

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ И ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ, ЛОКАЛИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ ИСКАЖЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОСТИ КРИВЫХ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Актуальность работы обусловлена необходимостью локализации и оценки искажения синусоидальности кривых тока и напряжения для выявления причинно-следственной связи появления искажений, правильной их оценки и определения источников гармонических искажений с целью эффективного проведения мероприятий по улучшению качества и надежности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: качество электроэнергии, гармоники, коэффициент гармоник, источник искажения, Быстрое Преобразование Фурье, Дискретное Преобразование Фурье.

Введение. Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения (СЭС), то есть к появлению гармоник тока и напряжения.

Воздействие гармоник чревато нарушением работы энергетического оборудования и вредным воздействием на электроприемники потребителя.

Последствия воздействия гармоник также зависят от источника гармоник, его расположения в СЭС и характеристик сети [1]. Одни и те же гармоники от различных источников могут производить различный эффект в зависимости от их фазового угла по отношению к основной гармонике [2].

Для эффективного проведения мероприятий по повышению качества электроэнергии необходима правильная оценка характеристик искажения, которая во многом зависит от применяемого метода гармонического анализа.

Анализ литературных источников. Классическим методом анализа качества электроэнергии, используемым в системах мониторинга качества электроэнергии, является Преобразование Фурье (ПФ) [3], в частности – Быстрое Преобразование Фурье (БПФ) [4]. В основе ПФ лежит представление сигнала, как суммы синусоид разной частоты. То есть, амплитудно-временное представление преобразуется в частотный спектр.

Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) обеспечивает частотный анализ дискретных периодических сигналов. Фундаментальное уравнение для N -точечного ПФ сигнала $x(n)$ выглядит следующим образом [5]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn},$$

где $k=0, 1, 2 \dots N-1$.

Для сигнала $x(n)$ при количестве выборок $N=2^L$ (L – целое число) применим алгоритм Быстрого Преобразования Фурье (БПФ), основная цель которого – ускоренное вычисления ДПФ путем сокращения требуемого числа операций умножения и сложения.

Преобразование Фурье дает частотную информацию о сигнале, то есть говорит нам о том, какое содержание каждой частоты в сигнале на исследуемом интервале измерения. Однако в какой момент времени возникла та или иная частота и когда она закончилась – на эти вопросы ответ получить не удастся [6]. Частичным выходом из этой ситуации является Оконное Преобразование Фурье (ОПФ) с движущейся по сигналу оконной функцией, имеющей компактный носитель. Для дискретного сигнала $x(n)$ уравнение ОПФ выглядит следующим образом [5]:

$$X(n, \lambda) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n+m) \omega(m) e^{-j\lambda m},$$

где $\omega(m)$ – оконная функция.

Главной проблемой в использовании оконного преобразования Фурье для получения частотно-временной характеристики сигнала является так называемый принцип неопределенности Гейзенберга

[7], который возникает для параметров времени и частоты сигнала. В его основе лежит тот факт, что невозможно сказать точно какая частота присутствует в сигнале в данный момент времени (можно говорить только про диапазон частот) и невозможно сказать в какой точно момент времени частота присутствует в сигнале (можно говорить лишь про период времени). Также для Оконного Преобразования Фурье характерен эффект расширения спектра сигнала.

Для снижения влияния принципа неопределенности Гейзенберга было создано вейвлет-преобразование. Уравнение непрерывного вейвлет-преобразования функции $f(t)$ имеет вид [6, 8]:

$$\hat{\psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt,$$

где τ - сдвиг по времени, s - масштаб, а ψ^* - материнский вейвлет.

Вейвлет-преобразование выполняется аналогично ОПФ – сигнал перемножается с движущейся по сигналу вейвлет-функцией также как и с оконной функцией при ОПФ. Но есть два отличия между ОПФ и вейвлет-преобразованием [6]:

1. Не выполняется ПФ взвешенного с вейвлет-функцией сигнала.
2. Ширина окна изменяется. Так что преобразование вычисляется для каждой спектральной компоненты, что является наиболее важным свойством вейвлет-преобразования.

Понятие вейвлета означает волну, которая проходит через сигнал и является окном некоторой ширины (масштаба) для некоторого местоположения во времени, в процессе интегрирования сигнала. Материнский вейвлет - это функция, которая является прототипом для всех окон, которые будут генерироваться во время вейвлет-преобразования. Сдвиг по времени регулирует движение генерированных окон по временной компоненте сигнала [8].

Понятие масштаба является обратным к понятию ширины окна. Чем меньше ширина окна, тем больше масштаб, то есть окно захватывает меньшую часть сигнала и сигнал интегрируется более детально. Чем больше ширина окна, тем меньший масштаб, то есть окно захватывает большую часть сигнала и сигнал, соответственно, интегрируется менее детально. Таким образом, вейвлет-преобразование, в отличие от ОПФ, которое имеет постоянный масштаб в любой момент времени для всех частот, имеет лучшее представление времени и худшее представление частоты на низких частотах сигнала и лучшее представление частоты с худшим представлением времени на высоких частотах сигнала. Из этого следует, что вейвлет преобразование дает возможность уменьшить влияние принципа неопределенности Гейзенберга на полученном частотно-временном представлении сигнала. С его помощью низкие частоты имеют более детальное представление относительно времени, а высокие - относительно частоты [8].

В последние годы появилось много работ по применению вейвлет-анализа для оценки качества электроэнергии [9-12]. Однако его использование сопряжено с определенными трудностями:

1. Зависимость результатов от выбора материнского вейвлета.
2. ПФ большинства вейвлет-функций, как правило, дает больше одной гармоники в спектре.
3. Сложность перехода от вейвлет-коэффициентов к гармоникам.

По анализу литературных источников можно сделать вывод, что на сегодняшний день для анализа гармонического состава кривых тока и напряжения применяется алгоритм БПФ, который не позволяет оценить и локализовать искажение, вносимое резкопеременной нелинейной нагрузкой. Применение вейвлет-преобразования для решения задач оценки качества электроэнергии затруднительно и пока находится на стадии исследований. Следовательно, задача выбора оптимального алгоритма для оценки и локализации искажения кривых тока и напряжения по-прежнему актуальна.

Цели и задачи исследования. Целью данной работы являются исследования методов гармонического анализа с целью локализации искажения и оценки его величины.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ особенностей ДПФ и БПФ;
- провести математические выкладки, обосновывающие возможность совместного использования БПФ и ДПФ;
- по результатам исследований сделать выводы.

Материал и результаты исследований. Особенностью БПФ является то, что с помощью этого преобразования вычисляются сразу все компоненты выходного спектра сигнала. В результате исходный сигнал $x(t)$ представляется, как сумма синусоид (гармоник) разной частоты:

$$x(t) = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n), \quad (1)$$

где A_1, A_2, \dots, A_n – амплитуды гармонических составляющих сигнала $x(t)$; ω – угловая частота; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – фаза гармонических составляющих сигнала; n – максимальный порядок гармоник.

Можно утверждать, что БПФ является индикатором наличия в сигнале на интервале измерения определенных гармонических составляющих.

Отличительной особенностью ДПФ по отношению к БПФ является возможность анализировать исходный сигнал по каждой гармонике отдельно [13].

Согласно [14], для систем электроснабжения частотой 50 Гц в качестве основного интервала времени при измерении показателей качества электроэнергии принимается интервал длительностью 10 периодов гармоники основной частоты.

С целью детализации частотного наполнения сигнала на интервале измерения проведем расчет точек спектра, полученных в результате БПФ, используя Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ) (рис.1).



Рисунок 1 – Усовершенствование метода гармонического анализа

Для этого необходимо умножить каждый период исходного сигнала (1) на основном интервале измерения на синусоиды и косинусоиды единичной амплитуды с частотами, полученными в результате БПФ сигнала, и проинтегрировать на интервале 2π .

Произведение синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 [15]:

$$\begin{aligned} A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) &= \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 t + \alpha_1 - n_2 t - \alpha_2) - \cos(n_1 t + \alpha_1 + n_2 t + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} \cos((n_1 - n_2)t + (\alpha_1 - \alpha_2)) - \frac{A_1}{2} \cos((n_1 + n_2)t + (\alpha_1 + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 - n_2)t \cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \sin(n_1 - n_2)t \sin(\alpha_1 - \alpha_2)) - \\ &- \frac{A_1}{2} (\cos(n_1 + n_2)t \cos(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin(n_1 + n_2)t \sin(\alpha_1 + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2)t - \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2)t - \\ &- \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2)t + \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2)t \end{aligned}$$

Неопределенный интеграл произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 [16]:

$$\begin{aligned} \int A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) dt &= \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \int \cos(n_1 - n_2) t dt - \\ &- \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \int \sin(n_1 - n_2) t dt - \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \int \cos(n_1 + n_2) t dt + \\ &+ \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \int \sin(n_1 + n_2) t dt = \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{1}{n_1 - n_2} \sin(n_1 - n_2) t - \\ &- \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \left(-\frac{1}{n_1 - n_2} \right) \cos(n_1 - n_2) t - \frac{A_1}{2} \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{1}{n_1 + n_2} \sin(n_1 + n_2) t + \\ &+ \frac{A_1}{2} \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \left(-\frac{1}{n_1 + n_2} \right) \cos(n_1 + n_2) t = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} + \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} \end{aligned}$$

Вычисление интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n_1 и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n_2 и фазой α_2 на интервале 2π производится по формуле Ньютона-Лейбница [17]:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} A_1 \sin(n_1 t + \alpha_1) \sin(n_2 t + \alpha_2) dt &= \left(\frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} + \right. \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) t}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} + \\ &+ \left. \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) t}{2(n_1 + n_2)} \right) \Bigg|_0^{2\pi} = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) 2\pi}{2(n_1 - n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) 2\pi}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) 2\pi}{2(n_1 + n_2)} + \\ &+ \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) 2\pi}{2(n_1 + n_2)} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \sin(n_1 - n_2) 0}{2(n_1 - n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2) \cos(n_1 - n_2) 0}{2(n_1 - n_2)} + \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \sin(n_1 + n_2) 0}{2(n_1 + n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \cos(n_1 + n_2) 0}{2(n_1 + n_2)} = \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{2(n_1 - n_2)} + \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2(n_1 + n_2)} - \\ &- \frac{A_1 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{2(n_1 - n_2)} - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2(n_1 + n_2)} = 0 \end{aligned}$$

Интегральная сумма произведения двух синусоид разной частоты на интервале, кратном 2π , равна нулю.

Произведение синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 (одинаковая частота) [15]:

$$\begin{aligned} A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) &= \frac{A_1}{2} (\cos(nt + \alpha_1 - nt - \alpha_2) - \cos(nt + \alpha_1 + nt + \alpha_2)) = \\ &= \frac{A_1}{2} (\cos(\alpha_1 - \alpha_2) - \cos(2nt + (\alpha_1 + \alpha_2))) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} - \\ &- \frac{A_1}{2} (\cos 2nt \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - \sin 2nt \cos(\alpha_1 + \alpha_2)) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} - \\ &- \frac{A_1 \cos 2nt \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} + \frac{A_1 \sin 2nt \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \end{aligned}$$

Неопределенный интеграл произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 (одинаковая частота) [16]:

$$\int A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) dt = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \int dt - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \int \cos 2nt dt +$$

$$+ \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \int \sin 2nt dt = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \left(\frac{1}{2n} \sin 2nt \right) +$$

$$+ \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \left(-\frac{1}{2n} \cos 2nt \right) = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin 2nt}{4n} -$$

$$- \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos 2nt}{4n}$$

Интегральная сумма произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой α_2 на интервале 2π (одинаковая частота) по формуле Ньютона-Лейбница [17]:

$$\int_0^{2\pi} A_1 \sin(nt + \alpha_1) \sin(nt + \alpha_2) = \left(\frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} t - \frac{A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \sin 2nt}{4n} - \right.$$

$$\left. - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \cos 2nt}{4n} \right) \Big|_0^{2\pi} = \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} 2\pi - A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\sin 2n2\pi}{4n} -$$

$$- A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\cos 2n2\pi}{4n} - \frac{A_1 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} 0 + A_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\sin 2n0}{4n} +$$

$$+ A_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) \frac{\cos 2n0}{4n} = A_1 \pi \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Для случаев $\alpha_2=0$ и $\alpha_2=\pi/2$ получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} A_1 \pi \cos(\alpha_1 - 0) = a \\ A_1 \pi \cos(\alpha_1 - \frac{\pi}{2}) = b \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} A_1 \pi \cos \alpha_1 = a \\ A_1 \pi \sin \alpha_1 = b \end{cases}$$

где a – значение интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой $\alpha_2=0$ на интервале 2π ; b – значение интегральной суммы произведения синусоиды с амплитудой A_1 , частотой n и фазой α_1 на синусоиду единичной амплитуды с частотой n и фазой $\alpha_2=\pi/2$ на интервале 2π .

В результате для каждой гармонической составляющей на l -м периоде основного интервала измерения получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} A_{kl} \pi \cos \alpha_{kl} = a_{kl} \\ A_{kl} \pi \sin \alpha_{kl} = b_{kl} \end{cases}, \quad (2)$$

где A_{kl} – амплитуда k -й гармоники сигнала на l -м периоде основного интервала измерения; k – порядок гармоники; $l=1 \div 10$ – порядковый номер периода на основном интервале измерения; α_{kl} – фаза k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения; a_{kl} – интегральная сумма на интервале 2π произведения сигнала на функцию синуса единичной амплитуды k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения; b_{kl} – интегральная сумма на интервале 2π произведения сигнала на функцию косинуса единичной амплитуды k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения.

Система уравнений (2.8) не что иное, как тригонометрическое представление комплексного числа $z_{kl} = a_{kl} + jb_{kl}$ [116]. Тогда амплитуда k -й гармонической составляющей на l -м периоде основного интервала измерения определяется, как:

$$A_{kl} = \frac{|z_{kl}|}{\pi},$$

где $|z_{kl}|$ – модуль комплексного числа z_{kl} .

Фаза k -й гармоники на l -м периоде основного интервала измерения:

$$\alpha_{kl} = \arg z_{kl},$$

где $\arg z_{kl}$ – аргумент комплексного числа z_{kl} .

Таким образом с помощью дополнительного ДПФ по периодам гармоники основной частоты (ДПФ по периодам) удастся локализовать время появления и исчезновения высших гармоник с точностью до одного периода гармоники основной частоты (рис.2).

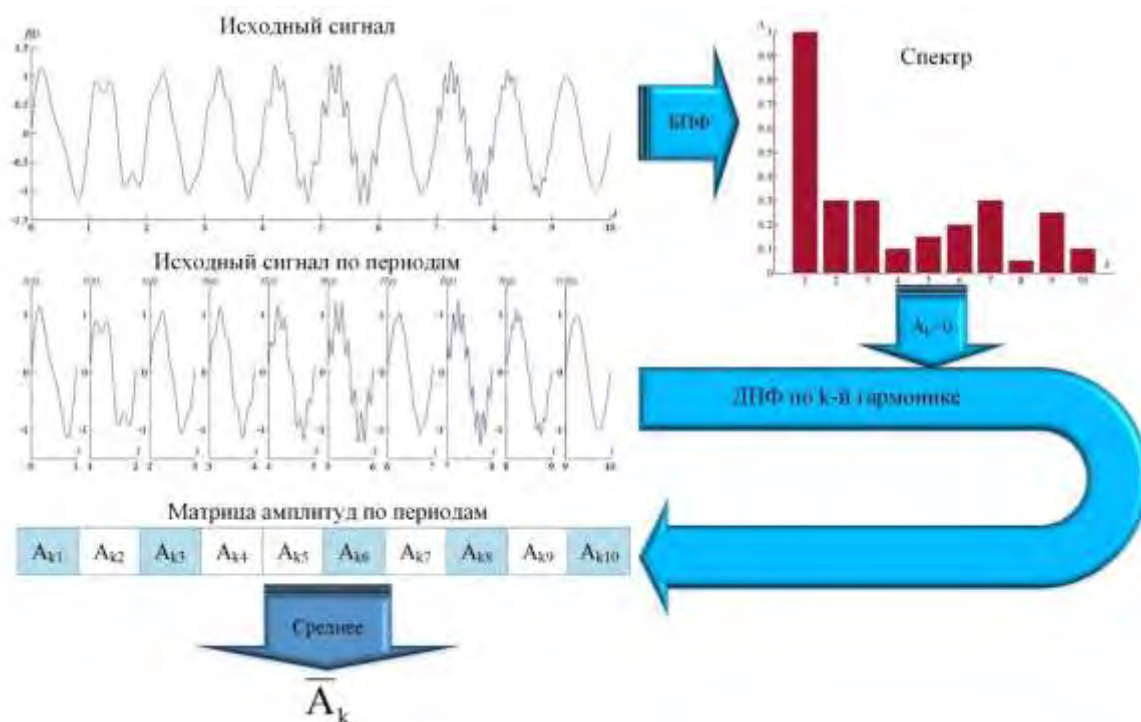


Рисунок 2 – Модификация метода гармонического анализа

Выводы:

- в электроэнергетике наиболее распространенным методом гармонического анализа искажения кривых тока и напряжения является Быстрое Преобразование Фурье;
- ни один из существующих методов гармонического анализа не позволяет с достаточной точностью определить гармонику и одновременно локализовать время ее появления и исчезновения;
- для снижения влияния принципа неопределенности Гейзенберга целесообразно комбинировать методы гармонического анализа; применение ДПФ по периодам позволяет локализовать время появления/исчезновения гармонической составляющей с точностью до периода гармоники основной частоты

Список использованной литературы

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data /edited by Prof. Gregorio Romero. – InTech, 2011. – 258 p.
2. Харлов, Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие / Н. Н. Харлов – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М: Высшая школа, 1996. – 638 с.
4. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание: пер. с англ. – М: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
5. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / [edited by Prof. Gregorio Romero]. – InTech, 2011. – 258 p.
6. Введение в вейвлет-преобразование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> - 05.09.2016 г. – Загл. с экрана.
7. Принцип неопределенности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_неопределённости - 25.07.2017 г. – Загл. с экрана.
8. Непрерывное wavelet преобразование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/post/103899/> - 18.07.2017 г. – Загл. с экрана.
9. Wavelet based feature extraction for classification of Power Quality Disturbances [Электронный

ресурс] / Sudipta Nath, Priyanjali Mishra // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). – Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13-15th April, 2011. – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq'11/340-nath.pdf> – 19.07.2017 г. – Загл. с экрана.

10. Wei, L. Detection and Localization of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Network / L. Wei, H. Pu, Z. L. Wu // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. – Corfu Island, Greece. – 2007. – pp. 13-18.

11. Vega, V. Automatic power quality disturbance classification using wavelet, Support Vector Machine and Artificial Neural Network / V. Vega, V N. Kagan, G. Ordonez, C. Duarte // CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. – Prague, Czech Republic. – 2009. – Part 1. – pp. 1-4.

12. Singh, K. Classification of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform and Neural Network / K. Singh, A. Tewari // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2015. – V. 4. – № 5. – pp. 1423 – 1427.

13. Быстрое преобразование Фурье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ip-5-125.unn.ru/ftp/public/analog/5.pdf> - 20.07.2017 г. – Загл. с экрана.

14. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). – Approved 30 April 2009. – BSI. – 66 p.

15. Тригонометрические тождества [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тригонометрические_тождества – 24.12.2016 г. – Загл. с экрана.

16. Список интегралов тригонометрических функций [Электронный ресурс]. - режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_интегралов_от_тригонометрических_функций – 24.12.2016 г. – Загл. с экрана.

17. Пособие по математике для поступающих в вузы: учеб. пособ. / А. Д. Кутасов, Т. С. Пиголкина, В. И. Чехлов, Т. Х. Яковлева; под. ред. Г. Н. Яковлева. – 2-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 480 с.

A. Voloshko, Dr. Sc. Sciences., Prof.

D. Filyanin

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnical Institute»

DETECTION AND LOCALIZATION OF POWER QUALITY DISTURBANCES BASED ON FAST FOURIER TRANSFORM AND DISCRETE FOURIER TRANSFORM

The urgency of the work is due to the need to localize and evaluate power quality distortion for understanding the cause-effect relation of the appearance of distortions, their correct evaluation and identify sources of harmonic in order to improve power quality.

Key words: power quality, harmonics, total harmonic distortion, distortion source, Fast Fourier Transform, Discrete Fourier Transform.

References

1. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / edited by Prof. Gregorio Romero. – InTech, 2011. – P. 258 – ISBN 978-953-307-335-4

2. Kharlov N.N. Elektromagnitnaya sovместimost v elektroenergetike [Electromagnetic compatibility in power industry]. – Tomsk, TPU Publ. House. – 2007. – 207 p.

3. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovi elektrotehniki [Theoretical fundamentals of electrical engineering]. M: Hihg school, 1996. 638 p.

4. Richard G. Lyons. Understanding Digital Signal Processing: 3rd ed. – Pearson Education, Inc. – 2011. – 564 p.

5. Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data / [edited by Prof. Gregorio Romero]. – InTech, 2011. – 258 p.

6. Vvedenie v veyvlet preobrazovanie [Introduction in wavelet-transform]. Available at: <http://www.autex.spb.su/download/wavelet/books/tutorial.pdf> (accessed – 05 september 2016).

7. Uncertainty principle. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty_principle (accessed - 25 July 2017).

8. Neprerivnoe wavelet preobrazovanie [Continuous wavelet transform]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/103899/> (accessed - 18 July 2017).

9. Wavelet based feature extraction for classification of Power Quality Disturbances [Электронный ресурс] / Sudipta Nath, Priyanjali Mishra // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11). – Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13-15th April, 2011. – Режим доступа: <http://www.icrepq.com/icrepq'11/340-nath.pdf> – 19.07.2017 г. – Загл. с экрана.
10. Wei, L. Detection and Localization of Power Quality Disturbances Based on Wavelet Network / L. Wei, H. Pu, Z. L. Wu // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation. – Corfu Island, Greece. – 2007. – pp. 13– 18.
11. Vega, V. Automatic power quality disturbance classification using wavelet, Support Vector Machine and Artificial Neural Network / V. Vega, V N. Kagan, G. Ordonez, C. Duarte // **CIREC 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. - Prague, Czech Republic.** – 2009. – Part 1. – pp. 1– 4.
12. Singh, K. Classification of Power Quality Disturbances using Wavelet Transform and Neural Network / K. Singh, A. Tewari // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2015. – V. 4. - № 5. – pp. 1423– 1427.
13. Bistroe preobrazovanie Fur'e [Fast Fourier transform]. Available at: <http://ip-5-125.unn.ru/ftp/public/analog/5.pdf> (accessed – 20 July 2017).
14. EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). – Approved 30 April 2009. – BSI. – 66 p.
15. List of trigonometric identity. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_trigonometric_identities (accessed - 24 december 2016).
16. List of integrals of trigonometric functions. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_integrals_of_trigonometric_functions (accessed - 24 december 2016).
17. Kutasov, A. D. Posobie po matematike dlya postupauschih v vuzy [A manual on mathematics for students entering universities]. M: Science, 1985. 480 p.

УДК 621.311

А. В. Волошко, д-р техн. наук, проф.
Д. В. Філянін

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ФУР'Є ТА ДИСКРЕТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ФУР'Є ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ, ЛОКАЛІЗАЦІЇ І ОЦІНКИ СПОТВОРЕННЯ СИНУСОЇДАЛЬНОСТІ КРИВИХ ТОКА І НАПРУГИ

Актуальність роботи обумовлена необхідністю локалізації та оцінки спотворення синусоїдальності кривих струму і напруги для виявлення причинно-наслідкового зв'язку появи спотворень, правильної їх оцінки та визначення джерел гармонічних спотворень з метою ефективного проведення заходів щодо поліпшення якості та надійності електропостачання споживачів.

Ключові слова: якість електроенергії, гармоніки, коефіцієнт гармонік, джерело спотворення, Швидке Перетворення Фур'є, Дискретне Перетворення Фур'є.

Надійшла 27.09.2017
Received 27.09.2017