

УДК 656.259.9

Сергей Валентинович Бушуев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», проректор по научной работе и международным связям Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС, Екатеринбург),

Антон Николаевич Попов, аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения (УрГУПС, Екатеринбург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОГРАНИЧЕННЫХ ИНТЕРВАЛАХ ВРЕМЕНИ

Sergey V. Bushuev, PhD, associate professor of "Railway Automation and Telemechanics" Department, Vice Rector of Research Work and International Affairs of The Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg), Anton N. Popov, PhD-student of «Railway Automation and Telemechanics» Department, The Ural State University of Railway Transport (USURT, Ekaterinburg)

Research Of Measurement Precision Of Electric Signals Mean Square Values On Limited Time Slices

Аннотация

Вопросы повышения точности измерений тесно связаны с задачей совершенствования систем технической диагностики и мониторинга устройств железнодорожной автоматики и телемеханики. Важным характеризующим сигнал параметром является среднеквадратическое значение. При неправильном подходе к выбору времени измерения этой величины возникает дополнительная (методическая) погрешность.

В статье рассмотрены методы определения времени измерения среднеквадратических значений для различных сигналов. Получена зависимость величины погрешности от времени измерения. Рассмотрены условия, при которых данная погрешность равна нулю. Разработана методика выбора времени измерения, необходимого для обеспечения заданной точности.

Ключевые слова: устройства железнодорожной автоматики, системы диагностики и мониторинга, периодические сигналы сложной формы, среднеквадратическое значение, время измерения, точность измерений.

Annotation

The problem of measurement precision increase is closely connected with the task of technical diagnostics system development and monitoring of railway automation and telemechanics equipment. The important parameter characterizing the signal is quadratic mean. Wrong approach to time measurement choice of these values causes an additional (method) error.

There are described the methods of time measurement detection of square mean values for different signals. There is received the dependence of error values on measurement time. There are considered the terms when the given error is equal to zero. The authors develop the method of time measurement time that is necessary for this precision assurance.

Key words: railway automation equipment, diagnostics and monitoring systems, periodic signal of irregular shape, square mean value, time measurement, measurement precision.

Современные системы управления движением поездов и диагностики устройств железнодорожной автоматики и телемеханики позволяют проводить циклические измерения любых параметров сигналов [1 — 3]. Важным параметром является среднеквадратическое значение (СКЗ), характеризующее энергию сигнала [4].

Среднеквадратическое (эффективное) значение сигнала $s(t)$ за интервал времени τ определяется как корень квадратный из усредненного по времени квадрата напряжения (или силы тока)

$$S = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} s^2(t) dt}. \quad (1)$$

Для определения СКЗ требуется провести интегрирование квадрата исследуемого сигнала на интервале времени от t_0 до $t_0 + \tau$ [5]. При этом точное среднеквадратическое значение сигнала может быть получено при $t_0 = 0$ и $\tau \rightarrow \infty$, а для периодических сигналов — при τ , кратной T (периоду сигнала). Отклонение времени интегрирования (измерения) от значений, кратных периоду, приводит к дополнительной методической погрешности измерений (рис. 1).

Поэтому в прикладных задачах создания средств измерения для систем мониторинга возникает необходимость определить интервал интегрирования, обеспечивающий заданную (максимальную) точность измерений.

Возможны следующие подходы к выбору интервала интегрирования:

- использовать устройства выделения периода сигнала;
- задать фиксированный интервал интегрирования.

Устройства выделения периода (УВП) обычно используют простые алгоритмы, например фиксацию момента перехода сигнала через 0. Они могут быть применены в приборах для измерений сигналов относительно простой формы — синусоидальных сигналов, прямоугольных импульсов и т. д.

При измерениях сигналов сложной формы, например сигнала на входе приемника тональной рельсовой цепи,

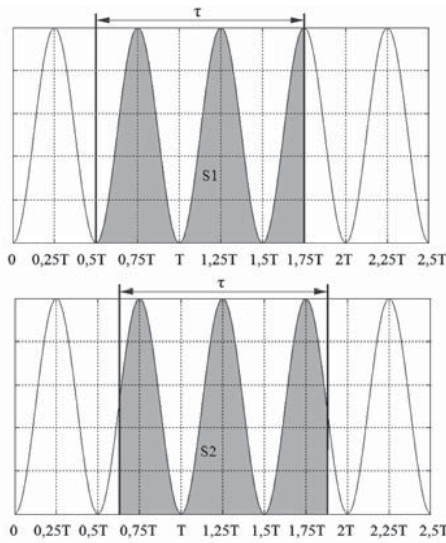


Рисунок 1 — Возникновение погрешности при измерении СКЗ

представленного на рис. 2, данный способ не подходит — нет простых и очевидных критериев выделения периода сигнала, что приводит к непрогнозируемой ошибке измерения СКЗ.

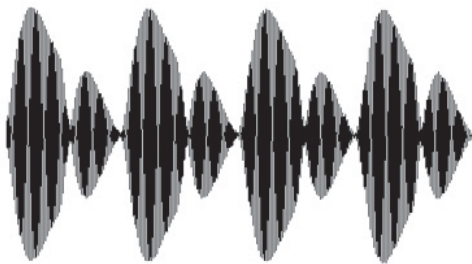


Рисунок 2 — Сигнал сложной формы

Измерить среднеквадратическое значение такого сигнала удобнее, задав фиксированный интервал интегрирования. Применять этот способ можно и для измерений сигналов простой формы. Однако в прикладных задачах возникает вопрос, какова будет точность измерений СКЗ в условиях реальных ограничений времени интегрирования и/или точности УВП. Нужно разработать метод априорной оценки погрешности измерений, связанной с перечисленными факторами, который позволит сформулировать требования для синтеза измерительных устройств с заданной точностью измерений.

Для упрощения задачи рассмотрим сигнал синусоидальной формы. При измерении СКЗ на интервале времени, кратном полупериоду, результат будет точным, т. е.

будет равен $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и соответствовать среднеквадратическому значению этого сигнала на неограниченном интервале времени.

будет равен $\frac{U_m}{\sqrt{2}}$ и соответствовать среднеквадратическому значению этого сигнала на неограниченном интервале времени.

Под действием разных причин в реальных системах невозможно обеспечить кратность интервала интегрирования полупериоду сигнала:

F_c реальных сигналов под воздействием внешних факторов изменяется во времени;

разброс параметров элементов измерителя (прибора) приводит к отклонению времени измерения от расчетного;

в случае измерения группы сигналов разных частот или сигналов в некотором спектре частот.

Увеличивать точность измерений за счет увеличения времени измерения зачастую невозможно, так как не обеспечиваются требования к быстродействию измерительной системы (например, реальные ограничения на время принятия решения в системах авторегулирования).

В результате возникает дополнительная (методическая) погрешность измерения СКЗ.

Найдем зависимость величины относительной погрешности $E(\tau)$ от времени измерения СКЗ

$$E(\tau) = \left(\frac{U}{U'} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где U — измеренное значение СКЗ, при фиксированном времени измерения; U' — истинное значение СКЗ исследуемого

сигнала (для синусоиды $U' = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$).

Определим зависимость $U(\tau)$ для синусоидального сигнала, выполним интегрирование на интервале от t_0 до $t_0 + \tau$:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} [U_m \cdot \sin(2\pi F_c t + \varphi_0)]^2 dt} = \\ &= \sqrt{\frac{U_m^2}{\tau} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \left\{ \frac{1}{2} [1 - \cos(4\pi F_c t + 2\varphi_0)] \right\} dt} = \\ &= \sqrt{\frac{U_m^2}{\tau} \left[\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} dt - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \cos(4\pi F_c t + 2\varphi_0) dt \right]} = \\ &= \sqrt{\frac{U_m^2}{\tau} \cdot \left(\frac{t}{2} - \frac{\sin(4\pi F_c t + 2\varphi_0)}{8\pi F_c} \right) \Big|_{t=t_0}^{t=t_0 + \tau}}; \end{aligned}$$

$$U = \sqrt{\frac{U_m^2}{\tau} \left[\left(\frac{t_0 + \tau}{2} - \frac{\sin(4\pi F_c \cdot (t_0 + \tau) + 2\varphi_0)}{8\pi F_c} \right) - \left(\frac{t_0}{2} - \frac{\sin(4\pi F_c \cdot t_0 + 2\varphi_0)}{8\pi F_c} \right) \right]}. \quad (3)$$

После преобразований получим

$$U = \sqrt{\frac{U_m^2}{2} \left[1 + \frac{\sin(4\pi F_c \cdot t_0 + 2\varphi_0) - \sin(4\pi F_c \cdot t_0 + 2\varphi_0 + 4\pi F_c \tau)}{4\pi F_c \tau} \right]}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что при постоянной частоте и амплитуде измеряемого сигнала результат измерения СКЗ будет зависеть от времени начала измерений, начальной фазы сигнала и продолжительности измерений.

Заменим переменные $\psi = (4\pi F_c \cdot t_0 + 2\varphi_0)$ и подставим (4) в (2)

$$E(\psi, \tau) = \left(\sqrt{1 + \frac{\sin(\psi) - \sin(\psi + 4\pi F_c \tau)}{4\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (5)$$

При любом фиксированном времени измерения τ зависимость погрешности измерения выражена периодической функцией с периодом 2π . Из графического представления функции $E(\psi, \tau)$ (рис. 3) видно, что функция имеет локальные максимумы и минимумы, а также нулевые значения в любом сечении вдоль осей ψ и τ .

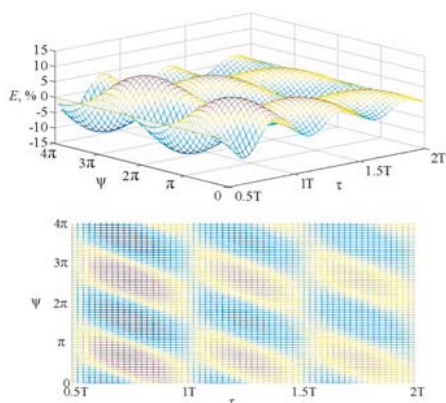


Рисунок 3 — Зависимость погрешности измерения $E(\psi, \tau)$

Рассмотрим множество сечений в плоскостях $\psi = \text{const}$ (рис. 4) и $\tau = \text{const}$ (рис. 5).

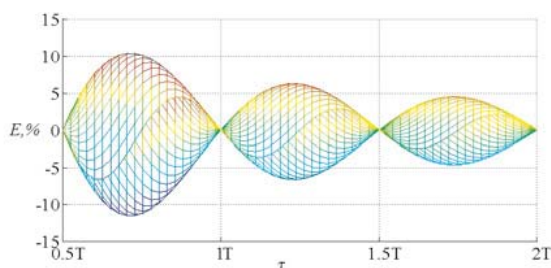


Рисунок 4 — Зависимость $E(\psi, \tau)$ в плоскостях $\psi = \text{const}$

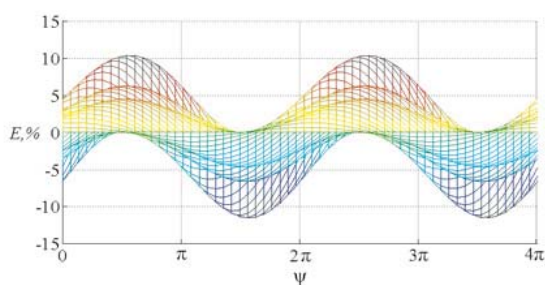


Рисунок 5 — Зависимость $E(\psi, \tau)$ в плоскостях $\tau = \text{const}$

Найдем условия, при которых имеется нулевая погрешность измерений $E(\psi, \tau)$, для чего приравняем к нулю функцию (5)

$$\left(1 + \frac{\sin(\psi) - \sin(\psi + 4\pi F_c \tau)}{4\pi F_c \tau}\right) - 1 = 0.$$

Найдем корни полученного уравнения

$$\sin(\psi) - \sin(\psi + 4\pi F_c \tau) = 0.$$

Используя тригонометрические преобразования, получим

$$2 \cdot \sin(2\pi F_c \tau) \cdot \cos(\psi + 2\pi F_c \tau) = 0.$$

Корнями уравнения являются:

$$\tau = \frac{k}{2F_c}, k \in Z; \quad (6)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} - 2\pi F_c \tau + \pi k, k \in Z. \quad (7)$$

Из (6) следует, что при времени измерения τ , кратном полупериоду сигнала, независимо от значений момента начала измерения t_0 и начальной фазы сигнала φ_0 , погрешность $E(\psi, \tau)$ будет равна нулю. Кроме того, погрешность $E(\psi, \tau)$ будет равна нулю при выполнении условия (7). Графически значения ψ и τ , при которых погрешность $E(\psi, \tau)$ равна нулю, представлены на рис. 6.

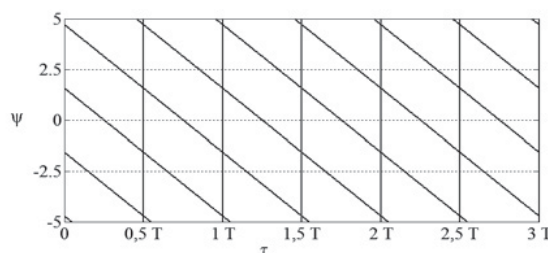


Рисунок 6 — Значения ψ и τ , при которых погрешность $E(\psi, \tau) = 0$

Если допустить, что начальная фаза сигнала случайна и момент начала измерений не синхронизируется во времени с измеряемым сигналом, то значение ψ в (5) случайная величина, а значение погрешности будет принимать значения из области, ограниченной сверху и снизу кривыми (8) и (9), так как синус имеет область определения от -1 до 1:

$$E_{\max}(\tau) = \left(\sqrt{1 + \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%; \quad (8)$$

$$E_{\min}(\tau) = \left(\sqrt{1 - \frac{1}{2\pi F_c \tau}} - 1 \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

На рис. 7 представлены зависимости (8) и (9), а также область значений погрешности от времени измерения.

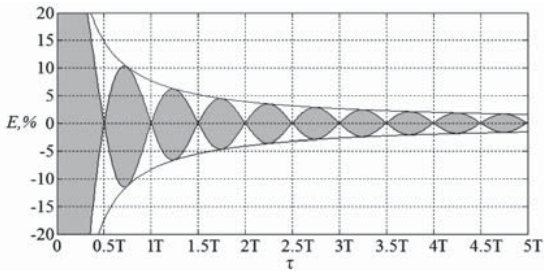


Рисунок 7 — Область возможных значений погрешности измерений и зависимости (8) и (9)

Полученные зависимости, с одной стороны, подтверждают два основных метода повышения точности измерений СКЗ на ограниченных интервалах времени, приведенных ранее, а с другой — позволяют численно сформулировать требования к точности определения границы периода для УВП или требования к длительности фиксированного интервала измерения, позволяющего обеспечить заданную точность результата интегрирования.

Определим длительность фиксированного интервала измерения τ , не синхронизированного во времени с измеряемым сигналом для достижения заданной точности E_3 . Из (8) выразим τ

$$\tau = \frac{1}{(E_3^2 + 2E_3) \cdot 2\pi F_c} \quad (10)$$

Определим, используя выражение (10), длительность фиксированного интервала измерения, не синхронизированного во времени с периодом измеряемого сигнала, при которой гарантированно достигается заданная погрешность измерения (рис. 8, зеленая область).

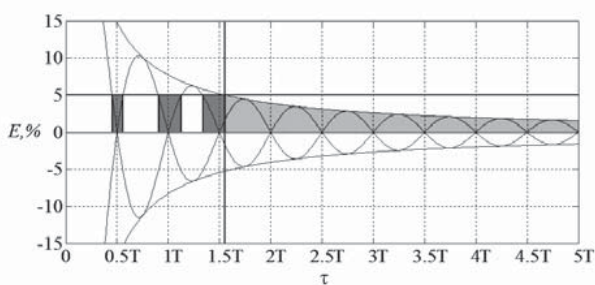


Рисунок 8 — Длительности интервалов времени измерения, при которых гарантированно достигается точность выше 5%

Интервал измерения для обеспечения заданной погрешности можно сократить при выполнении подбора длительности интервала измерения к измеряемому сигналу (см. рис. 8, красная область).

Используя полученные результаты, исследуем точность измерителя с фиксированным кратным периоду сигнала интервалом интегрирования при измерении СКЗ напряжения промышленной частоты 50 Гц из системы электроснабжения

общего назначения. Согласно стандарту [6], предельно допустимое отклонение частоты в электрических сетях систем электроснабжения общего назначения переменного трехфазного и однофазного тока частотой 50 Гц равно $\pm 0,4$ Гц.

Примем интервал интегрирования кратным нормативному периоду частоты 50 Гц, тогда период сигнала будет отличаться на 0,79% при увеличении частоты на 0,4 Гц и на 0,81% при уменьшении частоты на 0,4 Гц, что приводит к появлению погрешности (рис. 9).

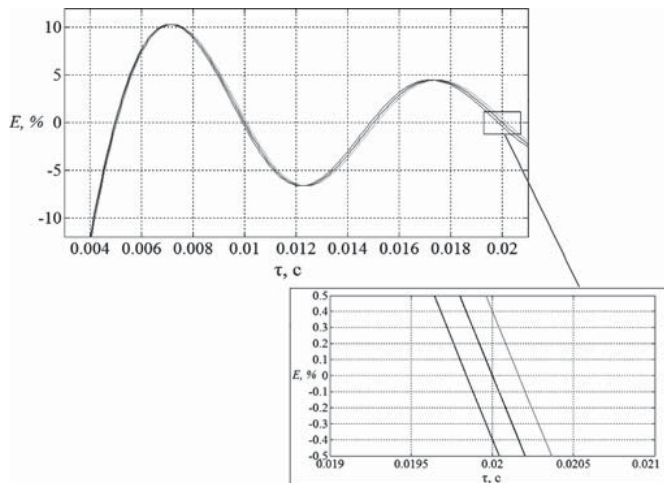


Рисунок 9 — Возникновение погрешности при измерениях СКЗ с фиксированным периодом в зависимости от частоты сигнала

При таких отклонениях частоты сигнала, в зависимости от времени измерения при случайной начальной фазе измерения, погрешность определения СКЗ будет находиться в пределах заштрихованной области (рис. 10).

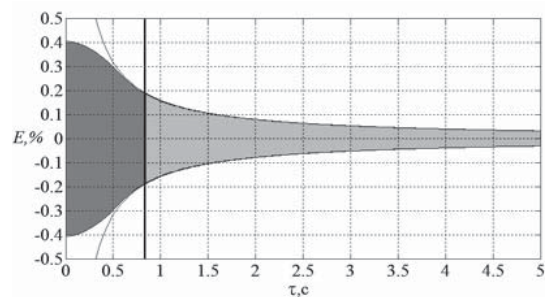


Рисунок 10 — Область изменения погрешности в зависимости от длительности времени измерения при отклонениях частоты сигнала в пределах ГОСТ 13109-97

Из (8) следует, что в наихудшем случае при времени измерения в окрестности 0,1 с погрешность достигнет 1,58%, в то время как по рис. 10 видно, что при использовании метода выбора фиксированного интервала измерения погрешность будет почти в 4 раза меньше. В зависимости от отклонения частоты сигнала во времени в пределах ГОСТ, получить погрешность меньше 0,3% можно при τ , равном или больше

0,52 с (26 периодов сигнала частотой 50 Гц), а погрешность меньше 0,1% при τ , равном или больше 1,6 с (80 периодов сигнала частотой 50 Гц).

Выводы

Для определения СКЗ сигналов сложной формы, период которых выделить затруднительно, следует использовать фиксированный интервал измерения. Неправильный выбор длительности этого интервала вызывает значительную погрешность измерений.

Погрешность является сложной функцией, имеющей локальные максимумы, минимумы и нули, зависящие от длительности интервала измерения, момента начала измерения и фазы сигнала в этот момент.

Получен метод определения длительности интервала измерения для достижения заданной точности при измерении синусоидального сигнала.

Для повышения скорости выполнения измерений требуется подобрать время измерения близко к кратному числу полупериодов измеряемого сигнала.

Литература

1. Бушуев С.В., Никитин А.Б. Тенденции развития электрической централизации и компьютерных систем оперативного управления движением поездов на станциях // *Транспорт Урала*. 2006. № 2 (9). С. 14 — 18.
2. Гундырев К.В. Анализ дискретной и аналоговой информации, представленной в тиражируемых системах диспетчерского контроля и телеизмерений // *Транспорт 2005 : труды науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону : РГУПС, 2005*. С. 3 — 5.
3. Гавзов Д.В., Бушуев С.В., Гундырев К.В. Комплекс технических средств распределенных измерений, контроля и управления // *Проблемы разработки, внедрения и эксплуатации микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики : Сб. науч. трудов. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2005*. С. 103 — 108.
4. Бушуев С.В., Гундырев К.В. Распределенная телеметрическая подсистема диагностики компьютерной электрической централизации // *Информационные технологии и безопасность технологических процессов. Екатеринбург : УрГУПС, 2004*. С. 3 — 8.
5. Попов В.С., Желбаков И.Н. Измерение среднеквадратического значения напряжения. М. : Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
6. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : Изд-во стандартов, 1997. 33 с.

References

1. Bushuev S.V., Nikitin A.B. Tendencies of power interlocking and computer systems development of efficient traffic operation at the stations // *Transport Urala*. 2006. № 2 (9). S.14 – 18.
2. Gundyrev K.V. The analysis of discrete and analogue information given in the reproducing systems of dispatcher control and telemetry // *Transport 2005: Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Rostov n/ D: RGUPS, 2005*. S. 3 – 5.
3. Gavzov D.V., Bushuev S.V., Gundyrev K.V. Technical possibilities complex of distributed measurements, control and management // *Problemy razrabotki, vnedreniya i ekspluatatsii mikroelektronnykh sistem zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: Sbornik nauchnykh trudov. Sankt-Peterburg: PGUPS, 2005*. S. 103 – 108.
4. Bushuev S.V., Gundyrev K.V. Distributed telemetry subsystem of computer power interlocking diagnostics // *Informatsionnye tekhnologii i bezopasnost tekhnologicheskikh protsessov. Ekaterinburg, UrGUPS, 2004*. S. 3 – 8.
5. Popov V.S., Zhelbakov I.N. Measurement of mean-square voltage value. M.: Energoatomizdat, 1987. 120 s.
6. GOST 13109-97. Electric power. Compatibility of technical equipment. Quality standards in public electricity supply systems. M. : Izd-vo standartov, 1997. 33 s.