

УДК 621.398.725:621.317.727.1

А.И. Заревич

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЯХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ШУНТОВ

A.I. Zarevich

DIGITAL SIGNAL PROCESSING FOR AUTOMATED TESTING OF HIGH-CURRENT SHUNT

Описано применение цифровой обработки сигналов при определении динамических характеристик сильноточных токовых преобразователей – шунтов. Для определения динамических характеристик импульсы тока на входе шунта и напряжения на его выходе записываются в память цифрового осциллографа. Согласно предложенному алгоритму, для этих сигналов рассчитываются спектры, затем амплитудно- и фазочастотные характеристики шунта определяются как отношение спектра выходного импульса напряжения к спектру импульса входного тока на соответствующих частотах.

ИСТОЧНИК ИМПУЛЬСНОГО ТОКА; ТОКОВЫЙ ШУНТ; ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ; АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ.

A digital signal processing method for measuring frequency response function of high-current devices are described. This is based on a joint digital processing of the input short pulse signal and a corresponding output. In order to measure the frequency response function, a short current pulse is applied to the shunt input; input and output signals of the shunt are recorded in a digital oscilloscope memory; then spectra of these two signals are computed. Amplitude and phase responses are determined by the arithmetic ratio of spectral components of the input and output signals at appropriate frequencies.

PULSE CURRENT SOURCE; CURRENT SHUNT; DYNAMIC BEHAVIOUR; TESTING AUTOMATION.

Измерение импульсных токов величиной порядка десятков кА в условиях значительных электромагнитных помех традиционно осуществляется с использованием токовых шунтов [1, 2]. При этом токи могут иметь сложную форму огибающей и сложный спектральный состав. Определение динамических метрологических характеристик токовых шунтов связано с измерениями частотной зависимости малых импедансов, составляющими порядка десятков и сотен микроом [3]. Классические методы определения малых импедансов используют генераторы-калибраторы тока и прецизионные вольтметры. Эти способы

требуют дорогостоящего метрологического оборудования, доступного ограниченному числу специализированных лабораторий. В настоящее время активно разрабатываются импульсные методы определения метрологических характеристик шунтов. В данных методах на вход тестируемого шунта подается короткий импульс тока [4]. С помощью эталонного токового преобразователя и цифрового осциллографа фиксируются входные и выходные сигналы шунта. Далее, с помощью цифровой обработки определяются исследуемые динамические характеристики. Достоинство этих методов заключается в низких требованиях к исхо-

дному импульсному тестирующему сигналу. При практическом применении данного метода возникает ряд задач, связанных с адекватным восстановлением формы импульсного сигнала, искаженного шумами и квантованием аналого-цифровых преобразователей. Решение этих задач лежит в области построения математических моделей, восстанавливающих форму сигнала во временной и спектральной областях [5]. Цель статьи – описание метода цифровой обработки импульсных сигналов для получения амплитудно- и фазочастотной характеристик сильноточного токового шунта.

Определение динамических характеристик токовых шунтов

Задача определения динамических метрологических характеристик токовых шунтов может быть решена путем подачи на вход токового шунта короткого импульса тока. При этом входной и выходной сигналы шунта необходимо записать в память цифрового осциллографа и определить их спектры. Амплитудно- и фазочастотные характеристики определяются по арифметическому отношению спектральных плотностей входного и выходного сигналов на соответствующих частотах. Нами предложен и исследован алгоритм реализации указанного метода для определения частотных характеристик преобразователей тока.

При практическом применении метода зондирующий сигнал может иметь любую форму и должен удовлетворять условиям Дирихле: на исследуемом участке быть кусочно-непрерывным, ограниченным и иметь конечное число экстремумов. Практическое выполнение данных условий является сложной задачей. Так, требование кусочной непрерывности сигнала подразумевает отсутствие разрывов первого рода, которые неизбежно возникают при естественном ограничении длительности числовой последовательности, соответствующей сигналу. Повышение детализации анализа приводит к необходимости уменьшения шага дискретизации и повышения разрядности квантования, что в свою очередь способствует зашумленности сигнала

и, следовательно, увеличивает число локальных экстремумов.

Получаемые в эксперименте входные и выходные сигналы шунта представлены последовательностью из N элементов $x(t_k)$, где t_k – время регистрации k -го элемента в последовательности ($1 \leq k \leq N$); $x(t_k)$ – входной сигнал; $y(t_k)$ – выходной сигнал. Дискретное преобразование Фурье, примененное к сигналам, покажет спектральный состав в виде соответствующих векторов комплексных чисел $X(f_k)$ и $Y(f_k)$:

$$X(f_k) = \sum_{j=1}^N x(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (1)$$

$$Y(f_k) = \sum_{j=1}^N y(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad f_N = \frac{1}{2\pi} e^{-2\pi i/N},$$

где f_k – вектор частот, соответствующий комплексным векторам $X(f_k)$ и $Y(f_k)$, полученный исходя из длины выборки и частоты Найквиста; i – мнимая единица.

Комплексный коэффициент передачи шунта $K(f_k)$ будет определяться по выражению

$$K(f_k) = \frac{Y(f_k)}{X(f_k)}. \quad (2)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи есть амплитудно-частотная характеристика шунта, а его аргумент – фазочастотная характеристика.

В условиях физического эксперимента импульсный сигнал всегда зашумлен и характеризуется нестабильностью амплитуды, длительности и формы огибающей. При этом нестабильность длительности импульсов и условий запуска развертки цифрового осциллографа существенно ограничивает применимость временного усреднения сигналов. В то же время усреднение методом скользящего среднего позволит уменьшить влияние шумов на спектр сигнала.

Для определения окон временного усреднения входного и выходного сигналов шунта W_x и W_y необходимо эти сигналы $x(t_k)$ и $y(t_k)$ разложить в ряд Фурье, а затем определить ширины спектров сигнала по уровню -10 дБ ΔF_x и ΔF_y . Ширина окна усреднения обратно пропорциональна ширине спектра. То есть

$$W_X = \frac{1}{\Delta F_X}, \quad W_Y = \frac{1}{\Delta F_Y}. \quad (3)$$

Тогда исходные сигналы $x(t_k)$ и $y(t_k)$ в результате сглаживания примут усредненные значения, определяемые по формулам:

$$\bar{x}(t_j) = \frac{1}{W_X} \sum_{k=k-\frac{W_X}{2}}^{k+\frac{W_X}{2}} x(t_k), \quad (4)$$

$$\bar{y}(t_j) = \frac{1}{W_Y} \sum_{k=k-\frac{W_Y}{2}}^{k+\frac{W_Y}{2}} y(t_k).$$

Соответственно, дискретное преобразование Фурье, примененное к сглаженным сигналам, даст их спектральный состав:

$$\bar{X}(f_k) = \sum_{j=1}^N \bar{x}(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}, \quad (5)$$

$$\bar{Y}(f_k) = \sum_{j=1}^N \bar{y}(t_j) f_N^{(j-1)(k-1)}.$$

При постоянном размере выборки N и неизменности длительности развертки цифрового осциллографа, частоты компонентов f_k дискретного преобразования Фурье остаются неизменными и не зависят от смещения сигнала относительно начала выборки. Следовательно, шумы и искажения измеряемых сигналов приведут к случайной погрешности спектральных компонент на фиксированных частотах.

В предположении что случайные погрешности подчинены нормальному закону, повышение точности практического применения метода может быть достигнуто

путем равномерного усреднения по ансамблю реализаций спектральных компонент сглаженных сигналов $\bar{X}(f_k)$ и $\bar{Y}(f_k)$ на фиксированной частоте f_k . При выполнении n измерений входного импульсного сигнала и соответствующего отклика шунта, усредненные спектральные компоненты сигналов $\bar{X}(f_k)$ и $\bar{Y}(f_k)$ находятся по выражениям:

$$\bar{X}(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\bar{X}_j(f_k)| e^{i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \arg(X_j(f_k))}, \quad (6)$$

$$\bar{Y}(f_k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\bar{Y}_j(f_k)| e^{i \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \arg(Y_j(f_k))}.$$

Тогда, с учетом (6), коэффициент передачи (2) может быть записан как

$$\bar{K}(f_k) = \frac{\bar{Y}(f_k)}{\bar{X}(f_k)}. \quad (7)$$

Погрешность предложенного метода определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового преобразователя может быть оценена путем определения функции когерентности γ_{xy} между спектральными плотностями сигнала-отклика и тестового сигнала, как предложено в [4, 6]:

$$\bar{\gamma}_{xy}^2(f_k) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \bar{X}_j^*(f_k) \bar{Y}_j(f_k) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |\bar{X}_j(f_k)|^2 \sum_{j=1}^n |\bar{Y}_j(f_k)|^2}. \quad (8)$$

Функция когерентности γ_{xy} , определенная по выражению (8), в идеальном случае

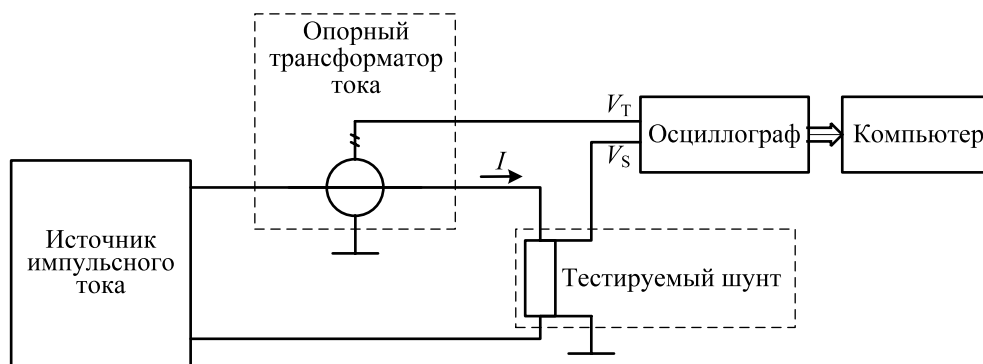


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения динамических характеристик шунтов

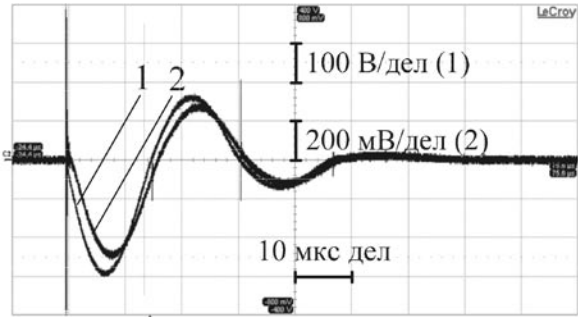


Рис. 2. Сигналы с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2)

равна единице, что соответствует полной корреляции выходного $Y(f)$ и входного $X(f)$ сигналов. Дополнительные шумы, вносимые исследуемой цепью и средствами измерения, а также возможные нелинейные явления уменьшают γ_{xy} . В пределе γ_{xy} стремится к нулю, что соответствует отсутствию причинно-следственной связи между сигналами.

Среднее квадратическое отклонение σ , а следовательно, и относительная погрешность определения коэффициента передачи $K(f_k)$ могут быть получены из выражения (8) следующим образом:

$$\sigma(\bar{K}(f_k)) = \frac{1}{\sqrt{2n}} \frac{\sqrt{1 - \bar{\gamma}_{xy}^2(f_k)}}{|\bar{\gamma}_{xy}(f_k)|}. \quad (9)$$

Полная погрешность измерения должна включать в себя относительную погрешность определения коэффициента передачи, полученную из выражения (9), и погрешности, вносимые используемыми средствами измерения.

На основании изложенных рассуждений предложен алгоритм цифровой обработки импульсных сигналов, получаемых при исследовании преобразователей тока, позволяющий определить амплитудно- и фазочастотные характеристики [7, 8]. Алгоритм реализован на языке технических вычислений MATLAB.

Для определения значения спектральных компонент сигналов на заданных частотах использован алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm) [9]. Это также позволяет экономить память ЭВМ и повышает вы-

числительную эффективность алгоритма. Спектральные компоненты определялись в определенном ранее диапазоне частот сигналов по уровню -10 дБ ΔF_x и ΔF_y .

Экспериментальное определение динамических характеристик токового шунта

Предложенный метод был применен для экспериментального определения частотной зависимости импеданса шунта коаксиальной конструкции, предназначенного для измерения импульсных токов амплитудой до 20 кА [2]. Активное сопротивление шунта составляет порядка 170 мкОм.

Для этого эксперимента был разработан и изготовлен формирователь импульса тока. Формирователь обеспечил получение импульсов тока амплитудой до 20 кА и длительностью до 150 мкс. Схема эксперимента по определению динамических характеристик шунта представлена на рис. 1.

Сигнал с формирователя импульсного тока поступал на входные токовые клеммы исследуемого шунта и одновременно фиксировался с помощью широкодиапазонного трансформатора тока с коэффициентом преобразования тока в напряжение 0,1. Сигналы с трансформатора тока и потенциальных выводов исследуемого шунта регистрировались двухканальным цифровым осциллографом.

Для измерения тока использовался установленный трансформатор тока 13W0100 производства фирмы Lilco Ltd [10]. Про-

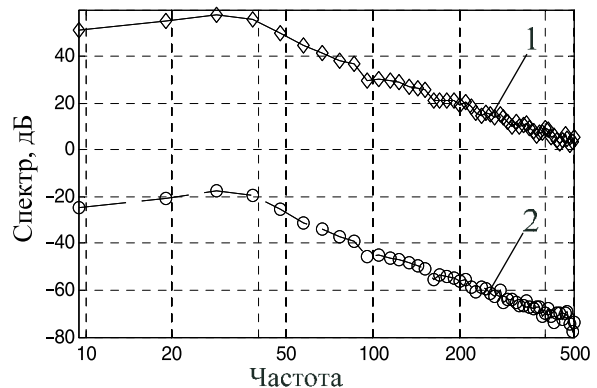


Рис. 3. Спектры сигналов с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2)

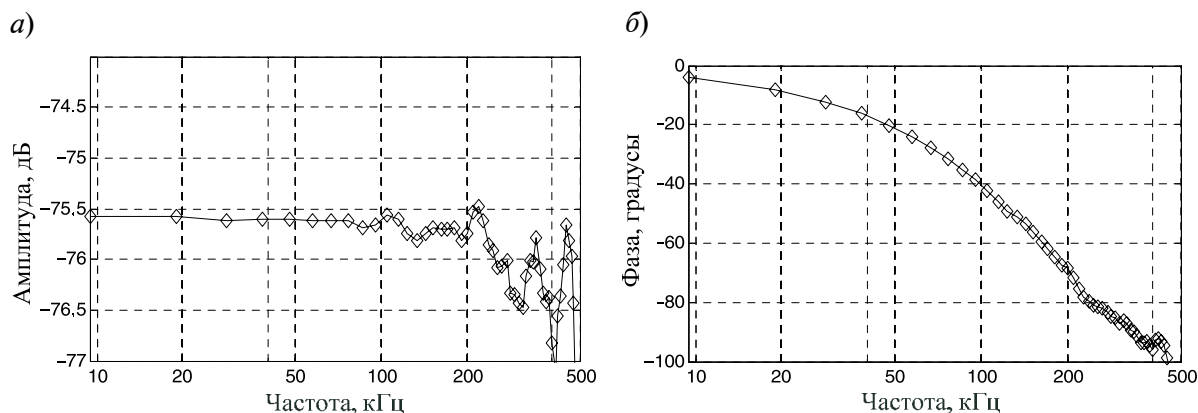


Рис. 4. Динамические характеристики шунта:

a – модуль коэффициента передачи шунта; *б* – аргумент коэффициента передачи шунта

изводителем заявлены следующие технические характеристики трансформатора: частотный диапазон по уровню минус 3 дБ 0,3 Гц–25 МГц, погрешность измерений тока $\pm 0,5\%$ пиковое значение тока 5 кА, входное сопротивление нагрузки трансформатора > 50 кОм.

Фиксация сигналов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа LeCroy WaveSurfer 62S.

На рис. 2 показаны типичные сигналы, получаемые с выхода опорного трансформатора тока (кривая 1) и с выхода тестируемого шунта (кривая 2). Для наглядности сигналы приведены к одному масштабу.

Видно, что амплитуда импульса тока, протекающего через шунт, достигает значения ~ 3 кА.

Далее, в соответствии с алгоритмом определены усредненные спектры сигналов с выходов трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2). Эти спектры приведены на рис. 3.

Из приведенных графиков видно, что

значение спектра сигнала с выхода шунта уменьшается с ростом частоты. Кроме того, видно, что в области верхних частот, начиная с 100 кГц, спектр сигнала искажен шумом квантования и собственными шумами электрических цепей.

Рис. 4 иллюстрирует применение предложенного алгоритма при обработке экспериментальных данных. Видно, что в диапазоне частот до 100 кГц коэффициент передачи шунта примерно равен $-75,5$ дБ.

В статье предложен и экспериментально исследован импульсный метод анализа динамических характеристик сильноточных токовых шунтов. Метод включает усреднение спектральных компонент сигналов по ансамблю, что позволяет повысить точность определения характеристик шунта. Дальнейшие исследования будут направлены на восстановление формы импульсного сигнала, включая снижение шума и уменьшение погрешности квантования как во временной, так и в частотной областях [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A computer system: measurement of welding surge currents // Measurement and control. –2009. –Vol. 42. –№ 3. –P. 44–47.
2. Muravyov S.V., Borikov V.N., Kaysanov S.A. Computer system for measurement of welding process parameters // Proc. of the XVIII IMEKO World Congress. Sept. 22–27, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
3. Metwally I.A. Coaxial-Cable Wound Rogows-

- ki Coils for Measuring Large-Magnitude Short-Duration Current Pulses // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. –2013. –Vol. 62. –№ 1. –P. 119–128.
4. Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M. Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts, Metrology in the 3rd Millennium // Proc. XVII IMEKO World Congress. June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia. –P. 586–589.
5. Schoukens J., Vandersteen G., Rolain Y., Pin-

telon R. Frequency response function measurements using concatenated subrecords with arbitrary length // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. –2012. –Vol. 61. –№ 10. –2682–8 p.

6. **Bendat J.S., Piersol A.G.** Engineering Applications of Correlations and Spectral Analysis. –Wiley, New York, 1980. –541 p.

7. **Zarevich A.I., Muravyov S.V., Bedareva E.V., Velychko O.M.** Digital processing of pulse signals for current transducers frequency response determination // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. –2012. –Vol. 320. –№ 5. –P. 116–120.

8. **Zarevich A., Muravyov S., Bedareva E.** Digital Signal Processing in Pulse Method for Measuring Frequency Response Function of High-Current

Shunt // 19th IMEKO TC 4 Symp. Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability. July 18–19, 2013, Barcelona, Spain. –P. 496–500.

9. **Ifeachor E., Jervis B.** Digital signal processing. A practical approach. –Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.

10. **Cordingley B., Chamund D.J.** Some observations on the performance of modern wideband current transformers in pulse current measurement applications // Proc. of 5th Modulator-Klystron Workshop for Future Linear Colliders CERN. 26–27 Apr. 2001, Geneva, Switzerland [электронный ресурс] / URL: <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf>

REFERENCES

1. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M.** A computer system: measurement of welding surge currents / Measurement and control. –2009. –Vol. 42. –№ 3. –P. 44–47.

2. **Muravyov S.V., Borikov V.N., Kaysanov S.A.** Computer system for measurement of welding process parameters / Proc. of the XVIII IMEKO World Congress. Sept. 22–27, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

3. **Metwally I.A.** Coaxial-Cable Wound Rogowski Coils for Measuring Large-Magnitude Short-Duration Current Pulses / IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. –2013. –Vol. 62. –№ 1. –P. 119–128.

4. **Cherbaucich C., Crotti G., Kuljaca N., Novo M.** Evaluation of the dynamic behaviour of heavy current shunts, Metrology in the 3rd Millennium / Proc. XVII IMEKO World Congress. June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia. –P. 586–589.

5. **Schoukens J., Vandersteen G., Rolain Y., Pintelon R.** Frequency response function measurements using concatenated subrecords with arbitrary length / IEEE Transactions on instrumentation and measurement. –2012. –Vol. 61. –№ 10. –2682–8 p.

6. **Bendat J.S., Piersol A.G.** Engineering Ap-

plications of Correlations and Spectral Analysis. –Wiley, New York, 1980. –541 p.

7. **Zarevich A.I., Muravyov S.V., Bedareva E.V., Velychko O.M.** Digital processing of pulse signals for current transducers frequency response determination / Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. –2012. –Vol. 320. –№ 5. –P. 116–120. (rus)

8. **Zarevich A., Muravyov S., Bedareva E.** Digital Signal Processing in Pulse Method for Measuring Frequency Response Function of High-Current Shunt / 19th IMEKO TC 4 Symp. Advances in Instrumentation and Sensors Interoperability. July 18–19, 2013, Barcelona, Spain. –P. 496–500.

9. **Ifeachor E., Jervis B.** Digital signal processing. A practical approach. –Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.

10. **Cordingley B., Chamund D.J.** Some observations on the performance of modern wideband current transformers in pulse current measurement applications / Proc. of 5th Modulator-Klystron Workshop for Future Linear Colliders CERN. 26–27 Apr. 2001, Geneva, Switzerland. Available <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf>

ЗАРЕВИЧ Антон Иванович – доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук.

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30.

E-mail: antonzarevich@tpu.ru

ZAREVICH, Anton I. National Research Tomsk Polytechnic University.

634050, Lenina Ave. 30, Tomsk, Russia.

E-mail: antonzarevich@tpu.ru