ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

WAVELET TRANSFORM MATH BASE APPLICATION IN POWER QUALITY ANALYZERS

Суднова В.В. (V. Sudnova), к.т.н., ст. научн. сотр., **Пригода В.П. (V. Prigoda)**, к.т.н., доцент

В конце прошлого столетия искажения синусоидальности кривых напряжения и тока на шинах подстанций вызывались в основном высоковольтной и низковольтной промышленной нагрузкой (тиристорные преобразователи для электропривода постоянного тока, преобразователи частоты, дуговые сталеплавильные печи, сварочные агрегаты и т.п.), единичная мощность которых могла достигать десятков и сотен мегаватт. Эта электрическая нагрузка генерирует, как правило, канонические стационарные гармоники, набор которых четко предопределен.

Форма искаженной синусоиды напряжения в этом случае имеет периодический, стационарный и стабильный характер в течение длительного времени (минуты, часы). Для анализа таких несинусоидальных режимов достаточно применения классического дискретного преобразования Фурье (для заданного количества отсчетов за один период) с дальнейшим обобщением результатов на определенный промежуток времени.

В настоящее время, время IT-технологий, характер электрических нагрузок изменился кардинально: персональные компьютеры (ПК-нагрузки), файл-серверы, мониторы, лазерные принтеры, компьютерные блоки бесперебойного питания (ИБП-UPS), системы охлаждения и подогрева, газоразрядные лампы и другие нелинейные электроприемники.

В системах электроснабжения медицинских учреждений, зданий холдингов, корпораций, компаний и.т.д. широко применяются силовые источники бесперебойного питания (ИБП).

Указанные нелинейные электроприемники имеют, как правило, вентильные выпрямители и инверторы, встроенные импульсные источники питания (ИИП) с широтноимпульсной модуляцией (ШИМ), генерирующие высшие гармоники.

Мы столкнулась с новой серьезной проблемой — электрические сети в вышеуказанными электроприемниками перенасыщены высшими гармоническими составляющими.

Из-за наличия очень большого количества (десятки тысяч) таких нелинейных электроприемников, локализованных в конкретной электрической сети, и в силу их случайного режима работы, искажения синусоидальности кривой напряжения в лучшем случае носят периодический, но нестационарный характер с ярко выраженной сингулярностью в пределах более одного периода основной частоты (рис. 1). Стационарным называется сигнал, частотное наполнение которого, не изменяется во времени.

В худшем случае сингулярность проявляется в пределах одного периода, тогда несинусодальность является непериодической и нестационарной (рис. 2).

В последнем случае корректнее говорить не об искаженной синусоиде напряжения, а о сигнале напряжения — более сложной и емкой по смыслу и форме функции отображения информации.

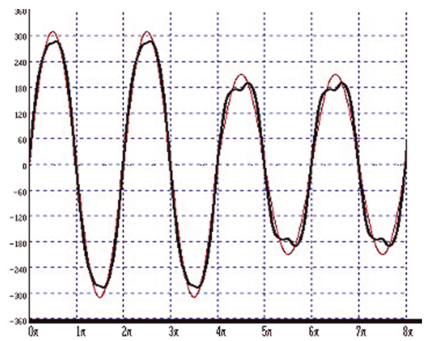

Рис. 1. Периодическая полисингулярная кривая напряжения

Сигнал (в общем смысле слова) — это информационная функция, несущая сообщение о физических свойствах, состоянии или поведении какой-либо физической системы, объекта или среды. В нашем случае системой, объектом или средой является электрическая сеть, а информационной функцией — напряжение или ток в сети.

Цель обработки сигналов — извлечение определенных информационных сведений, которые отображены в этих сигналах и преобразование этих сведений в форму, удобную для восприятия и дальнейшего использования.

Нестационарность и непериодичность сигнала означают, что сигнал содержит помимо гармонических составляющих также интергармонические и субгармонические составляющие.

По аналогии с порядком кратности основных гармоник, порядок интергармонической частоты, не кратной частоте питающей сети, определяется по отношению к основной частоте. Если это отношение меньше единицы, то такую гармоническую частоту называют субгармонической. В соответствии с рекомендацией МЭК порядок интергармонических частот обозначается буквой «m» (МЭК 61000-2-2).

Причины появления интергармоник заключаются в следующем.

Во-первых, это переходные режимы, сопровождающиеся модуляцией токов и напряжений в электрической сети. Эти возмущения носят случайный характер и зависят от характера электрических нагрузок.

Во-вторых, асинхронное переключение (т.е. несинхронизированное с частотой питания) полупроводниковых устройств статических преобразователей. Типичным примером являются преобразователи частоты и устройства с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Производимые ими интергармоники можно обнаружить практически в любой части спектра питания.

Ранее было принято считать, что амплитуда интергармоник, как правило, не превышает 0,5% от значения амплитуды основной частоты, поэтому этим гармоникам не предавалось особое внимание [1].

Но в условиях резонанса могут возникать и большие значения. Например, как показывают последние исследования, при работе трехфазно-однофазного мостового 6-ти пульсного непосредственного преобразователя частоты при линейном законе регулирования, уровень интергармоник в потребляемом токе может превосходить уровень гармоник в 12 раз [3].

Следует отметить, что основной целью измерителей ПКЭ в аспекте несинусоидальности является спектральный анализ. Спектральная (частотная) форма представления сигналов использует разложение сигнальных функций на периодические составляющие.

Одним из основных средств цифровой обработки сигналов является линейное преобразование. Линейное преобразование сигнала подразумевает свертку сигнала конечной длины с семейством базисных функций.

Основным инструментом при исследовании сигналов такого рода являются метод, базирующийся на преобразованиях Фурье (ПФ, Fourier transform) на базе тригонометрических функций $f(x)=\exp(-j2\pi\omega t)=\cos(2\pi\omega t)+j\cdot\sin(2\pi\omega t)$.

Преобразование сигнала по Фурье подразумевает свертку сигнала с семейством базисных тригонометрических функций.

Свертка означает перемножение функции исследуемого сигнала и базисной функции для каждой гармоники $\{\sin(\omega t), \cos(\omega t), \sin(2\omega t), \cos(2\omega t),\ldots, \sin(n\omega t), \cos(n\omega t)\}$ (см. выражения 5, 6).

Непрерывное преобразование Фурье (НПФ) декомпозирует сигнал на комплексные экспоненциальные функции различных частот. Процесс декомпозиции задается двумя равенствами прямого и обратного преобразований:

$$X(f)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t)\cdot e^{-j2\pi\omega t}dt$$

$$x(t)=\int_{-\infty}^{\infty}X(f)\cdot e^{-j2\pi\omega t}df\ .$$

С НПФ удобно работать теоретически, на практике обычно работают с дискретными данными.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ, DFT) использует дискретные сигналы, которые определяются в дискретные моменты времени $t_k=\Delta t\cdot k$ и представляются последовательностями чисел $x(t_k)\equiv x_k$.

Действительно, программа записанная в ПЗУ прибора, регистрирующего ПКЭ, или компьютерная программа обработки данных в программном обеспечении (ПО), обслуживающая прибор, способны обрабатывать только цифровые сигналы — дискретные во времени и квантованные по уровню. Поэтому аналоговый сигнал подвергается аналого-цифровому преобразованию в АЦП прибора.

Затем с сигналом в цифровой форме производятся все необходимые операции, в частности, спектральный анализ, причем вместо обычного спектрального преобразования производится ДПФ. Непрерывное время и непрерывная частота представляются дискретными величинами, а непрерывное интегрирование заменяется дискретным суммированием.

В соответствии с теоремой Котельникова-Шеннона строго оговаривается минимальное количество отсчетов, чтобы можно было эффективно использовать обратное преобразование, т.е. получить исходный сигнал.

Суть теоремы Котельникова — Шеннона (Найквиста — Котельникова) заключается в следующем. Сигнал, представленный последовательностью дискретных отсчетов, можно вновь преобразовать в исходный (непрерывный) вид без потери информации только в том случае, если интервал межу соседними отсчетами не превышает половины периода самого высокочастотного колебания, содержащегося в спектре сигнала.

В ГОСТ 13109-97 максимальная учитываемая гармоника — 40-я. Следовательно, интервал между соседними отсчетами не должен превышать $\Delta t=1/(2\cdot f\cdot n)=1/(2\cdot 50\cdot 40)=0{,}00025$ с. Это соответствует $N_{min}=0{,}02/0{,}00025=80$ отсчетам за период. Очевидно, что 40-я гармоника не самая высокая частота, которая может появиться в измеряемом сигнале.

Основные отечественные приборы — измерители ПКЭ: РЕСУРС-UF2, РЕСУРС-ПКЭ, «Энергомонитор 3.3», регистратор (Парма РК 3.01), анализаторы ЭРИС — КЭ.-02, ППКЭ-3-50.М, АПКЭ-1, прибор Прорыв-КЭ производят минимум 256 отсчетов за период основной частоты.

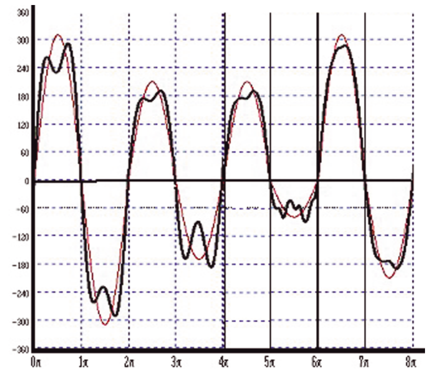

Рис. 2. Непериодическая полисингулярная кривая напряжения

Например, при числе отсчетов 512 за период номер максимальной фиксируемой гармоники будет равен $n=N/0{,}02\cdot 2\cdot f=512/0{,}02\cdot 2\cdot 50=256$.

Однако на практике ДПФ используется мало, т.к. для вычисления дискретного преобразования Фурье из последовательности в N элементов (отсчетов) требуется выполнить N^2 операций с комплексными (действительными) числами. Если длины обрабатываемых массивов цифровых отсчетов имеют порядок тысячи и более, то использовать эти алгоритмы дискретного спектрального анализа затруднительно (особенно в реальном времени).

Выходом из положения явился алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT). Значительно сократить число выполняемых операций здесь удается за счет того, что обработка входного массива сводится к нахождению ДПФ-массивов с меньшим числом элементов. Принцип алгоритма БПФ основательно изложен в [2]. Для метода БПФ существенно, что число отсчетов должно составлять целую степень двойки ($N=2^p$, где p — целое число). Это обусловлено тем, что одной из операций, входящей в алгоритм БПФ, является последовательное деление интервала вычисления ДПФ на две части. Поэтому точное вычисление БПФ возможно лишь в случае, когда число отсчетов в сигнале равно 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, и т. д. Если данное условие не выполняется, приходится дополнять сигнал некоторым количеством отсчетов, имеющих нулевое значение.

Приближенно можно считать, что объем вычислений по алгоритму БПФ пропорционален произведению $N\cdot\log_2 N$, где N — количество отсчетов сигнала. Допустим, что сигнал за период представлен 512-ю отсчетами. Тогда для алгоритма БПФ количество операций в процессоре составит $n=512\cdot\log_2(512)= =512\cdot 4{,}5=2304$, а для алгоритма ДПФ — $n=512_2=262144$. То есть время анализа несинусоидального режима в БПФ уменьшается в 262144/2304=114 раз.

Это очень важно, так как интервал усреднения коэффициентов гармонических составляющих по ГОСТ 13109-97 должен составлять 3 секунды. При использовании ДПФ в это время можно и не уложиться.

Общий недостаток классического ДПФ — преобразованию может быть подвергнута только периодическая функция (сигнал) заданная на интервале одного периода.

Необходимо отметить, что в ряд Фурье может разлагаться и произвольная непериодическая функция, заданная (ограниченная, вырезанная из другого сигнала, и т.п.) на некотором интервале (t_1,t_2), если нас не интересует ее поведение за пределами данного интервала. Но, следует помнить, что применение формул (5-7) для такой «вырезанной» функции автоматически означает периодическое продолжение данной функции за пределами заданного интервала (в обе стороны от него) с периодом $T=t_1-t_2$. Однако при этом на краях интервала может возникнуть явление Гиббса, если уровень сигнала на краях не совпадает, и образуются скачки сигнала при его периодическом повторении. Эффект Гиббса проявляется в виде «паразитных» характерных колебаний реконструированной функции (полученной в процессе обратного преобразования) в области точки разрыва исходной функции (обрыв ряда).

(Продолжение следует)

At application of wavelet transformation the wavelet width in tens times is less than width of one period of the basic frequency and meaningly changes with the purpose of revealing the smallest non-stationaries and huge advantage of this mathematical method actually consists in it.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

WAVELET TRANSFORM MATH BASE APPLICATION IN POWER QUALITY ANALYZERS

Суднова В.В. (V. Sudnova), к.т.н., ст. научн. сотр., **Пригода В.П. (V. Prigoda)**, к.т.н., доц., «НТЦ Тест-Электро»

(Окончание, начало см. № 3-2009)

Таким образом, с позиции проведения анализа произвольных сигналов и функций в частотной области и точного восстановления после преобразований можно отметить ряд недостатков ДПФ (БПФ) в целом.

1. Ограниченная информативность анализа нестационарных сигналов и практически полное отсутствие возможностей анализа их особенностей (сингулярностей), т.к. они не различает появление частот в разные моменты времени. Например, АЧХ для стационарного сигнала, являющегося суммой двух синусоид с разными частотами и существующих в одно и то же время (параллельная сумма) и для сигнала, являющегося суммой тех же синусоид, существующих в разное время, поочередно, (последовательная сумма), будет одинаковой.

2. Преобразование Фурье отображает глобальные сведения о частотах исследуемого сигнала, поскольку базисные функции преобразования определены на достаточно большом временном интервале и не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава. Классическое преобразование Фурье в принципе не имеет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени.

3. Возникновение эффекта Гиббса.

Частичным выходом из этой ситуации является так называемое оконное преобразование Фурье (ОПФ, STFT) с движущейся по сигналу оконной функцией.

ОПФ основывается на том, что нестационарный сигнал представляется в виде кусочно-стационарного сигнала. Причем, если участок стационарности очень мал, используется окно, достаточно узкое для того, чтобы сигнал внутри него выглядел стационарным. При ОПФ сигнал делится на отрезки («окна»), в пределах которых его можно считать стационарным.

Для этого к сигналу применяется оконная математическая функция w, ширина которой должна быть равной ширине окна. Далее осуществляется перемножение функций окна и сигнала, то есть происходит свертка сигнала по функции w, которая называется базисом.

$$X(\omega,b_k)=\int_t x(t)\cdot w(t-b_k)\cdot e^{-j\omega t}dt\ , \quad (3)$$

где x(t) — исходный сигнал, w(t) — оконная функция. Как видно из выражения, ОПФ есть не что иное, как ПФ произведения сигнала и оконной функции.

Функция w(t–b) представляет собой функцию окна сдвига преобразования по координате t, где параметром b задаются фиксированные значения сдвига. При сдвиге окон с равномерным шагом $b_k=k\Delta b$.

В итоге мы получаем частотно-временное представление сигнала. Таким образом, ОПФ есть ни что иное, как ПФ сигнала умноженного на оконную функцию.

Однако у ОПФ тоже есть весьма существенный недостаток. Проблема ОПФ связана с шириной использующейся оконной функции. При ОПФ окно имеет конечную длину, накрывает только часть сигнала, поэтому и частотное разрешение ухудшается. Под ухудшением понимается то, что теперь неизвестны точно присутствующие в сигнале частоты, а только полосы частот.

Чем уже окно, тем лучше временное разрешение, но хуже частотное и наоборот. В данном случае проявляется принцип неопределенности Гейзенберга, который гласит, что нельзя одновременно измерить частоту и время с произвольно высокой точностью. Кроме того, чем уже окно, тем более справедливыми становятся предположения о стационарности сигнала в пределах окна. Окно приходится выбирать для анализа всего сигнала, тогда как разные его участки могут требовать применения разных окон.

Таким образом, многие трудности, возникающие при анализе сигналов с помощью преобразований Фурье, связаны с тем, что реальные сигналы бывает трудно с достаточной точностью описать при помощи взвешенной суммы синусоид различных частот.

Общий недостаток всех видов преобразования Фурье — неразличимость интергармоник. В таблице 1 представлены результаты расчета в среде MathCad с использованием непрерывного преобразования Фурье (НПФ) тестового сигнала, содержащего первую гармонику с амплитудой равной десяти и вторую гармонику с амплитудой равной единице. В таблице n — кратность гармоники (интергармоники), a — значение коэффициента преобразования при действительной части, b — значение коэффициента преобразования при мнимой части, комплексный коэффициент, c — амплитуда гармоники, φ — фаза гармоники (интергармоники). Как следует из таблицы 1, преобразование неверно обнаруживает несуществующие интергармоники и правильно выделяет 1-ю и 2-ю гармоники.

Таблица 1

	0	1	2	3	4	5	6
n	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2
b	0	-4.829	-5.436	-2.893	-0.403	0	-1.097
a	10.005	6.647	1.766	-0.94	-0.555	1.001	1.51
c	10.005	8.216	5.716	3.042	0.686	1.001	1.866
φ	0	-0.628	-1.257	1.257	0.628	0	-0.628

Альтернативным математическим аппаратом преобразования сложных сигналов является вейвлет-преобразование (wavelet transform) — относительно новое и мощное средство анализа и обработки сигналов. Это частотно-временное преобразование, позволяющее осуществить локализацию сигнала, как по частоте, так и по времени.

Вейвлет-преобразование имеет преимущество перед скользящим спектром Фурье с оконной функцией, заключающееся в том, что при изменении масштаба времени в случае вейвлет-преобразования сохраняется постоянная разрешающая способность, используется прежний объем данных и, например, при увеличении масштаба времени мелкие детали поведения сигнала автоматически становятся несущественными.

Но самое главное, вейвлет-преобразование позволяет обработать сигнал любой сложности. Скользящий спектр Фурье, наоборот, не различает локальных и глобальных свойств сигнала, не дает возможности выделить или исключить характерные свойства нестационарных сигналов.

Вейвлет (wavelet — маленькая волна) — это математическая функция, которая является новым базисом при свертке сигнала. Этот базис координально отличается от синусоидальных базисных функций Фурье. В качестве примера, на рисунке 4 представлен вейвлет Морле.

Вейвлет Морле описывается уравнением

$$\Psi(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{(t-b)^2}{2\cdot a^2}}\cdot e^{j2\pi\frac{(t-b)}{a}}, \quad (4)$$

где a — масштаб (сжатие, растяжение), b — временное смещение по сигналу.

Этот вейвлет представляет собой плоскую волну, модулированную гауссианной и дает результаты, наиболее согласованные с терминами Фурье-анализа. В частности понятие масштаба a полностью соответствует периоду гармонических компонентов. Большие значения a соответствуют низким частотам, а малые — высоким.

Если говорить более корректно, вейвлеты — это обобщенное название базисных функций определенной формы, локализованных по оси аргументов (независимых переменных), инвариантных к сдвигу и линейных к операции масштабирования (сжатия/растяжения), имеющих вид коротких волновых пакетов с нулевым интегральным значением.

Метод вейвлет-анализа заключается в разложении исходного сигнала по базисным функциям, полученным из исходного прототипа («материнский вейвлет») путем сжатий, растяжений и сдвигов по времени.

Как следует из рисунка 3, вейвлеты быстро спадают до нуля за пределами некоторого конечного интервала времени в отличие, например, от бесконечно осциллирующих синусоид, по которым сигнал раскладывается в рамках традиционного анализа Фурье. Компактность вейвлетов позволяет осуществить локальный анализ сигналов и проследить изменчивость их частотно-масштабных характеристик.

Непрерывное вейвлет-преобразование W(a,b) сигнала s(x) представляет собой скалярное произведение s(x) и базисных функций Ψ(x):

$$W(a,b)=\int_{-\infty}^{\infty}s(t)\cdot\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{\frac{(t-b)^2}{2\cdot a^2}}\cdot e^{-j2\pi\frac{(t-b)}{a}}, \quad (5)$$

Вейвлет-преобразование происходит следующим образом. Сначала вдоль сигнала перемещается «материнский» вейвлет, т.е. изменяется параметр b при неизменном параметре a. Производятся отсчеты s(x) и выполняются расчеты по (5) в дискретном виде (интеграл заменяется суммой от 1 до N). Далее, «материнский» вейвлет расширяется или сжимается (изменение масштаба) и проходит сигнал еще раз. В зависимости от количества проходов мы будем иметь более или менее точную картину исследуемого сигнала.

Результатом вейвлет-преобразования будет матрица размером NxM, где N — число смещений вейвлет-функции, а M — число изменений масштаба.

Если в ходе преобразования эти параметры изменяются в достаточных пределах и с достаточной точностью, вейвлет-коэффициенты заключают в себе полную информацию об исходном сигнале.

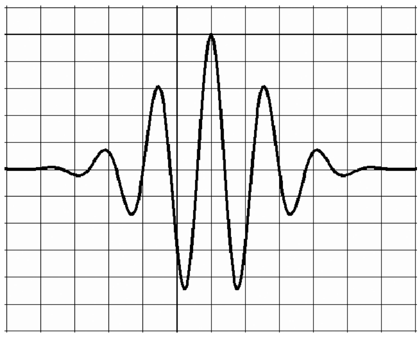

Рис. 3. Вейвлет Морле

Основная глобальная задача при применении вейвлет-анализа для исследования несинусоидальности напряжений и токов при оценке ПКЭ заключается в том, что получаемый вейвлет-спектр в классическом виде несопоставим с данными Фурье — преобразований.

При анализе сигналов для поставленных целей а, именно: расчет K_U и $K_{U(n)}$ с учетом субгармоник и интергармоник появляется задача идентификации частот гармонических составляющих.

Между процедурой вычисления комплексных гармоник Фурье и процедурой дилатации (сжатие или растяжение) материнской вейвлет-функции существует взаимосвязь, позволяющая установить количественное соотношение между комплексной частотой Фурье и масштабирующей переменной вейвлет-функции.

Таким образом, при программировании современных приборов (анализаторы, регистраторы), предназначенных для измерения ПКЭ в электрических сетях, предпочтительнее использовать вейвлет-преобразование, а не БПФ, так как только это преобразование позволяет оценить достоверно и с высокой точностью амплитудно-частотные и временные характеристики нестационарных сигналов.

В настоящее время разработан проект ГОСТ Р 51317.4.7-2008 (МЭК 61000-4-7:2002) [4], стандарт распространяется на средства измерений (СИ), предназначенные для измерений спектральных составляющих напряжения и тока в полосе частот до 9 кГц, которые наложены на основные составляющие в системах электроснабжения частотой 50 и 60 Гц и в проекте как ни странно «установлены характеристики СИ, основанные на использовании дискретного преобразования Фурье».

Очевидно, что следующее утверждение: «…не исключается применение СИ с измерительными окнами малой ширины (вплоть до одного периода), особенно в приборах низкой стоимости. Однако применение таких СИ для оценки соответствия нестационарных сигналов нормам эмиссии не допускается, так как оценка нестационарных сигналов не может быть проведена при малой ширине измерительного окна» касается только СИ использующих преобразование Фурье.

При применении вейвлет-преобразования ширина вейвлета в десятки раз меньше ширины одного периода основной частоты и сознательно изменяется с целью выявления мельчайших нестационарностей (сингулярностей), и в этом собственно заключается огромное преимущество этого математического метода.

В заключение следует отметить, что в этом же ГОСТе указано: «Однако это не исключает применения других принципов анализа, таких как применение цифровых фильтров, а также аналоговых анализаторов формы сигнала».

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Бараненко Т.К. Источники интергармоник в системах электроснабжения и методы их расчёта. «Промэлектро», №3, 2003, стр. 3-18.

2. Кривошеев И. В. Медведев С.Ю.. Цифровая обработка сигналов

3. Жежеленко И.В. Проблема электромагнитной совместимости и качества электрической энергии на предприятиях. Доклад на электроэнергетической конференции. МЭИ (ТУ), Москва, 2008 г.

4. ГОСТ Р 51317.4.7?2008 (МЭК 61000-4-7:2002). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электроснабжения и подключаемые к ним технические средства. Общее руководство по измерениям гармоник и интергармоник.

At application of wavelet transformation the wavelet width in tens times is less than width of one period of the basic frequency and meaningly changes with the purpose of revealing the smallest non-stationaries and huge advantage of this mathematical method actually consists in it.