

ИМПУЛЬСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛЬНОТОЧНЫХ ШУНТОВ

А.И. Заревич, С.В. Муравьев, Е.В. Бедарева, С.Р. Карпенко*

Томский политехнический университет

E-mail: antonzarevich@ngs.ru

*ГП «Укрметрестстандарт», г. Киев, Украина

Рассмотрен и экспериментально апробирован метод определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового шунта, основанный на совместной цифровой обработке входного короткого импульсного воздействия и отклика на него. Частотная зависимость коэффициента передачи шунта рассчитывается с помощью компонентов комплексных спектральных преобразований напряжений с выходов шунта и эталонного преобразователя тока. Показано, что точность метода может быть повышена путем усреднения по ансамблю спектральных составляющих сигналов.

Ключевые слова:

Токовый шунт, динамические характеристики, преобразование Фурье.

Key words:

Current shunt, dynamic behaviour, Fourier transform.

Введение

Современное развитие энергетики больших мощностей связано с необходимостью генерировать и измерять большие импульсные токи. Эти токи могут достигать величин порядка сотен килоампер при длительности импульса до сотен миллисекунд, и их измерения существенно осложняются образованием сильных магнитных полей, электродинамических сил и эффектами рассеивания. Измерения таких токов часто выполняют с использованием поясов Роговского и токовых трансформаторов. В условиях значительных электромагнитных помех используют сильноточные безиндуктивные шунты [1, 2].

Актуальной остается задача определения динамических метрологических характеристик токовых шунтов, которая требует для своего решения наличия дорогостоящих источников гармонического или импульсного тока большой амплитуды или труднореализуемых методов измерения малых импедансов шунтов. Альтернативой этим двум подходам являются методы, основанные на формировании короткого импульсного воздействия на исследуемый шунт и последующей цифровой обработке его входных и выходных сигналов [3, 4]. Этот подход позволяет предложить новый метод определения амплитудно- и фазочастотной характеристик (АЧХ, ФЧХ) токового шунта.

Целью статьи является экспериментальное исследование импульсного метода определения динамических метрологических характеристик токовых шунтов на примере сильноточного шунта на 20 кА.

Метод определения динамических характеристик сильноточных шунтов

Задача определения динамических метрологических характеристик токовых шунтов может быть решена путем подачи на вход токового шунта ко-

роткого 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. Авторами был предложен и исследован алгоритм реализации указанного метода для определения частотных характеристик преобразователей тока [5]. Алгоритм был реализован на языке технических вычислений MATLAB [6] и апробирован при определении амплитудно- и фазочастотных характеристик интегрирующей RC-цепи.

В ходе исследований было показано, что в полной мере метод применим только для цепей, которые в исследуемом частотном диапазоне описываются дифференциальными уравнениями первого порядка. Для цепей более высокого порядка применимость метода ограничена минимальной шириной резонансов, которые могут быть различимы в результате преобразования Фурье.

В условиях физического эксперимента реальный импульсный сигнал всегда зашумлен и характеризуется нестабильностью амплитуды, длительности и формы огибающей. Средства измерения, применяемые для регистрации таких сигналов, также вносят свою погрешность. Влияние этих случайных факторов снижают путем многократных измерений и усреднения их результатов по ансамблю. Поскольку, при постоянном размере выборки и неизменности длительности развертки цифрового осциллографа, частоты дискретного преобразования Фурье остаются неизменными, и его состав не зависит от смещения сигнала относительно начала выборки, повышение точности практического применения метода может быть достигнуто путем равномерного усреднения по ансамблю реализаций спектральных компонент сигналов.

Точность предложенного метода определения амплитудно- и фазочастотных характеристик токового шунта может быть оценена путем определения функции когерентности γ_{xy} между спектральными плотностями сигнала-отклика $Y_j(f_i)$ и тестового сигнала $X_j(f_i)$ на заданной i -й частоте f_i при длине частотной выборки n , как предложено в [7]:

$$\bar{\gamma}_{xy}^2(f_i) = \frac{\left| \sum_{j=1}^n X_j^*(f_i) Y_j(f_i) \right|^2}{\sum_{j=1}^n |X_j(f_i)|^2 \sum_{j=1}^n |Y_j(f_i)|^2}. \quad (1)$$

Функция когерентности γ_{xy} , определенная по выражению (1), в идеальном случае равна 1, что соответствует полной корреляции выходного $Y(f)$ и входного $X(f)$ сигналов. Дополнительные шумы, вносимые исследуемым объектом 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.

Среднеквадратическое отклонение σ , а, следовательно, и относительная погрешность определения коэффициента передачи $K(f_i)$ на заданной частоте f_i могут быть получены из выражения (1):

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

Экспериментальные исследования амплитудно- и фазочастотной характеристик сильноточного шунта

Предложенный метод был применен для экспериментального определения амплитудно- и фазочастотной характеристик шунта коаксиальной конструкции, предназначенного для измерения импульсных токов амплитудой до 20 кА [2]. Материалом внутреннего цилиндра резистивной части шунта является марганец, внешнего цилиндра – медь. Активное сопротивление шунта составляет порядка 170 мкОм.

Для этого эксперимента был разработан и изготовлен формирователь импульса тока. Электрическая принципиальная схема формирователя, представлена на рис. 1.

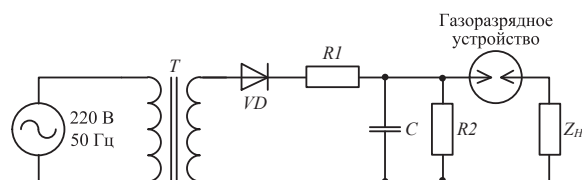


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема формирователя импульса тока

Формирователь импульса тока питается от сети переменного тока (220 В, 50 Гц). Напряжение сети преобразуется трансформатором T до 474 В и выпрямляется с помощью диода VD . Резистор $R1$ со-

противлением 124 кОм ограничивает ток заряда конденсатора C емкостью 50 мкФ и обеспечивает задержку между импульсами. В момент достижения на конденсаторе напряжения в 300 В срабатывает газоразрядное устройство (2-х электродный газонаполненный разрядник EPCOS EC350–100), и происходит импульсный разряд конденсатора через нагрузочную цепь, включающую исследуемый шунт $Z_{ш}$. Резистор $R2$ сопротивлением 1,5 МОм обеспечивает разряд конденсатора C при отключении формирователя от сети.

Схема эксперимента по определению динамических характеристик шунта представлена на рис. 2. Сигнал с формирователя импульсного тока поступает на входные токовые клеммы исследуемого шунта и одновременно фиксируется с помощью трансформатора тока 13W0100 производства фирмы Lilco Ltd [8] с коэффициентом преобразования 0,1. Сигналы с трансформатора тока и потенциальных выводов исследуемого шунта регистрируются двухканальным цифровым осциллографом LeCroy WaveSurfer 62Xs.

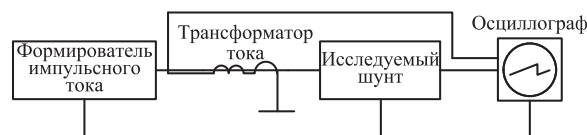


Рис. 2. Схема эксперимента по определению динамических характеристик шунта

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы сигналов, полученные с выходов эталонного трансформатора тока (кривая 1) и шунта (кривая 2).

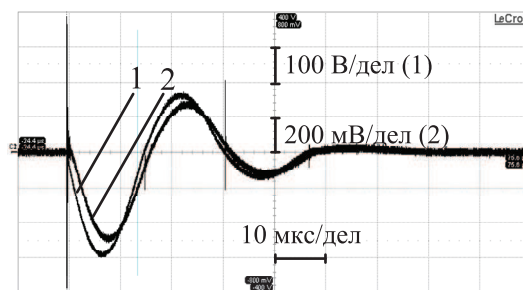


Рис. 3. Сигналы с выходов эталонного трансформатора тока (кривая 1) и сильноточного шунта (кривая 2)

Как видно из представленных осциллограмм, амплитуда импульса тока, протекающего через шунт, достигает значения ~ 3 кА. Сигнал с выхода шунта имеет резкий выброс на фронте, обусловленный переходными процессами, наложением протекающего через шунт тока и собственными колебаниями в шунте, имеющими частоту порядка 30 МГц. Сигналы на рис. 3 для наглядности приведены к одному масштабу.

Полученные в соответствии с описанным авторами в [4] методом экспериментальные АЧХ и ФЧХ шунта представлены на рис. 4.

Из приведенных характеристик видно, что в диапазоне частот до 100 кГц шунт имеет линейный коэффициент передачи $|K|$ по амплитуде, соста-

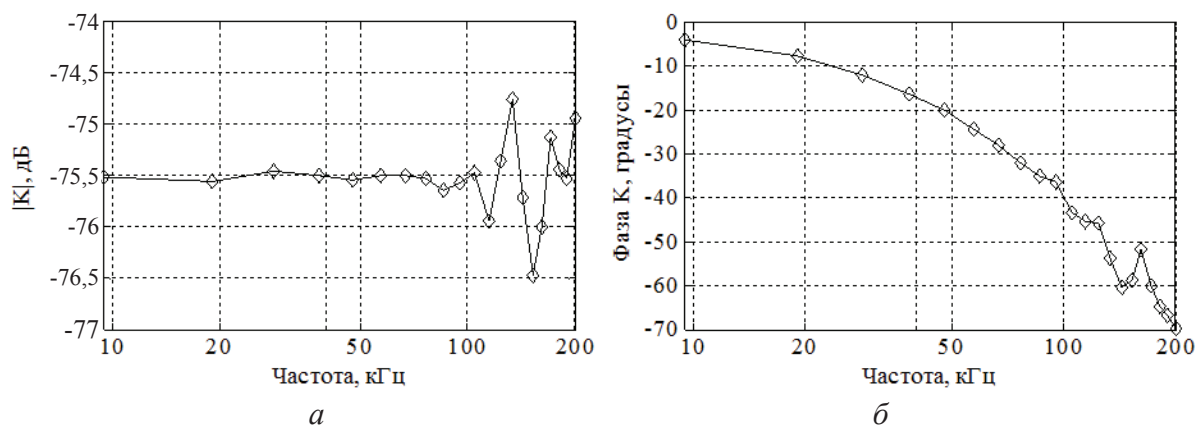


Рис. 4. Коэффициент передачи сильноточного шунта: а) АЧХ; б) ФЧХ

вляющий порядка $-75,5$ дБ. Кривая ФЧХ при этом имеет равномерный спад. Таким образом, шунт ведет себя как звено первого порядка. Заметим, что частотный диапазон исследуемого шунта не ограничивается значением 100 кГц. Однако с ростом частоты возрастает погрешность определения коэффициента передачи. На рис. 5 приведен результат расчета этой погрешности, выполненный по формуле (2).

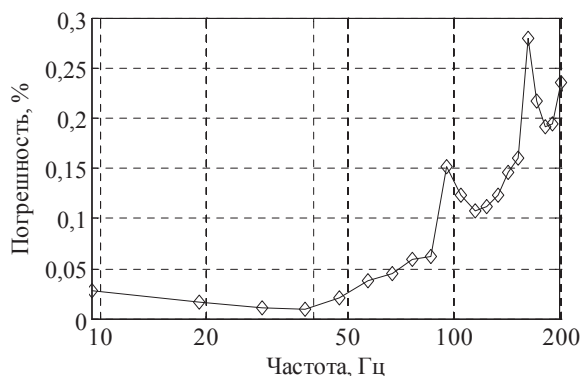


Рис. 5. Погрешность определения коэффициента передачи сильноточного шунта

Из расчета видно, что на частотах до 90 кГц погрешность не превышает 0,1 %. На более высоких частотах поведение шунта имеет сложный характер, не поддающийся описанию в рамках линейной модели, что и приводит к росту погрешности. Также рост погрешности при увеличении частоты связан с резонансными явлениями в соединительных проводах и шумами в использованном оборудовании. Измерения, проводимые на этих частотах, будут приводить к некорректным результатам. Таким образом, полученное значение частоты 100 кГц ограничивает полосу пропускания шунта

возможностью представления его линейной моделью.

Выводы

Экспериментально исследован метод определения амплитудно- и фазочастотной характеристик линейных электрических цепей. Применение метода для сильноточного токового шунта позволило определить его коэффициент передачи в диапазоне частот до 90 кГц с погрешностью не более 0,1 % при амплитуде зондирующего импульса тока порядка 3 кА. Предложенный метод не требует использования дорогостоящего оборудования для формирования гармонических или импульсных токов большой амплитуды, позволяет избежать необходимости измерения малых импедансов шунтов. Использование цифровой обработки позволяет существенно сократить трудоемкость определения метрологических характеристик сильноточного энергетического оборудования.

Исследования выполнены в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.» по теме: «Программно-аппаратный комплекс для автоматизированных испытаний сильноточных преобразователей» (Государственный контракт № 11.519.11.6026) и в соответствии с грантом НК 566П/13 по направлению «Создание электронной компонентной базы» в рамках мероприятия 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Работа поддержана также грантом РФФИ «Исследование динамического поведения коаксиальных токовых шунтов. Научный проект Карпенко Станислава Романовича из Украины, Государственное предприятие Укрметрестандарт, в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, г. Томск» № 12-08-90915-мол_снг_нр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
2. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalinova N.M. A computer system: measurement of welding surge currents // *Measurement and Control*. – 2009. – V. 42. – № 3. – P. 44–47.
3. Глебович Г.В., Андриянов В.А., Введенский Ю.В. и др. Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
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*. – Dubrovnik, Croatia, 2003, 22–27 June. – P. 586–589.
5. Заревич А.И., Муравьев С.В., Бедарева Е.В., Величко О.Н. Цифровая обработка импульсных сигналов для определения частотных характеристик преобразователей тока // *Известия Томского политехнического университета*. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 116–120.
6. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е изд.: Пер. с англ. Л.Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 720 с.
7. Бендат Дж.С., Пирсол А.Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
8. 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*. – Geneva, Switzerland, 2001, 26–27 April. 2001. URL: <http://mdk2001.web.cern.ch/mdk2001/Proceedings/SessionPoster/sessionpos.pdf> (дата обращения: 19.04.2012).

Поступила 12.09.2012 г.

УДК 621.317.727.1

МИНИМИЗАЦИЯ ЕМКОСТИ ДЕКАДЫ ИНДУКТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

А.И. Заревич, С.В. Муравьев

Томский политехнический университет
E-mail: antonzarevich@ngs.ru

Описаны способы снижения емкостной компоненты погрешности коэффициента деления индуктивного делителя напряжения, основанные на оптимизации конфигурации обмоток. С учётом физических свойств и размеров магнитопровода, а также требований к входному сигналу определено минимальное количество витков обмотки декады.

Ключевые слова:

Индуктивный делитель напряжения, межобмоточная емкость, погрешность измерения.

Key words:

Inductive voltage divider, interwinding capacitances, measurement errors.

Введение

Индуктивные делители напряжения (ИДН) предназначены для выполнения прецизионных масштабных линейных преобразований электрических сигналов. Они находят широкое применение во многих областях науки и техники [1]. Расширение частотного и динамического диапазонов является одной из наиболее важных задач, стоящих перед разработчиками ИДН и осложняется снижением точности коэффициента деления за счет различного рода погрешностей [2]. Существенный вклад в погрешность коэффициента деления вносят паразитные емкости. Они формируются, в первую очередь, из межвитковых емкостей обмоток, а также из емкостей между проводами обмоток, сердечниками и экранами.

Известно, для расширения динамического диапазона в низкочастотной области необходимо наращивание числа витков обмоток декад. Это обуславливает рост индуктивной составляющей входного импеданса и предотвращает насыщение материала сердечников. В то же время, увеличение разрядности ИДН реализуется за счет увеличения числа декад. Перечисленные факторы приводят к неизбежному технологическому возрастанию пара-

зитных емкостей, которые, в свою очередь, вносят существенный вклад в погрешность коэффициента передачи ИДН. Уменьшение данного вида погрешностей может быть достигнуто различными конструктивными путями, направленными на общее снижение емкости отдельно взятой декады делителя, что и является темой настоящей статьи.

Свойства магнитопроводов

Исследования авторов направлены на создание индуктивного делителя напряжения с расширенным динамическим и частотным диапазонами. Нижняя граница частотного диапазона разрабатываемого делителя не должна превышать 20 Гц, а действующее значение гармонического напряжения – 10 В.

Для обеспечения поставленных требований, в качестве материала для сердечников декад был выбран пермаллой ГМ-501 (ГАММАМЕТ® 501) [3]. Данный вид пермаллоя отличается высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание в широком диапазоне частот.

Использованные в исследовании сердечники изготовлены из ленты толщиной 25 мкм, и имели следующие размеры: внешний диаметр – 80 мм, внутренний диаметр – 50 мм и высота – 40 мм.