

ЧИСЛЕННАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ ПОЯСОМ РОГОВСКОГО

**Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., Г.С. Сериков, ассистент,
Е.А. Чаплыгин, ассистент, ХНАДУ**

***Аннотация.** Предложена и описана методика численной обработки результатов измерения импульсных токов поясом Rogovsky без применения интеграторов. Показано, что при измерении сигналов цифровыми осциллографами и дальнейшем численном преобразованием выходных сигналов, существенно расширяет возможности применения пояса Rogovsky без каких-либо дополнительных устройств, что, в свою очередь, позволяет определять параметры импульсных токов с любыми амплитудно-временными характеристиками.*

***Ключевые слова:** пояс Rogovsky, численная обработка результатов, измерение импульсных токов, эквивалентная индуктивность.*

ЧИСЕЛЬНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ ПОЯСОМ РОГОВСЬКОГО

**Ю.В. Батигін, професор, д.т.н., Г.С. Серіков, асистент,
Є.О. Чаплигін, асистент, ХНАДУ**

***Анотація.** Запропоновано й описано методику чисельної обробки результатів вимірювання імпульсних струмів поясом Rogovsky без застосування інтеграторів. Показано, що при вимірюванні сигналів цифровими осцилографами і подальше чисельне перетворення вихідних сигналів, істотно розширює можливості використання пояса Rogovsky без будь-яких додаткових пристроїв, що, у свою чергу, дозволяє визначати параметри імпульсних струмів із будь-якими амплітудно-часовими характеристиками.*

***Ключові слова:** пояс Rogovsky, чисельна обробка результатів, вимірювання імпульсних струмів, еквівалентна індуктивність.*

MEASURING RESULTS NUMERAL TREATMENT OF IMPULSIVE CURRENTS BY MEANS OF ROGOVSKY BELT APPLICATION

**U. Batygin, professor, dr. eng. sc., G. Serikov, assistant,
E. Chaplygin, assistant, KhNADU**

***Abstract.** The technique of numerical processing of measurement results of pulse currents by means of Rogovsky belt application is offered in the given work. It is shown that at measurement of signals by digital oscillographs and further numerical transformation of target signals, the possibilities of Rogovsky belt without the application of additional devices that in turn allows to define parameters of pulse currents with any peak-time characteristics essentially expand.*

***Key words:** Rogovsky belt, results numerical processing, pulse currents measuring, equivalent inductance.*

Введение

Пояс Роговского относится к измерительным устройствам индукционного типа, где между измеряемым сигналом и сигналом, его иден-

тифицирующим, имеет место исключительно электромагнитная связь. Конструктивно пояс Роговского представляет собой соленоид тороидальной геометрии, охватывающий проводник с измеряемым током. Напряже-

ние, снимаемое с выхода пояса, в соответствии с законом электромагнитной индукции, прямо пропорционально производной тока по времени. Для получения информации собственно об объекте измерения снимаемое напряжение следует проинтегрировать. Кроме того, определение абсолютных характеристик измеряемого сигнала требует обязательной калибровки пояса. В целом же, известная и достаточно хорошо апробированная методика обработки результатов измерений поясом Роговского предполагает использование аналоговых преобразователей индуцированных сигналов, точнее – интеграторов, с элементной базой на основе RC-цепочек [1].

Главным недостатком такого способа обработки выходных сигналов с пояса является ограниченность частотного диапазона, в пределах которого тот или иной интегратор может дать достоверную информацию о параметрах измеряемого тока. То есть идентификация токов с различными временными характеристиками возможна только с помощью разных интеграторов, обладающих соответствующими данными.

Появление цифровой измерительной техники позволяет существенно упростить процедуру обработки дифференциальных сигналов и повысить точность в определении параметров измеряемых токов.

Цель и постановка задачи

Цель настоящей работы – предложение и обоснование численной методики математической обработки цифровой информации с измерительных устройств индукционного типа, в частности с пояса Роговского, позволяющей определять параметры импульсных токов с любыми амплитудно-временными характеристиками.

Численная обработка результатов измерения поясом Роговского

Визуально предлагаемая методика иллюстрируется принципиальной схемой на рис. 1.

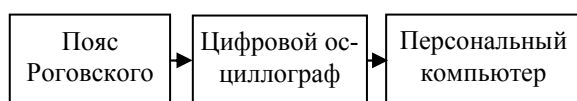


Рис. 1. Схема измерений с помощью цифрового осциллографа поясом Роговского

С пояса Роговского сигнал подаётся на вход цифрового осциллографа. Здесь производится его первоначальная обработка и представление в виде дискретного двумерного числового массива (время и напряжение). Далее сигнал в цифровом формате поступает на вход персонального компьютера, где с помощью известных стандартных математических программ производится его численное интегрирование.

Так же, как в случае аналоговых преобразователей индуцированных сигналов, для фиксации параметров импульсных токов в абсолютных величинах необходима калибровка пояса Роговского. Речь идёт об определении так называемой «эквивалентной индуктивности», представляющей собой коэффициент пропорциональности в связи между выходным напряжением и производной измеряемого тока. Фактически эта характеристика пояса устанавливается его геометрией, числом витков, размерами и др. Следует особо подчеркнуть, что определение «эквивалентной индуктивности» производится один раз. После чего все последующие измерения в любых временных диапазонах производятся с введением в расчёты этой характеристики данного образца пояса Роговского.

Для определения «эквивалентной индуктивности» в цепь, где течёт измеряемый ток и которую охватывает пояс Роговского, необходимо последовательно включить известное добавочное сопротивление. Сравнение численно проинтегрированного напряжения с пояса Роговского и сигнала с добавочного сопротивления даёт величину «эквивалентной индуктивности» как характеристики данного конкретного измерительного устройства.

Алгоритм численной обработки индуцированного сигнала в представленном виде вполне приемлем для весьма приближённой оценки амплитуд и временных характеристик. Как показала его практическая апробация, результат численного интегрирования напряжения в цифровом формате оказывается искажённым в сравнении с действительной картиной временной развёртки измеряемого тока.

В проведенных экспериментах источником импульсных сигналов служил низковольтный генератор, разработанный авторами ра-

боты [2]. В разрядную цепь генератора последовательно включалось сопротивление известной величины. Произвольный проводящий элемент разрядной цепи охватывался поясом Роговского.

Осциллограммы напряжения (1) с пояса и тока (2) с добавочного сопротивления приведены на рис. 2.

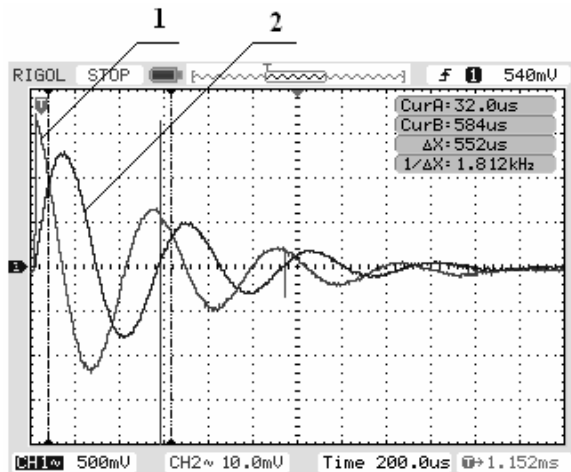


Рис. 2. Осциллограммы напряжения: 1 – с пояса Роговского, 2 – тока в добавочном сопротивлении

Сигналы с пояса и сопротивления в цифровом формате с осциллографа RIGOL DS1042CD поступали на вход персонального компьютера. Начальная часть напряжения с пояса интегрировалась. Напряжение с сопротивления делилось на его величину. Из равенства первых максимумов тока с пояса Роговского и тока в сопротивлении вычислялась «эквивалентная индуктивность». Далее, уже с учётом этой характеристики, производилось численное интегрирование всего сигнала с пояса Роговского.

Результат вычислений приведен на рис. 3.

Проанализируем полученный результат. Как следует из рис. 3, временная зависимость для тока оказывается «повернутой» вокруг точки начала отсчёта относительно горизонтальной оси на некоторый угол. Этот факт даёт основания полагать, что к истинной временной функции тока прибавляется или вычитается линейная функция времени, а к напряжению с пояса Роговского, соответственно, прибавляется или вычитается постоянная величина. К аналогичному выводу можно прийти, ана-

лизируя асимптотическое поведение функциональной зависимости на рис. 3 [3].

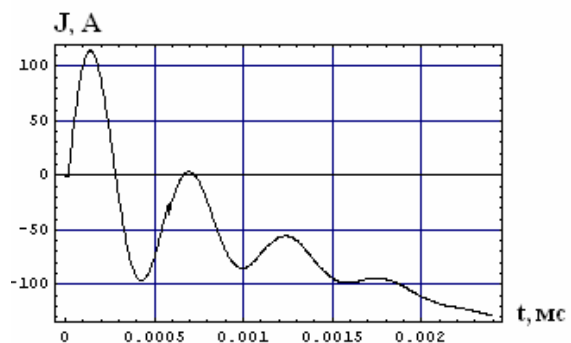


Рис. 3. Временная развёртка измеряемого тока, полученная численной обработкой напряжения с пояса Роговского в цифровом формате

Следует подчеркнуть, что визуально на осциллограмме напряжения данное искажение практически не заметно (рис. 2).

Не раскрывая физической сущности возможных причин отмеченного факта, можно считать, что количественно это искажение напряжения с пояса определяется некоторой интегральной константой, соответствующей усреднению по времени.

Тогда в линейном приближении напряжение с пояса Роговского можно представить суммой

$$U_{\text{осц}}(t) = U_{\text{сигн}}(t) + \Delta, \quad (1)$$

где $U_{\text{сигн}}(t)$ – не искажённый истинный сигнал; Δ – интегральная величина искажения напряжения с пояса.

Найдём Δ . Из закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея измеряемый ток связан с напряжением на выходе пояса Роговского хорошо известным соотношением

$$i(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t U_{\text{осц}}(t) \cdot dt, \quad (2)$$

где L – «эквивалентная индуктивность».

В соотношение (2) подставим сумму (1). Результат проинтегрируем по времени и разделим обе части полученного выражения на время t . Получим

$$\frac{\int_0^t U_{\text{осц}}(t)dt}{t} = \left[\frac{\int_0^t U_{\text{сигн}}(t)dt}{t} + \Delta \right]. \quad (3)$$

Первое алгебраическое слагаемое в квадратных скобках выражения (3) – это измеряемый ток, делённый на время.

Для достаточно больших значений временной переменной очевидно, что

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t U_{\text{сигн}}(t)dt}{t} \rightarrow 0. \quad (4)$$

С учётом (4) из выражения (3) находим искомую интегральную характеристику искажений измеряемого сигнала.

$$\Delta \approx \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\int_0^t U_{\text{осц}}(t) \cdot dt}{t}. \quad (5)$$

Отметим, что результат (5) согласуется с зависимостью для углового коэффициента асимптоты функции $\int_0^t U_{\text{осц}}(t) \cdot dt$.

Предлагаемая методика численной обработки сигнала с пояса Роговского с устранением погрешности в измерении выходного напряжения была апробирована на практике.

Калибровка пояса проводилась с помощью низковольтного генератора импульсных токов [2]. Для ряда частот $f \approx 1,9 - 44$ кГц теперь уже с учётом поправки $-\Delta$ определялась «эквивалентная индуктивность» $-L$.

Следует отметить, что её значения для достаточно высоких частот и амплитуд токовых импульсов довольно строго повторяли друг друга. При понижении рабочих частот падала амплитуда токов (данный факт обусловлен конструктивными особенностями генератора), возрастал относительный уровень высокочастотных помех, изменялись величины «эквивалентной индуктивности». Адекватная величина $-L$ определялась как среднее для всех рабочих частот.

Учёт поправки Δ , вычисленной в цифровом формате с помощью зависимости (5), и уточнённой величины «эквивалентной индуктивности» $-\bar{L}$ позволил скорректировать временную развёртку плотности токового импульса на рис. 3. Результат – на рис. 4.

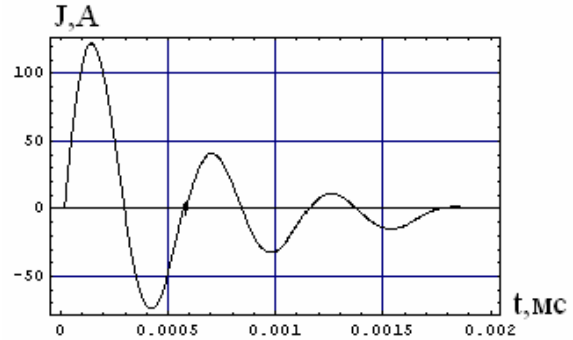


Рис. 4. Временная развёртка плотности токового импульса

Сравнение кривых на этих рисунках показывает, что учёт поправки на искажение сигнала с пояса, действительно, позволяет получить истинную временную зависимость для измеряемого тока.

Что касается погрешности результатов интегрирования, которая может определяться как расхождение между током, идентифицированным с помощью пояса, и током в известном активном сопротивлении, то отношения их максимумов в достаточно многочисленных контрольных экспериментах составляло не ниже $\sim 0,9 - 0,95$. Данные расхождения можно объяснить погрешностью в принятом алгоритме определения «эквивалентной индуктивности». Эта характеристика измерительного устройства находилась как среднестатистическое для выделенного диапазона рабочих частот. Но, как ранее было указано, при низких уровнях амплитуд контрольных сигналов значимыми становятся высокочастотные наводки. Они искажают напряжения с пояса и, соответственно, приводят к отклонениям в вычислении основной характеристики пояса Роговского.

Выводы

Предложена численная методика математической обработки цифровой информации с пояса Роговского, позволяющая определять параметры импульсных токов с любыми амплитудно-временными характеристиками.

Теоретически и экспериментально обоснован подход, позволяющий нивелировать искажения выходного напряжения с пояса Роговского и получать истинную временную развёртку и параметры измеряемых токов.

Предложенная численная методика приемлема для обработки сигналов с любых датчиков индукционного типа, применяемых, например, для измерения пространственно-временных распределений характеристик электромагнитного поля.

Литература

1. Окунь И.З. Измерение разрядных токов поясами Роговского / И.З. Окунь // Приборы и техника эксперимента. – М.: АН СССР. – 1968. – №6. – С. 20–126.
2. Гойхман М.Б. Влияние дисперсии на работу пояса Роговского в короткоимпульсном режиме / М.Б. Гойхман, В.В. Кладухин, Н.Ф. Ковалев // Журнал технической физики. – СПб: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. – 2005. – Вып. №9. – С. 117–122.
3. Бондаренко А.Ю. Низковольтный генератор импульсов тока широкого частотного диапазона для физического моделирования / А.Ю. Бондаренко, Г.С. Сериков, Е.А. Чаплыгин // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2007. – №6. – С. 66–69.
4. Справочник по математике для научных работников и инженеров [авт. сост. Г. Корн, Т. Корн]. – М.: Лань, 2003. – 832 с.

Рецензент: А.И. Пятак, профессор, д.ф.-м.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2009 г.
