стандартная неопределённость на этом уровне сокращается 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. Тем самым ресурс повышения точности на младших поддиапазонах лежит не в плоскости улучшения эталонной базы, а в области схемотехники и конструктивной защиты прибора.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сформулировать ряд положений, имеющих практическое значение для метрологического обеспечения нефтегазовых предприятий. Прежде всего, шумовая составляющая принципиально отличается от систематической по своей природе: она не устраняется калибровкой и не описывается поправкой, вследствие чего её ограничение представляет собой задачу конструирования, а не последующей обработки результатов измерений.

Далее, относительный вклад шума обратно пропорционален уровню воспроизводимого сигнала, из-за чего наиболее уязвимыми оказываются младшие поддиапазоны. На практике именно они задействуются при поверке первичных преобразователей с малым выходным сигналом — термопар, тензорезистивных датчиков давления, датчиков перепада давления.

Третье положение касается отраслевой специфики, смещающей соотношение составляющих в пользу внешних воздействий. Расчёт для токового выхода показал, что собственный шум тракта не превышает 0,03 % предела допускаемой погрешности, тогда как наводки от частотно-регулируемых приводов и протяжённых линий связи в отдельных случаях

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

оказываются на два-три порядка выше собственного шума. Из этого 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.

Наконец, представляется целесообразным дополнить методики поверки калибраторов требованием нормировать спектральную плотность шума выходного сигнала либо эквивалентное среднеквадратическое значение шума в заданной полосе, причём дифференцированно по поддиапазонам. Подобное 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 обусловлены 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.

5. ВЫВОДЫ

1. Систематизированы источники шума в тракте генератора электрических сигналов; установлено, что определяющее значение для метрологических характеристик имеют 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 равен $1{,}29 \cdot 10^{-6}$ 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 ($k = 2$), равную $122{,}9 \cdot 10^{-6}$ 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 трёхкратное повышение нагруженной добротности задающего контура 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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

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.

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.

REFERENCES

1. Zakon Respubliki Uzbekistan «O metrologii» (novaya redaktsiya, utverzhdena Zakonom Respubliki Uzbekistan ot 07.04.2020 g. № ZRU-614) [Law of the Republic of Uzbekistan “On Metrology” (new version)]. Tashkent, 2020. (In Russian)

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

2. Zakon Respubliki Uzbekistan ot 26.10.2023 g. № ZRU-872 «O vnesenii izmeneniy i dopolneniy v Zakon Respubliki Uzbekistan «O metrologii»…» [Law of the Republic of Uzbekistan No. ZRU-872 on Amendments to the Law "On Metrology"]. Tashkent, 2023. (In Russian)
3. GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Neopredelennost izmereniya. Chast 3. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya [Uncertainty of Measurement. Part 3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. (In Russian)
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, no. 1, pp. 97–109.
6. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. Physical Review, 1928, vol. 32, no. 1, pp. 110–113.
7. Leeson D.B. A Simple Model of Feedback Oscillator Noise Spectrum. Proceedings of the IEEE, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 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, no. 2, pp. 179–194.
9. Allan D.W. Statistics of Atomic Frequency Standards. Proceedings of the IEEE, 1966, vol. 54, no. 2, pp. 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. GOST 8.586.1-2005. GSI. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostey i gazov s pomoshchyu standartnykh suzhayushchikh ustroystv. Chast 1 [Measurement of Flow Rate and Quantity of Liquids and Gases by Means of Standard Orifice Devices. Part 1]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. (In Russian)
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, no. 3, pp. 212–218.
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, no. 2, pp. 105–120.
19. Riley W.J. Handbook of Frequency Stability Analysis. NIST Special Publication 1065. Boulder, National Institute of Standards and Technology, 2008.