УДК 621.315.62

СЕРДЮК Т. Н. – к.т.н., доцент (ДНУЖТ)
ШВЕЦ А. В. – д.ф.-м.н., с.н.с. (ИРФЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины)
ИВАНОВ В. К. – д.ф.-м.н., профессор (ИРФЭ им. А. Я. Усикова НАН Украины)

ВЫДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ МОЩНЫХ ПОМЕХ ОТ СИЛОВЫХ СЕТЕЙ

Введение

Изолятор – это один из наиболее ответственных, но и один из самых ненадежных элементов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). При наличии запаса по электрической прочности, полное повреждение одного из изоляторов в гирлянде может не вызывать сразу нарушения нормальной работы ЛЭП. Однако постепенное накопление дефектных изоляторов ведет к перекрытиям, особенно в грозовой период.

Различные процессы, связанные с ухудшением состояния изоляции и появлением диагностических признаков, исследованы ведущими организациями в этой отрасли. В качестве одной из основных причин, приводящих со временем к разрушению изолятора, рассматривается явление частичных разрядов (ЧР), происходящих во внутренних полостях фарфоровых или стеклянных изоляторов.

Для предотвращения опасных ситуаций в работе ЛЭП разработаны мероприятия по проведению контроля состояния изоляции. В последнее время большое распространение получили дистанционные методы. В настоящее время для контроля изоляции высоковольтных устройств используются три основных метода: инфракрасный; электронно-оптический (по ультрафиолетовому излучению); ультразвуковой. Первые два из этих методов наиболее точны и информативны, однако эффективность их применения существенно зависит от погодных условий и времени суток, что делает практически невозможным поиск неисправностей при солнечном освещении. Ультразвуковые методы свободны от данных недостатков, однако, дистанция обнаружения неисправностей для всех перечисленных методов ограничена несколькими десятками метров, что требует обхода (облета) ЛЭП в непосредственной близости от опор воздушных линий.

Следует отметить, что метод инспекции ЛЭП, основанный на измерении радиопомех, используется для обнаружения повреждений на линиях, однако, вследствие использования высокочастотных диапазонов дальность действия его также ограничена.

Представляет интерес использование радиоизлучения в диапазоне сверхнизких частот, который соответствует максимальной спектральной плотности излучения короны, а также частичных разрядов в изоляторах. Проблема использования данного диапазона частот связана, прежде всего, с высоким уровнем излучения ЛЭП на основной частоте (50 Гц) и на высших гармониках, а также помех от атмосферного электричества.

Целью работы является разработка методики компенсации мощных узкополосных гармоник, излучаемых силовыми сетями, для применения в компьютеризованной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах линий электропередач.

Методика выделения и компенсации мощных помех при измерениях в силовой сети

Задача сбора и анализа широкополосных сигналов возникает во многих областях науки и техники, при этом измерения часто должны проводиться в полевых условиях. К системе сбора и обработки данных предъявляются такие требования как компактность, универсальность и способность работы в условиях повышенного уровня индустриальных помех. Наиболее мощными помехами, как правило, являются гармоники силовой сети 50 Гц, существенно ограничивающие

динамический диапазон исследуемых сигналов. Использование режекторных фильтров, настроенных на фиксированные частоты, бывает неэффективным даже при небольших флуктуациях частоты сети. Проблема обычно решается путем использования синхронных фильтров с фазовой автоподстройкой частоты режекции [1-3], которые обеспечивают подавление как основной, так и высших гармоник, излучаемых силовой сетью. Однако немалые размеры и сложность настройки синхронных фильтров ограничивают их применение в портативных системах сбора данных.

В настоящей работе описана система сбора с высоким разрешением, охватывающая динамический диапазон, как помехи, так и сигнала, что позволяет осуществлять фильтрацию полностью в цифровой форме и, таким образом, свести к минимуму использование аналоговых компонентов в приемно-регистрирующем устройстве.

Методика предназначена для применения в компьютеризованной системе обнаружения и регистрации импульсных сигналов, связанных с частичными или коронными разрядами в изоляторах ЛЭП. Алгоритм компенсации узкополосной помехи состоит в следующем: по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды в окрестности частоты помехи; вычисляются точные значения частоты фазы и амплитуды сигнала помехи; формируется сигнал компенсации, который вычитается из исходного сигнала. Необходимо отметить, что данная методика позволяет определить параметры помехи с точностью, превышающей частотное разрешение дискретного спектра, определяемого длительностью анализируемой реализации сигнала и частотой дискретизации. Данное обстоятельство является ключевым для успешной работы методики в случае, когда частота помехи не совпадает с одним из дискретных отсчетов спектра.

В качестве модели узкополосной помехи используется монохроматический сигнал $s(t) = a\cos(\omega_0 t + \varphi)$, умноженный на прямоугольное временное окно, охватывающее интервал $0\ldots T$. Спектр такого сигнала описывается формулой

$$S(\omega) = \frac{aT}{2}\left[\frac{\sin(\omega-\omega_0)\frac{T}{2}}{(\omega-\omega_0)\frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega-\omega_0)\frac{T}{2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{\sin(\omega+\omega_0)\frac{T}{2}}{(\omega+\omega_0)\frac{T}{2}} \times e^{i\varphi} \times e^{-i(\omega+\omega_0)\frac{T}{2}}\right], \quad (1)$$

Он содержит два пика на частотах $\pm\omega_0$, ширина которых определяется количеством периодов высокочастотного заполнения, попадающих в интервал $0\ldots T$. При переходе к дискретному спектру ширина этих пиков будет зависеть еще и от соотношения между длительностью реализации и периодом высокочастотного заполнения. Если в течении времени T попадает целое количество периодов, то за счет периодичности в спектре получаются бесконечно узкие линии на участках высокочастотного заполнения (рис.1). Величина дробной части δ, являющейся остатком деления интервала T на период высокочастотного заполнения $t_0 = 2\pi/\omega_0$, определяет ширину пиков и появление «крыльев», которые при значительной амплитуде узкополосного сигнала могут существенно исказить форму спектра в достаточно удаленной

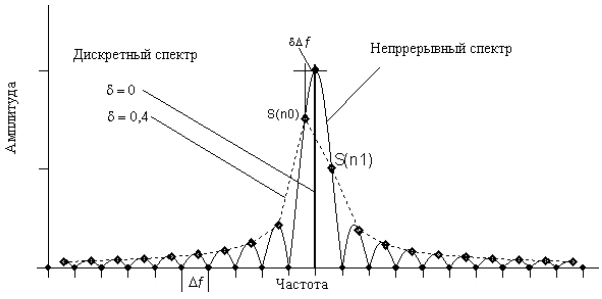

Рис. 1. Формирование дискретного спектра синусоидального сигнала, ограниченного во времени, при дробном и целом соотношениях между длительностью реализации и периодом сигнала

области частот. Так, при δ=0 частота сигнала совпадает с дискретным отсчетом в спектре, а при дробном значении, например δ = 0,4, частота сигнала находится в промежутке между соседними отсчетами в спектре - точки $S(n_0)$ и $S(n_1)$. В дискретном представлении (1) имеет следующий вид:

$$S(n)=\frac{aT}{2}\left(\frac{\sin\pi(n-n_0-\delta)}{\pi(n-n_0-\delta)}e^{i\varphi}e^{i\pi(n-n_0-\delta)}+\right.$$

$$\left.+\frac{\sin\pi(n+n_0+\delta)}{\pi(n+n_0+\delta)}e^{-i\varphi}e^{i\pi(n+n_0+\delta)}\right), \quad (2)$$

где n – текущий отсчет в дискретном спектре, n_0 – результат целочисленного деления ω_0 на величину $2\pi\Delta f$ ($\Delta f = 1/T$ – частотное разрешение спектра).

Учитывая только положительные частоты и делая элементарные преобразования, получим следующее выражение для спектральной плотности:

$$S(n)\cong\frac{aT}{2}e^{i(\pi\delta+\varphi)}\frac{\sin\pi\delta}{\pi(n-n_0-\delta)} \quad (3)$$

Для компенсации сигнала помехи необходимо определить точные значения его частоты ω_0, фазы φ и амплитуды α, что выполняется путем определения параметров двух отсчетов в дискретном спектре в окрестности частоты помехи на основе выражения (3).

Алгоритм компенсации узкополосных помех состоит в следующем:

1) по спектру сигнала определяются два максимальных значения амплитуды $S(n_0)$ и $S(n_1)$ в окрестности частоты помехи;

2) определяются параметры сигнала помехи по следующим формулам, полученным из (3):

$$\delta=\frac{|S(n_1)|}{|S(n_0)|+|S(n_1)|},\ \omega_0=2\pi\Delta f(n_0+\delta),$$

$$\varphi=\arg S(n_0)-\pi\delta,$$

$$a=\frac{2}{T}\left[|S(n_0)|+|S(n_1)|\right]\cdot\frac{\pi\delta(1-\delta)}{\sin\pi\delta}, \quad (4)$$

3) формируется сигнал компенсации $s(k)=a\cos\left(\frac{\omega_0}{f_s}k+\varphi\right)$, который затем вычитается из исходного сигнала (f_s – частота дискретизации).

Компьютеризованная система обнаружения и регистрации импульсных сигналов

Предлагается создание мобильного комплекса для измерения низкочастотных импульсных помех от высоковольтных сетей вызванных коронными или частичными разрядами. Мобильный комплекс предназначен для использования во время проведения периодического осмотра технического состояния подвесных изоляторов с проведением измерений при обходе высоковольтных воздушных линий.

Комплекс для обнаружения и регистрации импульсных сигналов включает в себя набор датчиков для измерения низкочастотного магнитного и электрического поля (индукционные датчики с ферромагнитным сердечником и штыревая антенна), многоканальный аналого-цифровой преобразователь и компьютер для накопления и обработки данных.

Для предотвращения проникновения внешних наводок, характерных для встраиваемых систем, и для достижения универсальности был создан отдельный блок аналого-цифрового и цифроаналогового преобразования АЦП/ЦАП, управляемый из компьютера через стандартный интерфейс (коммуникационный порт). Таким образом, построение системы сбора данных свелось к комбинации датчиков измеряемых сигналов, симметричной проводной линии связи, выносного блока АЦП/ЦАП и внешнего компьютера с комплексом программ для управления приемом и передачей данных через последовательный порт и обработки и накопления принимаемых данных.

Выносной блок АЦП/ЦАП (рис.2) включает в себя: четыре АЦП; ЦАП разрядностью 10 бит, применяемый для калибровки приемной аппаратуры; микропроцессорный блок управления АЦП/ЦАП с интерфейсом RS-232; программное обеспечение для микроконтроллера, обеспечивающее инициализацию, получение данных от АЦП, передачу данных на ЦАП, связь с внешним компьютером.

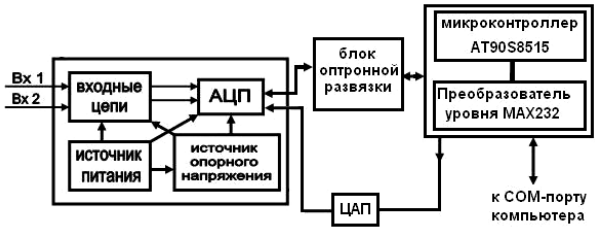

Рис. 2. Структурная схема измерения и компенсации мощных помех в силовых сетях

Конструктивно устройство состоит из шести плат 65×75мм, сочлененных гибкими соединителями: четыре платы АЦП, плата ЦАП и плата управления/согласования. Сборка из четырех плат АЦП помещена в экран из пермаллоевой фольги. Вся система размещена в пластиковом корпусе 200×90×48 мм. В корпус вмонтирован 9-штырьковый разъем последовательного интерфейса, входной разъем для аналоговых сигналов, разъем и тумблер питания.

Для получения высокой разрядности применен аналого-цифровой преобразователь AD7714 со встроенным шестиканальным мультиплексором. В качестве буферного каскада, в котором измеряемый входной диапазон регистратора (дифференциальный сигнал амплитудой 10 В) перестраивается во входной диапазон АЦП (+0,6…-1,85 В), применен инструментальный усилитель AD623. Смещение диапазона сигнала производится с помощью резистивного делителя на входе усилителя. Питание каждой сборки АЦП (0…+5 В) с входными каскадами производится от своего прецизионного источника питания. Так как для AD7714 необходим внешний источник опорного напряжения (1,25 В), мы использовали источник ADR291R, для уменьшения помех расположенный в непосредственной близости от AD7714.

Управление модулями АЦП и ЦАП, а также их сопряжение с внешним компьютером производится с помощью микроконтроллера AT90S8515 со встроенным контролером последовательного интерфейса (UART) и преобразователя уровня TTL/RS-232 (MAX232). Через последовательный синхронный канал связи (стандарт SPI) микроконтроллер управляет работой и принимает данные от АЦП, передает данные на ЦАП. Для обеспечения синхронности получаемых по всем каналам отсчетов обращение ко всем модулям преобразователей производится одновременно.

Алгоритм работы устройства состоит в следующем. При включении питания выполняется внутренняя калибровка АЦП, микроконтроллер инициализирует АЦП на автоматический перезапуск, устанавливает скорость 150 преобразований/с и подключает первый канал входного мультиплексора в каждом из модулей АЦП. После прихода сигнала окончания преобразования из первого модуля АЦП схема управления считывает данные из буферных регистров всех АЦП во внутреннюю память микроконтроллера. Затем из полученных данных формируется шестнадцатибайтовая посылка, которая со скоростью 115200 бод передается через последовательный интерфейс в компьютер [4]. В каждый байт посылки включен признак канала: число в двух старших битах соответствует номеру модуля АЦП, с которого получены данные.

Для управления устройством предусмотрены следующие возможности: выбор скорости преобразования из набора 10; 25; 50; 75; 100; 150; 171,4286; 250 Гц; установка номера опрашиваемого канала (0,1); установка напряжения на выходе ЦАП; перезапуск и синхронизация АЦП.

Управление осуществляется подачей управляющего слова из компьютера в дуплексном режиме.

Испытания устройства сбора данных проводились с помощью программы, разработанной для регистрации спектров низкочастотных сигналов [2,3] и адаптированной для приема данных через последовательный порт. Спектры шумов, усредненных в течение 5 мин по реализациям длиной 2048 точек (что соответствует 12 с), при частоте дискретизации 171 Гц и приведенных к входам по двум каналам АЦП, показаны на рис. 2.

Можно видеть, что спектр шума практически постоянен в области от 0 до ~25 Гц и далее равномерно нарастает с частотой. Характер измеренных спектров объясняется наличием двух источников шума. Во-первых, это частотно-независимые собст-

венные шумы модулятора АЦП, которые преобладают в области нижних частот. С повышением частоты увеличиваются и становятся преобладающими шумы квантования в используемых микросхемах сигма-дельта АЦП [5]. В спектрах также присутствует ряд узкополосных пиков, связанных, по-видимому, с проникновением сигналов кварцевых тактовых генераторов АЦП, незначительно различающихся по частоте (пики в районе 80 Гц), а также других цифровых сигналов (пики в низкочастотной области спектров).

Результаты сравнения шумовых параметров, полученных в разработанной системе сбора данных для различных скоростей преобразования, с анонсированными параметрами микросхемы AD7714 [5] приведены в таблице.

Из результатов проведенного анализа следует, что при низких частотах дискретизации шумы в 2–3 раза превышают анонсированные данные, тогда как для частот выше 50 Гц наблюдается достаточно хорошее совпадение шумовых параметров системы с параметрами использованных микросхем АЦП.

Результаты исследования измерительной компьютеризированной системы

Описанное в предыдущем разделе устройство сбора аналоговых данных было использовано в системе регистрации естественного электромагнитного поля в диапазоне сверхнизких частот (с.н.ч.) – Шумановских резонансов. Шумановские резонансы несут информацию как о свойствах полости, образованной поверхностью Земли и нижней кромкой ионосферы, так и об источниках с.н.ч.-излучения – молниях, и представляют интерес как индикатор глобальных изменений окружающей среды [6,7].Задача измерения Шумановских резонансов включает две стороны, отражающие спектральное и временное представления сигналов. Это накопление средних спектров фонового сигнала, формируемого совокупностью молниевых разрядов, происходящих на Земле, и выделение всплесков с.н.ч. – сигналов, порождаемых дальними сверхмощными молниями и превышающих амплитуду фона в 3–10 раз. Одной из основных помех для измерений является излучение гармоник силовой сети 50, 100 Гц и т.д., амплитуда которых превышает уровень естественного сигнала на 40…70 дБ.

Таблица 1

Анализ эффективности использования микросхемы AD7714 на различных скоростях преобразования сигнала

Частота дискретизации, Гц	Характеристики AD7714		Результаты измерений	
	Эффективное разрешение, бит	Среднеквадратичное отклонение шумов, бит (мкВ)	Среднеквадратичное отклонение шумов, бит	Максимальный размах напряжения шума, бит
10	21.5	6 (0.78)	17	110
25	21	9 (1.1)	21	115
50	20	16 (2.06)	20	130
75			34	230
100	18.5	46 (5.9)	44	290
150			151	930
171			230	1335
250	15.5	453 (58)	396	2619

При таком соотношении уровней полезного сигнала и сигнала помехи даже при использовании АЦП высокой разрядности «крылья» от сигнала узкополосных помех могут существенно исказить спектр измеряемого сигнала. Данная ситуация продемонстрирована на рис.3, на котором приведены спектры с применением компенсации сигналов частотой 50 Гц (график выполнен сплошной жирной линией) и без нее (график выполнен штрихом). По оси ординат отложена вертикальная составляющая электрического поля Земли. Измерение горизонтальной компоненты электрического поля не выполнялось, поскольку ее значения малы в сравнении с вертикальной.

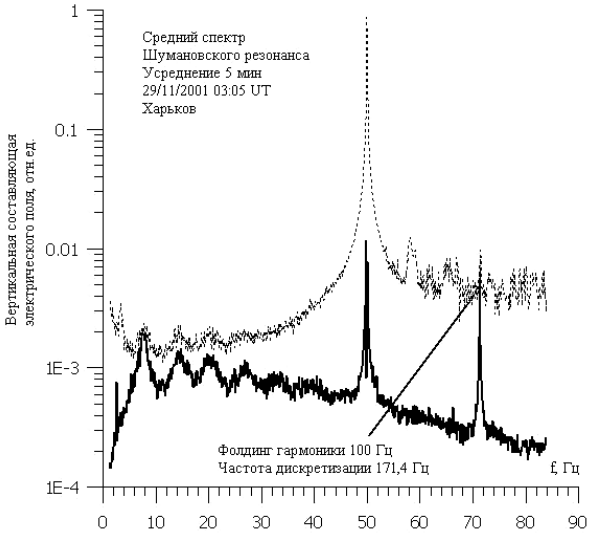

Рис. 3. Результаты спектрального анализа сигнала Шумановского резонанса с использованием компенсации помехи частотой 50 Гц и без нее

Из рис. 3 видно, что на частоте 71,4 Гц наблюдается фолдинг сигнала помехи частотой 100 Гц – перенос (зеркальное отображение) сигналов частотой большей половины частоты дискретизации 85,7 Гц. Резонансные пики на частотах 8, 14, 20, 26, 32, 39 Гц представляют собой Шумановские резонансы.

Эффект использования предложенной методики компенсации для выделения импульсных сигналов (всплесков с.н.ч.) на фоне узкополосных помех представлен на рис.4. Как можно видеть, эффективность подавления достаточно высока при условии неизменности параметров помех на интервале анализируемых временных реализаций.

К недостатку методики можно отнести ее чувствительность к скачкам фазы и амплитуды сигнала помехи.

Данная проблема может быть сведена к минимуму путем разбиения полного интервала на более короткие участки и последующего выполнения компенсации для каждого из них.

Следует отметить, что преимущество предложенной компенсационной методики фильтрации заключается в отсутствии искажений спектров, получаемых вследствие их умножения на соответствующие передаточные характеристики при использовании традиционных фильтров, а также ее применимость для выделения сигналов, как во временной, так и в частотной области.

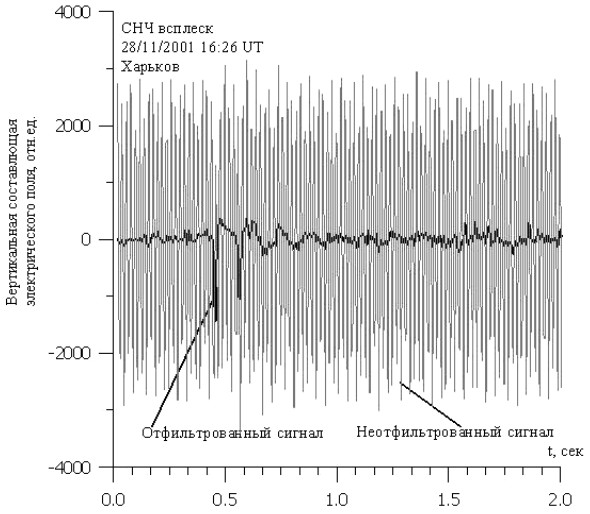

Рис. 4. Выделение импульсного сигнала на фоне сильной сетевой узкополосной помехи

Выводы

В заключение перечислим основные результаты работы.

Разработана мобильная многоканальная система автоматизированного сбора и анализа низкочастотных импульсных сигналов при наличии в нем мощных узкополосных помех.

Разработан компенсационный алгоритм фильтрации узкополосных помех, позволяющий устранить влияние их «крыльев» на форму спектров анализируемых слабых сигналов, а также выделять импульсные сигналы во временной области. Фильтрация узкополосных помех основана на использовании АЦП с высоким разрешением, позволяющего охватить динамический диапазон сигнала и помехи.

Работа системы продемонстрирована на примере регистрации естественных электромагнитных импульсных сигналов, возбуждаемых совокупностью происходящих на Земле молний, в полости Земля-ионосфера в диапазоне сверхнизких частот (Шумановских резонансов).

Разработанная методика реализована и протестирована в системе сбора данных естественных радиоизлучений в диапазоне сверхнизких частот. Измерения проводились с помощью датчиков вертикального электрического поля и датчиков горизонтальных

магнитных компонент в полевых условиях. Применение методики позволило накопить банки данных импульсных сигналов естественного происхождения в условиях мощных узкополосных помех от окружающих пункт наблюдений воздушных линий электропередач.

Библиографический список

1. Щекотов, А. Ю. Следящий режекторный фильтр на частоту сети и ее гармоники [Текст] / А. Ю. Щекотов, А. М. Голявин // Приборы и техника эксперимента. – 1978. – № 4. – С. 175.

2. Наблюдения за движением мировой грозовой активности по анализу трехкомпонентных измерений Шумановских резонансов [Текст] / Г. Г. Беляев и др. // Радиофизика и электроника. – 1999. – Т. 4. – № 1. – С. 63.

3. Schumann resonance observed live the Poynting vector spectra [Текст] / G. G. Belyaev and itc. // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. – 1999. – V. 61. – P. 751.

4. Новиков, Ю. В. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC [Текст] / Ю. В. Новиков, О. А. Калашников, С. Е. Гуляев – М.: Эком, 1997. – 215 с.

5. 1999 Design – In Reference Manual [Текст] / Analog Device Inc. – USA., 1999. – 11 p.

6. Блиох, П. В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера. [Текст] / П. В. Блиох, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. – Киев: Наукова думка, 1977. – 200 с.

7. Williams, E. R. The Schumann Resonance: A global tropical thermometer [Текст] / E. R. Williams. – Science, 1992. –V.256. – P. 1184-1187

Ключевые слова: мощные узкополосные гармоники, спектр сигнала, амплитуда помехи.

Ключові слова: потужних вузькосмугових гармонік, спектр сигналу, амплітуда завади.

Key words: powerful narrow-band harmonics, spectrum of the signal, amplitude of the interference.

Поступила в редколлегию 4.11.2010.
Принята к печати 9.11.2010