

Для контроля водородного показателя растворов использовался ФЭМ, к которому через входной усилитель НР 4502С был подключен электрод-зонд. Контроль водородного показателя растворов производился в диапазоне от 0 до 12 ед. рН. На рисунке 6 представлен фрагмент информационного окна ЭРД в режиме контроля водородного показателя растворов.

Разработанная БСКП может быть использована как для промышленного применения, так и для выполнении физических и химических экспериментов в научных и учебных лабораториях. Прикладное ПО обеспечивает математическую обработку полученных данных и их отображение на экране планшетного компьютера или смартфона числовом и графическом виде. Предложенное

техническое решение повышает наглядность выполнения экспериментов, предоставляет дополнительные возможности по автоматической обработке данных и анализу полученных результатов.

Литература

1. Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А. Информационно-измерительная система на базе цифровых функциональных электронных модулей // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение 2018 г. Минск 14–16 ноября 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С 17–19.

2. Крюков В.В. Информационно-измерительные системы / В.В. Крюков. – Владивосток: ВГУЭС, 2000. – 102 с.

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Зеленко В.В., Исаев А.В., Суходолов Ю.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Носителем информации о значениях физических величин в пределах измерительной системы являются сигналы. Точность измерений зависит от объекта измерений, способов измерений, аппарата обработки и анализа результатов, стабильной работы генераторов измерительных сигналов.

Широкое применение в качестве измерительных сигналов получили периодические последовательности прямоугольных импульсов, которые, исходя их практики, можно считать квазипериодическими, у которых период или другие параметры могут изменяться и варьироваться вокруг их средних значений.

Трудность обеспечения стабильной работы генерирующей аппаратуры связана со случайными изменениями параметров измерительных сигналов с течением времени в некоторых пределах. Вариации параметров сигналов генераторов в дальнейшем могут привести к неточностям при анализе выходных сигналов, снимаемых с объектов измерений. Так, при испытаниях обмоток статоров асинхронных электродвигателей на витковые замыкания применение в качестве тестовых сигналов периодических последовательностей прямоугольных импульсов позволяет получить высокую чувствительность при контроле и создать максимальные испытательные напряжения в обмотке. Тестовые сигналы подаются на вывод обмотки и корпус магнитопровода. Выходным сигналом является напряжение на контролируемой обмотке. Фронтом импульса возбуждаются высокочастотные колебания, протекающие с двумя частотами – сначала с f_2 , а далее до затухания

с f_1 . Точность контроля достигается путем обеспечения максимальной чувствительности к витковому замыканию в обмотке статора и минимальной чувствительности к технологическим разбросам параметров обмотки и нестабильности параметров тестовых сигналов генераторов.

Оценить изменения параметров тестовых сигналов можно во временной области визуально при помощи осциллографов и в частотной области проведя анализ спектрального состава сигнала с помощью спектрометров.

Большинство методов, применяемых при измерении временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов связаны с измерениями во временных областях, при этом точность измерений в некоторых случаях не достаточно для решения технических задач. Так, например, сложно оценить результат измерений изменений временных параметров сигналов за малый промежуток времени, величина которого не превышает порога дискретизации цифровых устройств измерения.

При таких условиях возникает необходимость в разработке методов для учета и измерения случайных изменений временных интервалов между периодическими последовательностями импульсов путем анализа в частотной области, что позволит повысить точность оценки их изменения во времени.

Измерить временные интервалы можно применив осциллографические и электронно-счетные методы. К осциллографическим методам измерения относятся методы с линейной или спиральной разверткой. Такие методы визуализи-

зируют результат измерения, но не позволяют регистрировать малые изменения временных интервалов. К электронно-счетным методам измерения относятся: метод последовательного счета, метод преобразования время-амплитуда, метод задержанных совпадений и метод преобразования масштаба времени (цифровой метод). К существенными недостаткам электронно-счетных методов можно отнести сложность измерения временных интервалов, меньших чем период квантования, сложность регистрации малых изменений временных интервалов, инерционность измерительных систем

В большинстве рассмотренных методов измерения временных интервалов в качестве тестовых сигналов используются импульсы прямоугольной формы. Однако на практике, из-за особенностей работы генерирующей аппаратуры, измерительные импульсы имеют фронты ненулевой длительности. Наличие этих фронтов снижает точность при измерениях и вносит погрешности, значения которых может достигать большой величины, в условиях, если длительность фронта импульса соизмерима с длиной измеряемого временного интервала. Очевидно, что для уменьшения погрешности измерений необходимо учитывать эту особенность и рассматривать при расчетах измерительные импульсы в общем случае как импульсы трапецеидальной формы. При этом, трапецеидальный импульс может быть представлен как результирующая сумма задержанных и урезанных по времени прямоугольных, треугольных или синусоидальных импульсов. Изменение угла наклона фронтов трапецеидальных импульсов, позволяет получить импульсы треугольной и прямоугольной формы, а изменение кривизны фронтов – импульсы синусоидальной и другой формы. Спектры таких сигналов имеют схожую структуру.

Результаты спектрального анализа рассмотренных сигналов позволяют применить единый математический аппарат для их исследования на основе выражений, описывающих периодические последовательности трапецеидальных импульсов.

Для определения времени задержки между двумя импульсными последовательностями предлагается использовать параметры спектра суммы этих сигналов. С использованием выражений [1] амплитуды спектральных компонент суммарного спектра двух задержанных последовательностей трапецеидальных импульсов можно рассчитать по формуле:

$$|A_n| = \frac{2A_m T}{\pi^2 n^2 t_\delta} \left| \sin\left(\frac{\pi n t_\delta}{T}\right) \right| \cos\frac{\pi n t_\zeta}{T} \left| \sin\frac{\pi n(\tau - t_\delta)}{T} \right|, \quad (1)$$

где $|A_n|$ – модуль амплитуды спектральной компоненты с номером n ; A_m – амплитуда сигнала; T – период следования трапецеидальных им-

пульсов; τ – длительность импульса; t_ζ – время задержки между двумя последовательностями трапецеидальных импульсов; t_δ – длительности переднего и заднего фронтов, в том случае, если они одинаковые.

Формула (1) показывает, что степень изменений отдельных спектральных компонент зависит от времени задержки между импульсными последовательностями t_ζ . Изменяя параметры T , τ , t_δ можно определить компоненты, чувствительность которых к изменению t_ζ будет максимальной, а к изменениям параметров импульсов, обусловленным нестабильностью генерирования, – минимальной [2].

Поиск спектральных компонент, имеющих максимальную чувствительность к изменениям измеряемого параметра и минимальную чувствительность к изменениям за счет нестабильной работы генераторов, позволит обеспечить возможность учета влияния дестабилизирующих факторов, обусловленных нестабильностью работы элементов измерительных систем. Определение номера спектральной компоненты сигнала, наиболее чувствительной к изменению контролируемого параметра, предусматривает исследование его спектра путем анализа частных производных выражения для расчета амплитуд его частотных составляющих [3]:

$$\Delta A_{nT} = \frac{d|A_n|}{dT} \Delta T + \frac{d|A_n|}{d\tau} \Delta \tau + \frac{d|A_n|}{dt_\delta} \Delta t_\delta + \frac{d|A_n|}{dt_\zeta} \Delta t_\zeta, \quad (2)$$

Где ΔT , $\Delta \tau$, Δt_δ – изменения параметров испытательных сигналов (T , τ , t_δ) за счет нестабильной работы генераторов, Δt_ζ – определяемое изменение времени задержки t_ζ . Первые три слагаемые формулы (2) являются абсолютной погрешностью при измерении информативного параметра сигнала Δt_ζ . Нахождение областей спектров, имеющих одновременно минимальную чувствительность к изменениям T , τ , t_δ и максимальную чувствительность к изменению t_ζ позволит устранить дестабилизирующих факторов за счет нестабильной работы генераторов при измерении.

Составив систему уравнений частных производных спектра суммы двух задержанных последовательностей трапецеидальных импульсов и построив графики зависимостей частных производных от номера спектральной компоненты спектра сигнала можно определить, что экстремумы функций производных $\frac{d|A_n|}{dT} \Delta T$,

$$\frac{d|A_n|}{d\tau} \Delta \tau, \frac{d|A_n|}{dt_\delta} \Delta t_\delta, \frac{d|A_n|}{dt_\zeta} \Delta t_\zeta \text{ не совпадают.}$$

Анализ системы уравнений производных спектров суммарного сигнала и графиков зависимостей частных производных позволит найти компоненты с одновременной максимальной чувствительностью к изменениям полезного сигнала и минимальной к нестабильности генерирующей аппаратуры.

Такой математический метод может быть применен на практике при испытаниях обмоток электродвигателей на витковые замыкания. С учетом того, что крутые фронты прямоугольных импульсов могут создать перенапряжения в обмотках и возможен пробой исправной изоляции, в дальнейшем, тестовые сигналы прямоугольной формы при испытаниях целесообразнее заменить на сигналы трапецидальной формы.

Рассматриваемый подход, основанный на спектральном анализе динамических свойств спектра суммы двух периодических последовательностей трапецидальных импульсов позволит повысить точность измерения временных интервалов между последовательностями импульсов путем определения погрешностей, обусловленных нестабильностью генерирования, и их ослабления.

Литература

1. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Физматлит, 1962. 236 с.
2. Глинченко, А.С. Исследование случайных погрешностей спектрально-веса измерения параметров сигналов / А.С. Глинченко, В.А. Комаров, О.А. Тронин // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 1. – С. 7–11.

УДК 53.082.5

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙКИ ДИСКРЕТНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИИ ядерных проблем БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Получение цифровых изображений в различных областях спектра с высоким спектральным (гиперспектральным) разрешением имеет важное значение для решения широкого класса задач в лесном и сельском хозяйстве, аэрофотогеодезии, геологических изысканиях, мониторинге природной среды и оценке биологических рисков, энергетике, биомедицине [1]. Оперативность получения таких данных во многих случаях связана с необходимостью получения гиперспектральных изображений в полевых условиях, включая возможность осуществления воздушной разведки и мониторинга местности с небольших беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – гексакоптеров, квадрокоптеров, БПЛА самолетного типа.

Большинство современных гиперспектрометров основано на применении дисперсионных элементов, таких как дифракционные решетки с необходимостью сканирования изображений целевой диафрагмой [2]. Широкий спектральный диапазон и высокое разрешение спектрометров данного типа делают их незаменимым инструментом в задачах космических исследований Земли [1], в высокоточных лабораторных исследованиях. Вместе с тем достаточно большие весо-габаритные характеристики, сложность юстировки и калибровки существенно затрудняют их применение для решения множества прикладных задач в полевых условиях, требующих более компактных приборов.

К классу таких компактных приборов можно отнести современные мультиспектральные цифровые камеры, которые представляют собой

комбинацию нескольких цифровых камер в одном корпусе с индивидуальными объективами и ПЗС-матрицами. Каждая из камер работает в своей спектральной полосе. Число спектральных каналов мультиспектральной камеры, как правило, не превышает 6. Например, камера Parrot Seguoia [3] работает на 4-х длинах волн: 550 нм, 660 нм, 735 нм, 790 нм с полосами пропускания 40 нм, 40 нм, 10 нм, 40 нм, соответственно; MAPIR Kernel 4 CameraArray – 4 канала, MAPIR Kernel 6 CameraArray – 6 каналов.

Недостаточное количество спектральных каналов и широкая полоса пропускания таких камер препятствуют их применению для гиперспектрального анализа изображений. Например, согласно [1], для гиперспектрального анализа изображений такие спектрометры должны иметь не менее 20 спектральных каналов с полосой пропускания не более 10–15 нм.

Перспективным направлением обеспечения компактности спектрометров изображений (изображающих спектрометров) с гиперспектральным разрешением является разработка спектрометров на основе линеек интерференционных перестраиваемых дискретных фильтров (LinearVariable Filters (LVF)) [4–7].

В настоящее время выпускается широкая номенклатура LVF с различными размерами, спектральным диапазоном и разрешением (производители Edmund Optics, Ocean Optics, Изовак Технологии и др.). Полоса пропускания таких LVF линейно изменяется в широком спектральном диапазоне с заданной дискретностью по одной из координат x или y , преимущественно по x – ко-