|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ДОКЛАД** | | **КОММЕНТАРИЙ** |
| **Слайд 1 – Титульный лист** | |  |
| **Слайд 2 – Цель, объект и предмет исследования.** | |  |
| **Слайд 3 – Задачи исследования.** | |  |
| **Слайд 4 – Научная новизна работы.** | |  |
| **Слайд 5 – Практическая значимость работы.** | |  |
| **Математическая модель многотонального сигнала.**  **Слайд 6 – Ограничение ДПФ.** | **Для чего слайд – целью работы является совершенствование методов оценки параметров гармоник многотонального сигнала.**  **Математическая модель простого гармонического сигнала усложняется при применении цифровой обработки сигналов. В частности, ДПФ позволяет точно определить только частоты аналоговых сигналов, частота которых строго кратна основной гармоники.**  **В противном случае мы получаем погрешность, которая можно видеть на рисунке 1.**  **Исследуемая математическая модель сигнала показывает соотношение между реальными гармониками и теми, которые мы получаем после использования ДПФ.**  **Комментарии:**  Если представить аналоговый сигнал в дискретном виде, то  максимум гармоники сигнала () и максимум дискретных гармоник (.) будут не совпадать.  **Есть ли условия, при которых они совпадают? Когда частота сигнала кратна частоте основной гармоники БПФ.**  Данная проблема существует уже давно. Но до сих пор не существует оптимального решения.  1. На слайде представлена формула модели сигнала .  Каждая гармоника характеризуется амплитудой . Частотой и начальной фазой . Исследуемый сигнал содержит шум .  2. После Быстрого Преобразования Фурье на графике получаем дискретные гармоники , , и **амплитудные** , ,.  3. – разность между дискретными гармониками.  На слайде изображена проблема нахождения гармоники сигнала при амплитудной гармоники . Гармоника находится между дискретными гармониками , , .  Из-за разницы в частоте, мы получаем – разность между амплитудными гармониками. – разность между фазовыми гармониками (). | |
| **Слайд 7 – Влияние оконной функции.** | **Для чего слайд** – **Ограничения интервала цифровой обработки сигналов с использованием оконных функций связана с невозможностью анализа информации на бесконечном интервале времени.**  **Если исследовать преобразование Фурье прямоугольного импульса, то мы увидим значительные боковые лепестки в спектре.**  **Изменяя параметр , мы можем изменять форму окна** из прямоугольного (, т. е. оконное преобразование отсутствует).  **Спектр сигнала без боковых лепестков с окном Кайзера, при .** Низкие боковые лепестки (, как правило, между и ).  Спектр сигнала более сглаженный представлен на слайде. | |
| **Слайд 8 – Методы интерполирования спектра.** | **Для чего слайд** – **чтобы найти** **промежуточные точки спектра используем методы интерполирования.**  **Интерполирование решается путем аппроксимации.**  **Список методов интерполирования спектра: метод Якобсена, два метода Квина, два метода Маклеода, метод Грэндка, алгоритм параболической интерполяции, алгоритм интерполяции Гаусса, алгоритм, рекомендованный в ГОСТ 30804.4.7-2013, метод корреляционных функций, Модернизированный метод корреляционных функций. Распространенным методом является метод Якобсена.**  **Он основан на определении максимума спектра на основании трех точек БПФ.**  **Для всех интерполяционных методов порядковый номер максимальной частоты и частота гармоник определяются формулам:**  **– разность между дискретными гармониками.**  **– дискретная гармоника.**  Частота или – это спектральный пик.  – циклическая частота.  – частота дискретизации.  – размер ДПФ. | |
| **Слайд 9 – Методы экстраполирования сигнала** | **Для чего слайд – существует другой метод экстраполирование сигнала,**  **путем добавления нулевых отчетов в сигнал, мы получаем спектр сигнала с дополнительными значениями спектра.**  Комментарии:  На слайде представлено 4 графика:   1. Сигнал с частотой . 2. Сглаженный спектр сигнала без боковых лепестков. 3. Экстраполированный сигнал с добавленными нулевыми отчетами. 4. Спектр экстраполированного сигнала с боковыми лепестками.   Методы экстраполяции позволяют предсказывать сигнал за пределами известного диапазона. Решение задачи экстраполяции рассмотрено на основе граничного случая, т. е. когда неизвестный отрезок находится в конце заданного интервала времени. | |
| **Слайд 10 – Общая формула границы Крамера-Рао** | **Для чего слайд** – **обзор методов оценки параметров гармоник произведен ранее, далее переходим к оценке точности.**  **Максимально возможную точность оценки параметров спектральных составляющих можно определить с помощью неравенства Крамера-Рао.** **В зарубежной литературе чаще встречается термин Cramer-Rao lower bound (CRLB), что переводится как «нижняя граница Крамера-Рао». Несмещенная оценка, которая достигает нижней границей Крамера-Рао, называется эффективной.** **Она обеспечивает наименьшую среднеквадратичную ошибку среди несмещенных оценок и называется minimum variance unbiased (MVU) – оценкой с «минимальной несмещенной дисперсией». Алгоритмы для получения minimum variance unbiased (MVU) оценки должны оценивать параметры на основе функции максимального правдоподобия (maximum likelihood estimation, MLE).**  **На практике под оценкой минимальной дисперсии будем понимать дисперсию, задаваемую нижней границей Крамера-Рао (CRLB).** | |
| **Слайд 11 – Неравенство Крамера-Рао для амплитуды, частоты и фазы гармоник.** | **Для чего слайд – частный случай границы Крамера-Рао для амплитуды, частоты и фазы гармоник. То, с чем связаны исследования в диссертационной работе.**  **Формула границы Крамера-Рао демонстрирует зависимость от оцениваемого параметра .**  Частная формула Границы Крамера-Рао для параметров гармоник сигнала неравенство Крамера-Рао выглядит следующим образом (11-13), где .  **Неравенство Крамера-Рао уменьшается для частоты сигнала по мере увеличения отношения сигнала к шуму, граница уменьшается** . | |
| **Слайд 12 – Нахождения дисперсии результата оценки амплитуды.** | **Численные методы?**  **Для чего слайд – чтобы понять, как получили формулу для оценки точности нахождения амплитуды гармоники.**  **Для нахождения дисперсии результата оценки амплитуды, мы можем воспользоваться формулой**  ,  **(9) и подставить в нее новую дисперсию шума**, где .  Рассмотрим знаменатель правой части формулы. Для упрощения выкладок воспользуемся трансформацией параметра при определении границы Крамера-Рао. **Если величина, которую нужно оценить, связана с величиной, для которой известна граница Крамера-Рао**, соотношением, то границу Крамера-Рао для величины можно найти по формуле (8).   |  |  | | --- | --- | | , | (8) |   **Умножение сигнала на оконную функцию приводит к сворачиванию каждой гармоники сигнала со спектром оконной функции.** В случае единственной гармоники ее амплитуда умножается на нулевую гармонику спектра оконной функции. Нулевая гармоника сигнала это постоянная составляющая, ее значение для оконной функции можно найти по формуле (верхняя формула, слева):  Далее рассмотрим формулу справа.  **где – амплитуда гармоники, полученная в результате оценки умноженного на оконную функцию сигнала, – нулевая гармоника сигнала,**  **– амплитуда гармоники исходного сигнала.**  В нашем случае величина с известной границей Крамера-Рао это , величина с неизвестной границей это | |
| **Слайд 13 – Математическая модель для оценки точности нахождения амплитуды гармоники** | **Для чего слайд – основное положение которое выносится на защиту.**  **В ряде экспериментов, проводимых в публикациях точность оценки амплитуды гармоник сигналов при использовании оконных функций, была ниже теоретической, определяемая как граница Крамера-Рао.**  **Из итоговой формулы выделим вторую часть и введем новое обозначение «коэффициент окна».** | |
| **Слайд 14 – Практическая точность методов** | **Для чего слайд –**  **На графике слева зависимость дисперсии при оценке основной частоты от уровня шума.** Представлены методы: граница Крамера-Рао, метод корреляционных функций, второй метод Квина, метод Маклеода (5 точек).  **При повышении уровня шума погрешность интерполяционных методов возрастает и методы перестают работать.** Хорошие результаты у второго метода Квина и метода Маклеода по пяти точкам. Преимущество метода Маклеода является более простая реализация алгоритма, в отличие от метода Квина.  **На графике справа – зависимость смещения оценки основной частоты от уровня шума. На  графике справа не отражен диапазон от минус 30 дБ до минус 10 дБ, где интерполяционные методы имеют значительное смещение и не вписываются в данный график, в отличие от метода корреляционных функций.** | |
| **Слайд 15 – Экспериментальная проверка формулы для оценки дисперсии.** | **Эксперименты были проведены при различных входных параметрах (число точек, амплитуда, частота и фаза сигналов, дисперсия шума или коэффициент окна). Ни в одном случае не было зафиксировано отклонение результатов эксперимента от результатов, полученных по предложенной формуле.**  **Таким образом, результаты моделирования алгоритма оценки амплитуды гармоники в условиях шума при наложении оконной функции подтверждают полученные соотношения для оценки дисперсии оценки амплитуды.**  **Формула для оценки дисперсии амплитуды дает наилучший результат с весовыми функциями: Кайзера (β=4), Хэмминга, Барлетта.**  Далее представлены результаты моделирования.  **1.**Для проверки правильности рассмотренных выкладок мы промоделировали измерение амплитуды гармоник в одно тональном сигнале, т. е на входе присутствует один синусоидальный сигнал.  На графике показано изменение дисперсии шума после наложении на него окна Кайзера с параметром kaiser\_beta=5. Сплошной линией отображены результаты моделирования, штриховой – результаты расчета по формуле (21), представленной на слайде.  Из графика видно, что линии дисперсий практически совпадают.  **2.** На слайде видим формулу (22) для дисперсии оценки амплитуды гармоники при использовании оконной функции:  Сплошной линией показаны результаты расчеты по формуле (22), штриховой – результаты моделирования. При увеличении числа тестов линии становятся все более похожими. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.  **3.** На слайде видим формулу (23) для дисперсии оценки амплитуды гармоники при использовании оконной функции:  Сплошной линией приведены результаты расчетов по формуле (23), штриховой – результаты моделирования, линия из точек – граница Крамера-Рао. | |
| **Слайд 16 – Дополненная математическая модель многотонального сигнала.** | **Определение многотонального сигнала – сигнал, который имеет несколько гармоник, т.е. сигнал можно описать комплексной экспонентой.**  **Погре́шность измере́ния** – **отклонение измеренного значения величины от её истинного значения.**  **Погрешность измерения является характеристикой точности измерения.**  **Абсолютная погрешность меры - разность между номинальным значением меры и истинным (действительным) значением воспроизводимой ею величины. Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности числа к самому этому числу.** | |
| **Слайд 17 – Интерполирование спектра** | **Для чего слайд – интерполирование спектра, как было сказано ранее необходимо, чтобы найти значение между известными частотами.**  **На рисунке справа показан пример построения наборов эталонов (здесь представлено три набора). Первый набор не имеет смещения относительно базовой точки. Второй набор смещен влево относительно базовой точки на величину шага формирования эталона . Третий набор смещен вправо относительно базовой точки на величину шага формирования эталона . Также для первого набора эталона определены его отсчеты БПФ.**  **На рисунке справа изображен метод Якобсена.**  Для того чтобы сформировать набор эталонов необходимо определить базовую точку, вокруг которой будут создаваться эталоны (обозначим ее через ). Эта точка выбирается из ближайших целых значений основной частоты измеряемого напряжения. **Также необходимо определить шаг, с которым будут формироваться эталоны (обозначим его через ). Затем на промежутке необходимо произвести формирование эталонов.** Для этого спектр оконной функции необходимо сдвигать вправо и влево с шагом в пределе заданного промежутка и определять точек вокруг пика. | |
| **Слайд 18 – Двойное интерполирование сигнала и спектра** | **Для чего слайд - метод экстраполирование сигнала,**  **добавляет нулевые отчеты в сигнал,**  **Далее интерполируем спектр, чтобы найти значение между известными частотами. Данный метод считается новым…**  **Двойное интерполирование сигнала и спектра:**   1. Сигнал с частотой . 2. Сглаженный спектр сигнала без боковых лепестков. 3. Экстраполированный сигнал с добавленными нулевыми частотами ().   **, – это коэф.интер-я**   1. Спектр с двойной интерполяцией () сигнала с боковыми лепестками.   **Экстраполирование – точность дисперсий результатов** | |
| **Слайд 19 – Алгоритм поиска гармоник** | **В результате анализа был предложен метод нахождения параметров всех гармоник многотонального сигнала в соответствии с моделью сигнала**  **На основании алгоритма зарегистрирована программа для расчета гармоник и интергармоник тока и напряжения электрической сети прямым корреляционным методом с использованием быстрых алгоритмов обработки сигналов.**  **Основные три части программы – это блок поиска гармоник, блок оценки параметров гармоник и блок моделирования алгоритмов поиска и оценки параметров.**  Блок поиска гармоник находит частоты гармоник исходя из заданных коэффициентов определяющих минимальные уровень гармоник и расстояние между гармониками. Эти коэффициенты могут определяться в процессе моделирования.  Блок оценки параметров используют алгоритмы, описанные во второй и третьей главах.  Предложенная программа была проверена на данных измерений сигналов в электрических сетях, полученных другими исследователями и показала свою работоспособность. | |
| **Слайд 20 – Расчет гармоник и интергармоник.** | **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и функционал в зарегистрированной программе.** | |
| **Слайд 21 – Метод нахождения параметров гармоник.** | **Методы, основанные на интерполировании смежных гармоник, позволяют достичь высокой точности. Однако они не позволяют достичь точности оптимальной несмещенной оценки.**  **Оценка параметров гармоник прямым корреляционным методом подразумевает вычисление корреляций сигнала с гармоническим сигналом различной частоты. Расстояние между частот эталонных гармоник и количество вычисляемых корреляций можно определить с помощью границы Крамера-Рао.** | |
| **Слайд 22 – Использование корреляции.** | **Для чего слайд – рассмотрим подробно быстрые алгоритмы.**  **Для нахождения параметров промежуточных гармоник с помощью быстрых алгоритмов корреляции используется формула (28).**  **Из-за диапазона в частотах гармоник ДПФ и , мы получаем дополнительные , которые показаны на рисунке синей пунктирной линией со звездочками.**  **- это амплитуда гармоники исходного сигнала.** | |
| **Слайд 23 – Pruned FFT** | **Для чего слайд – под термином Pruning FFT стали пониматься любые**  **алгоритмы БПФ, в которых часть входных или выходных данных равна нулю.**  Применение алгоритмов БПФ началось после публикации работы Кули и Тьюки в 1965 году.  **Для вычисления БПФ используют алгоритм Кули-Тьюки в котором умножаются поворачивающие множители и вычисляются строки БПФ.**  Рассмотрим матрицу с шириной столбцов и высотой столбцов . Алгоритм Pruned FFT (усеченное БПФ) – не требует 1-й стадии вычислений, сложность алгоритма составляет , сложность алгоритма растет линейно с ростом . **Наиболее распространенный случай, когда используется Pruned FFT – это свертки с нулевым заполнением**, 50% равны нулю. | |
| **Слайд – Анализ быстродействия**   |  |  | | --- | --- | | **1.Быстрая корреляция**    **Высокое быстродействие при малом коэффициенте интерполирования** | **2. Прямой метод**    **Не подходит для встроенных систем** | | **3. Pruned БПФ**    **Относительно высокое быстродействие, слабо зависит от коэффициента интерполирования** | **4.Sparse FFT**    **Не работает с интерполированными сигналами** | | **Быстрые алгоритмы необходимы для вычисления параметров гармоник, чтобы производить вычисления быстрее, с максимальной точностью.**  **1.** **Быстрая корреляция**  Высокое быстродействие при малом коэффициенте интерполирования.  **2.** **Прямой метод**  **CUDA (Compute Unified Device Architecture) –** **программно-аппаратная архитектура параллельных вычислений, которая позволяет существенно увеличить вычислительную производительность благодаря использованию графических процессоров фирмы NVIDIA.**  Для программирования в технологии CUDA используется синтаксис языков Си, C++ и Фортран, выполнимые на графических процессорах NVIDIA.  **3. Pruned БПФ**  Рассматривали на предыдущем слайде.  **4. Sparse FFT**  Алгоритм Sparse FFT (разряженное БПФ) показывает высокое быстродействие, время работы меньше, чем при использовании интерполяционных методов. Неработоспособность в сочетании с методом дополнения исходного сигнала, основная идея алгоритма – поиск наибольших гармоник.  **Sparse FFT - алгоритм**  **оценки спектра сигнала, содержащий малое число гармоник. В отличие**  **от усеченного БПФ, которое находит небольшое число гармоник с заранее**  **известным номером** | |
| **Слайд 25 – Список опубликованных работ** |  | |
| **Слайд 26 – Основные положения, выносимые на защиту** |  | |

**Васеева** Татьяна Валериевна, аспирант, [tvvaseeva@gmail.com](mailto:tvvaseeva@gmail.com)

**Альтман** Евгений Анатольевич, к.т.н., доцент, [AltmanEA@gmail.com](mailto:AltmanEA@gmail.com)