

В заключение отметим, что АЧС пульсаций  $\Delta p(\tau)$  всех исследованных ИЛ содержит значимую часть спектра, соответствующую среднечастотным пульсациям этого параметра, в области частот до 10—15 Гц. Показано, что мгновенные значения пульсаций массового расхода в этой части АЧС можно достоверно измерять с помощью основной схемы измерений  $\Delta p(\tau)$ , включающей в себя модернизированный вторичный прибор.

Исследования, проведенные по основной схеме измерений, выявили, что в ПЗРГ газоизмерительных станций газотранспортных магистралей находит свою реализацию как стационарный, так и пульсирующий режимы течения газа или их комбинация для разных ИЛ конкретного измерительного пункта. Причем в ряде случаев (ИЛ с  $D_y = 700; 1000$ ) величина  $\tilde{\Delta p}_S$  достигает значений 0,3—0,4, что, несомненно, оказывает существенное влияние на измерение среды в ПЗРГ за счет отсутствия в настоящее время учета, при определении расхода и количества газа, совокупной систематической составляющей  $U_{D_{доп}}$  [9].

Считаем, что необходимо провести подобные исследования в измерительных комплексах, предназначенных для измерения расхода и количества малосжимаемых сред, например воды. Кроме того, для более полного понимания влияния динамических процессов, возникающих в системе газопроводов, на измерение количества природного газа необходимы дополнительные исследования, особенно для условий газораспределительных станций. Причем такого рода исследования необходимы и при использовании иных пре-

образователей (турбинных, ультразвуковых, вихревых и др.) расхода.

#### Литература

1. **ГОСТ 8.563—97.** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления.
2. **ГОСТ 8.586—2005 (ИСО 5167:2003).** ГСИ. Измерение расхода и количества среды с помощью стандартных сужающих устройств.
3. **ISO TR 3313:1998.** Измерение потока текущей среды в закрытых каналах. Руководящие указания по воздействию пульсаций потока на приборы, измеряющие расход.
4. **ГОСТ 8.361—79.** ГСИ. Методика выполнения измерений по скорости в одной точке сечения трубы.
5. **Федоров А. В., Якушева Г. И.** // Измерительная техника. — 1988. — № 10. — С. 28.
6. **Петунин А. Н.** Методы и техника измерений параметров газового потока. — М.: Машиностроение, 1972.
7. **Санников М. С.** // Электронное приборостроение. — Казань: КГТУ. — 2005. — Вып. 44. — С. 73.
8. **TNO-report FSP-RPT-950071.** Pulsation measurements and studies for WINGAS — Olbernhau (existing) and Mallnow (future) gas compressor stations in relation to flow measurements. — TNO Institute of Applied Physics, 1995.
9. **Федоров А. В., Санников М. С.** // Измерительная техника. — 2006. — № 4. — С. 45.

Дата одобрения 06.02.2006 г.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.72.024.089

### Применение преобразования Аллана для анализа предельных возможностей мер и компараторов напряжения

А. С. КАТКОВ

*Рассмотрены вопросы применения преобразования Аллана при исследовании прецизионных компараторов и мер постоянного напряжения. Предложен подход к определению параметров, которые позволяют оценивать предельные возможности используемых средств измерений.*

**Ключевые слова:** отклонение Аллана, неопределенность измерений, постоянное напряжение.

*Problems related to the application of the Allan transformation for the study of precision comparators and dc voltage references are considered. An approach for determination of parameters that make it possible to estimate the maximum performance of measuring instruments is proposed.*

**Key words:** Allan deviation, measurements uncertainty, dc voltage.

Важными элементами цепи передачи размера единицы электрического напряжения от первичного эталона вольты [1] являются компараторы и меры постоянного напряжения.

Прецизионные компараторы напряжения имеют в своем составе измерители напряжения и коммутаторы, обеспечивающие выбор полярности измеряемой разности напряже-

ний и подключение сравниваемых мер и эталонов напряжения. Для высокочастотных измерений разности напряжения широко используются цифровые нановольтметры. Ограничения по точности при сравнении эталонов и мер напряжения в основном зависят от порога чувствительности компаратора и нестабильности применяемых мер напряжения. Данные ограничения при исключении влияния внешних факторов обусловлены внутренними шумами мер и компараторов напряжения.

Источниками шумов являются:

а) тепловые шумы сопротивлений

$$u_R = \sqrt{4k_B TR\Delta f}, \quad (1)$$

где  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура резистора  $R$ ;  $\Delta f$  — полоса частот;

б) дробовые шумы протекающего тока  $I$

$$i_d = \sqrt{2eI\Delta f}, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона;

в) фликкер-шумы, которые зависят от качества изготовления элементов, применяемых в исследуемых устройствах.

Тепловые и дробовые шумы имеют равномерный по частоте спектр, который носит название белого шума. Для фликкер-шумов (шумов типа  $1/f$ ) характерно увеличение мощности шума обратно пропорционально частоте, поэтому их действие обычно проявляется в области низких частот.

Определение шумовых составляющих в измеряемом напряжении позволяет адекватно оценивать применимость статистической обработки для нахождения результата измерения. Если измеряемое напряжение содержит в заданном диапазоне частот (или в заданном интервале измерения) преимущественно белый шум, то стандартная неопределенность результата измерения (среднего значения за время измерения) выражается формулой

$$\sigma_p = \sigma_n / \sqrt{N}, \quad (3)$$

где  $\sigma_n$  — стандартная неопределенность ряда измерений;  $N$  — число измерений.

Преимущественное действие фликкер-шума исключает применение формулы (3), рекомендуемой в Руководстве [2], и в данном случае оценкой стандартной неопределенности результата измерения является стандартная неопределенность ряда измерений, т. е.

$$\sigma_p \leq \sigma_n.$$

Существенное отличие в оценках неопределенности результата измерения в зависимости от состава шумов в измеряемом напряжении требует изучения конкретных типов приборов и выбора метода исследований.

Спектральную плотность сигнала обычно исследуют, используя преобразование Фурье. Такое представление сигнала полезно для выявления гармонических составляющих, однако разделение белого и фликкер-шума при данном способе может быть замаскировано влиянием дрейфа сигнала. Применение преобразования Аллана [3] переносит ин-

формацию о параметрах сигнала из частотной во временную область, что позволяет получить информацию о переменной составляющей напряжения для заданного времени усреднения. Эта информация помогает четче выявить характер как шумовых, так и детерминированных изменений измеряемого напряжения, преобладающих на заданном интервале времени усреднения, что, в свою очередь, дает возможность найти предельный порог чувствительности компараторов, оптимальное время измерения выходного напряжения при калибровке мер, а также достижимый уровень нестабильности исследуемых мер напряжения.

Знание предельных возможностей прецизионных компараторов напряжения позволяет правильно оценивать вклад компаратора в бюджет неопределенности при проведении сличений эталонов на основе эффекта Джозефсона [4]. При исследовании компаратора напряжение  $u(t)$  измеряют через промежутки времени  $t_0$ . Отклонение Аллана рассчитывают по формуле [5]:

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\sum_{n=1}^P [\bar{u}_{n+1}(\tau) - \bar{u}_n(\tau)]^2 / 2P},$$

где  $\tau = kt_0$  — интервал усреднения;  $P = \text{Int}(M/k) - 1$  — число пар измерений;  $M$  — количество измерений.

Для анализа напряжения на входе компаратора предложена модель, описывающая входной сигнал в виде суперпозиции напряжений

$$F(t) = U_0 + \sum U_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + k_1 \delta(t) + k_2 \Psi(t), \quad (4)$$

где  $U_0$  — постоянная составляющая;  $\sum U_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$  — набор гармонических сигналов;  $\delta(t)$  — модель белого шума;  $\Psi(t)$  — модель фликкер-шума.

Если время измерения  $T \ll \pi/(2\omega)$ , то уравнение (4) можно записать как

$$F(t) = U_0 + k_0 t + \sum U_i \cos(\omega_i t + \varphi_i) + k_1 \delta(t) + k_2 \Psi(t), \quad (5)$$

где  $k_0 t$  представляет собой линейную аппроксимацию низкочастотной составляющей с большим периодом изменения — дрейф.

Если гармоническими составляющими можно пренебречь, то уравнение (5) упрощается:

$$F(t) = U_0 + k_0 t + k_1 \delta(t) + k_2 \Psi(t). \quad (6)$$

На основе приведенных выше соотношений отклонение Аллана для предложенной модели сигнала (6) имеет вид

$$\sigma(\tau) = \left[ \frac{k_0^2 \tau^2}{2} + \frac{k_1^2}{2\tau} + 2 \ln 2 k_2^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Преобразование  $\sigma(\tau)$  для  $U_0$  равно нулю [6].

На рис. 1 представлены результаты измерений компаратора на основе цифрового нановольтметра в виде отклонения Аллана для компаратора с сопротивлением на входе

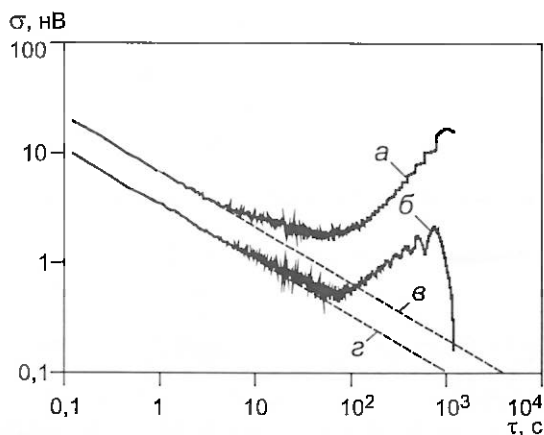


Рис. 1. Отклонения Аллана для напряжения компаратора при сопротивлении на входе 1кОм (а), закороченном входе (б), напряжении тепловых шумов на сопротивлениях 5,6 кОм (в), 1,4 кОм (г)

1 кОм (а) и с закороченным входом (б). На графике можно выявить области белого шума, фликкер-шума и дрейфа. Аппроксимация полученных данных на основе уравнения (7) дает значения параметров, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Параметры зависимостей а, б (см. рис. 1)

Коэффициент	Значения коэффициентов при сопротивлении на входе компаратора	
	вход закорочен	1 кОм
$k_0$ , нВ/ч	18	70
$k_1$ , нВ · Гц <sup>-1/2</sup>	4,8	9,6
$k_2$ , нВ	0,2	1,2

Анализ параметров показывает, что при закороченном входе компаратор имеет шум  $k_1$ , эквивалентный тепловому шуму сопротивления 1,4 кОм, а при подключении внешнего сопротивления на 5 кОм — эквивалентный увеличению сопротивления на 5 кОм. Рост шумов в данном случае можно объяснить действием шумового тока компаратора, протекающего по сопротивлению входной цепи [6]. Модель эквивалентной схемы компаратора показана на рис. 2. Шумовой ток  $I_k$  представляется выражением, аналогичным (6) с коэффициентами  $k_{0\tau} = 52$  пА/ч,  $k_{1\tau} = 7,3$  пА · Гц<sup>-1/2</sup> и  $k_{2\tau} = 1,3$  пА.

С учетом действия тока компаратора общее выражение напряжения компаратора, описывающее экспериментальные кривые, можно записать в виде

$$\sigma(\tau) = \left[ \frac{(k_0(0) + k_{0\tau}R)^2 \tau^2}{2} + \frac{k_1^2(0) + k_{1\tau}^2 R^2}{2\tau} + 2 \ln 2 (k_2^2(0) + k_{2\tau}^2 R^2) \right]^{1/2} \quad (8)$$

Использование уравнения (8) позволяет найти время усреднения  $\tau$ , при котором заканчивается действие белого шума (вторая дробь в (8)) и начинает преобладать фликкер-шум (третье слагаемое в (8)). Для приведенного примера

оптимальная продолжительность измерения компаратором  $\tau = 5...20$  с при сопротивлении на входе компаратора 1 кОм. Если напряжение дрейфа компаратора методически исключается при проведении измерений, значение фликкер-шума может служить оценкой предельных возможностей компаратора. Такую оценку применяли некоторые исследователи при сличении эталонов вольты на эффекте Джозефсона [7], хотя в данном случае компаратор использовался для сравнения напряжений при двух полярностях. Как показывает анализ, переключение полярности подсоединения компаратора, измеряющего в течение времени  $\tau$ , с последующим усреднением полученных результатов приводит к снижению влияния дрейфа измерительной цепи и, кроме того, к подавлению низкочастотной части фликкер-шума компаратора до уровня белого шума в соответствии с соотношением

$$\frac{1}{2\tau} \left( \int_x^{x+\tau} \sin \omega t dt - \int_{x+\tau}^{x+2\tau} \sin \omega t dt \right) \approx \frac{\tau \omega}{2} \cos \omega x \leq \frac{\tau \omega}{2},$$

где  $\omega \ll 1/2\tau$  определяет область спектра фликкер-шума.

На рис. 3 приведена зависимость шумового напряжения компаратора для двухполярных измерений при времени усреднения  $\tau = 10$  с (кривая г), которая показывает возможность снижения порога чувствительности компаратора до десятых долей нановольта при наличии фликкер-шума и дрейфа.

Исследование предельных параметров компаратора может быть затруднено фильтрацией шумов, действием наводок при малом времени усреднения и влиянием температурных колебаний внешней среды [6] при длительных измерениях.

В соответствии с поверочной схемой [8] в составе эталонов единицы электрического напряжения используются меры на стабилитронах для передачи размера единицы. Метрологические параметры мер напряжения определяются нестабильностью их выходного напряжения во времени. Прецизионные меры напряжения на стабилитронах исследуют с применением эталонов на основе эффекта Джозефсона, сравнивая выходные напряжения эталона и меры при помощи компаратора. Шумами в выходном напряжении эталона на эффекте Джозефсона можно пренебречь, так как они составляют менее  $10^{-11}$  за время измерения.

Как и в компараторе, значение фликкер-шума в выходном напряжении меры характеризует ее предельные возможности, а сравнение значений белого и фликкер-шума — оптимальную длительность проведения измерений выходного напряжения.

На рис. 3 приведены отклонения Аллана для выходного напряжения 1,018 В двух типов мер, а также для компаратора напряжения. Результаты измерений показывают, что для

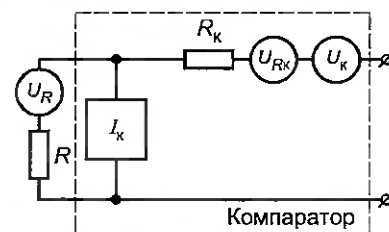


Рис. 2. Эквивалентная схема компаратора

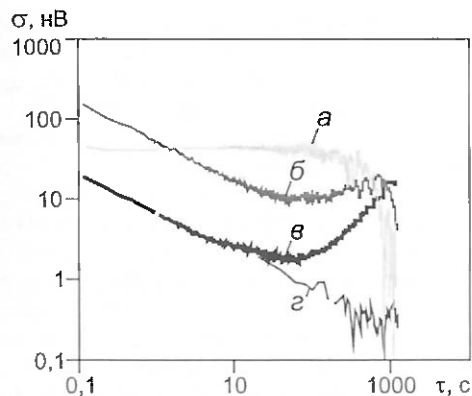


Рис. 3. Отклонения Аллана для выходного напряжения 1 В двух типов мер напряжения (а, б), компаратора без изменения полярности (в) и с ее изменением (г) при  $\tau = 10$  с

меры а уровень фликкер-шума является определяющим уже при  $\tau = 0,1$  с, а для меры б — при  $\tau \approx 80$  с.

Параметры мер, аппроксимирующие полученные результаты измерений в соответствии с (5), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры мер напряжения

Коэффициент	Значения коэффициентов для мер напряжения	
	а	б
$k_1, \text{нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$	14	78
$k_2, \text{нВ}$	34	5

Известно, что выходное напряжение 1,018 В формируется путем деления напряжения 10 В с помощью резистивного делителя, имеющего выходное сопротивление 1 кОм. Тепловой шум напряжения на сопротивлении 1 кОм в соответствии с (1) составляет  $4 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ . Учитывая, что через делитель протекает ток 1 мА, дробовой шум которого согласно (2) равен  $13 \text{ пА} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ , можно сделать вывод, что к тепловым шумам сопротивления добавляется дробовой токовый шум. Это в итоге дает шум около  $14 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ , что совпадает

с оценкой параметра  $k_1$  для меры напряжения а. Существенное превышение параметра  $k_1$  для меры напряжения б характеризует наличие дополнительных источников белого шума. Сравнение параметров  $k_2$  для данных мер показывает высокое качество элементной базы (стабилитронов), применяемой при изготовлении меры б, что позволяет проводить измерения с ее помощью на более высоком уровне точности.

Из изложенного следует, что преобразование Аллана эффективно использовать для определения предельных возможностей компараторов постоянного напряжения и мер напряжения. Получены аналитические выражения, позволяющие сравнивать компараторы и меры напряжения на основе параметров, оценивающих влияние белого и фликкер-шума. Показано, что значение фликкер-шума характеризует предельные возможности используемых средств измерений. Кроме того, сравнительная оценка параметров позволяет определить оптимальное время измерения с помощью данного средства измерений, а также количество измерений для соответствующего уменьшения неопределенности результата измерения.

Литература

1. Александров В. С., Катков А. С., Телитченко Г. П. // Измерительная техника. — 2002. — № 3. — С. 6.
2. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. — Geneva: ISO, 1995.
3. Allan D. W. // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 1987. — V. IM-36. — N 2. — P. 646.
4. Behr R., Niemeyer J., Katkov A. // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2001. — V. 50. — N 2. — P. 203.
5. Witt T. J., Reymann D. // IEE Proc. Sci. Meas. Technol. — 2000. — V. 147. — N 4. — P. 177.
6. Witt T. J. // IEEE Trans. Instrum. Meas. — 2001. — V. 50. — N 2. — P. 445.
7. Behr R., Katkov A. S. // Metrologia. — 2005. — V. 42. — N 1A. — Techn. Suppl. — 01005.
8. ГОСТ 8.027—2001. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений постоянного электрического напряжения и электродвижущей силы.

Дата одобрения 15.02.2006 г.