

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/44-186

Ссылка для цитирования этой статьи:

Львова Е.В., Никифоров А.А., Шаронов М.А., Степанов М.Ф. Исследование цифровых методов измерения активной и реактивной мощности в силовых сетях // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2023. № 4

УДК 621.317.33: 519.254

DOI:10.24412/2541-9269-2023-4-39-53

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИЛОВЫХ СЕТЯХ

Львова Е.В., Никифоров А.А., Шаронов М.А., Степанов М.Ф.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, ieei_director@mail.ru

STUDY OF DIGITAL MEASURING METHODS FOR ACTIVE AND REACTIVE POWER IN POWER PLANTS

E.V. L'vova, A.A. Nikiforov, M.A. Sharonov, M.F. Stepanov
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Russia, Saratov, ieei_director@mail.ru

Аннотация. Проведен сравнительный анализ трех популярных методов измерения параметров гармоник тока и напряжения в промышленных сетях переменного тока. Исследовались методы быстрого преобразования Фурье, вейвлет-анализа и фильтра Калмана. Показано, что они дают сходные по точности результаты, которые уступают наиболее точному методу максимального правдоподобия, но превосходят его с точки зрения экономии вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: частота сигнала, амплитуда, фаза, гармоники тока и напряжения, быстрое преобразование Фурье, вейвлет-анализ, фильтр Калмана.

Abstract. A comparative analysis of three popular methods for measuring current and voltage harmonic parameters in industrial AC networks is carried out. The fast Fourier transform, wavelet analysis, and Kalman filter methods are studied. It is shown that they give results that are similar in accuracy, which are inferior to the most accurate maximum likelihood method, but surpass it in terms of saving computing resources.

Keywords: signal frequency, amplitude, phase, current and voltage harmonics, fast Fourier transform, wavelet analysis, Kalman filter.

Измерение мощности является важной частью электрических измерений и оценки качества электроэнергии, поэтому многие исследования были посвящены различным аспектам измерения этой величины [1-25]. На сегодняшний день од-

ной из наиболее часто встречаемых проблем, не позволяющих проводить точное измерение мощности в промышленных электросетях, является наличие у сигналов, передаваемых по этим сетям, гармоник основной частоты ($f_0 = 50$ Гц) [1-4, 9-11, 14-30]. В связи с тем, что практически все современные электроприборы и оборудование обладают нелинейными характеристиками, они являются источниками гармонических искажений. По этой причине для корректного измерения мощности в промышленных сетях, прежде всего, надо уметь правильно измерить величину этих искажений. Изучению этого вопроса и посвящена предлагаемая работа.

1. Математическая модель сигналов и измеряемые параметры

Сигналы напряжения и тока в сети, в которой присутствуют нелинейные искажения, могут быть представлены в виде ряда Фурье, поскольку эти искажения не меняют периодического характера сигнала. Первый член суммы ($n = 1$) является компонентой на основной частоте f_0 , а остальные компоненты — гармониками основной частоты. Поскольку искажения носят нелинейный характер, то для общности рассуждений в модель добавлены постоянные составляющие:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2U_n} \cos(n2\pi f_0 t - \phi_n), \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2I_n} \cos(n2\pi f_0 t - \psi_n), \quad (2)$$

где U_0, I_0 — постоянные составляющие напряжения и тока, которые обычно достаточно малы, но могут влиять на результат; U_n и ϕ_n — среднеквадратическое значение и фазовый угол n -й гармоники напряжения, а I_n и ψ_n — среднеквадратическое значение и фазовый угол n -й гармоники тока соответственно. Задача заключается в разработке методов измерения этих параметров гармоник, включая постоянные составляющие сигналов.

Для количественного описания величин тока и напряжения обычно используют их среднеквадратичные значения, которые также называются действующими значениями (ДЗ). Существует некоторые характеристики (например, спектр сигнала), которые указывают на наличие гармоник в сигналах. Но основной характеристикой принято считать суммарный коэффициент гармоник (КГ), выражающий мощность всех гармоник по отношению к мощности сигнала на основной частоте. Он может быть рассчитан как для напряжения, так и для тока, например, для напряжения он задается следующим соотношением:

$$K_{HU} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \quad (3)$$

где U_n — ДЗ гармоники напряжения n -ого порядка, а U_1 — ДЗ составляющей напряжения на основной частоте. Уравнение (3) соответствует стандартам Международной электротехнической комиссии (МЭК) и Института инженеров электриков и радио-электронщиков (ИИЭР). Однако значение N (число рас-

смаатриваемых гармоник) определяется в каждом стандарте по-разному. В стандарте МЭК 61000-4-7 [31] значение $N = 40$ и гармонические компоненты рассчитываются посредством дискретного преобразования Фурье или его более быстрой версии быстрого преобразования Фурье (БПФ) в окне длиной 10 периодов ($f_0 = 50$ Гц). Кроме того, документы МЭК определяют многие другие метрики, связанные с суммарным коэффициентом гармоник (например, суммарный коэффициент гармонических групп и суммарный коэффициент гармонических подгрупп). В стандарте ИИЭР 519 [32] также $N = 40$, но нет никаких указаний относительно окна обработки и метода измерения, требуемых для получения спектра. Другим способом определения N является частота дискретизации (f_s), а именно $N = 0,5 f_s/f_0$.

Например, если частота дискретизации $f_s = 6,4$ кГц (128 отсчетов сигнала на период частоты f_0), то согласно этому выражению $N = 64$. Другой способ, используемый для вычисления суммарного коэффициента гармоник, заключается в следующем:

$$K_{HU} = \frac{1}{U_1} \sqrt{U_{rms}^2 - U_1^2}, \quad (4)$$

где U_{rms} — ДЗ всего сигнала.

Оба выражения, (3) и (4) используют в качестве опорного сигнала ДЗ напряжения на основной частоте (первую гармонику). Точно так же можно рассчитать коэффициент гармоник для тока K_{HI} , но стоит помнить, что в данном случае, величина соотносится со значением тока основной частоты в конкретный текущий момент, что может вносить некоторую путаницу. Чтобы избежать этого, стандарт [32] использует термин «фактор гармоник» как синоним суммарному КГ и вводит другую метрику — суммарный коэффициент искажения потребления тока:

$$K_{DI} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_L} \quad (5)$$

где I_n и I_L — ДЗ гармоники тока n -ого порядка и максимальное потребление тока нагрузкой на основной частоте, соответственно. Когда максимальный ток трудно определить, можно использовать номинальный ток.

Еще одной метрикой, характеризующей гармоническое искажение, является коэффициент амплитуды, определяемый как отношение максимума сигнала и его ДЗ:

$$C_r = \frac{U_{\max}}{U_{rms}} \quad (6)$$

Выражение (6) указывает, насколько сигнал отклоняется от постоянного значения. Для практических целей могут быть определены многие другие характеристики (например, связанные с эффектами гармоник в зависимости от типа оборудования). Например, К-фактор используется для описания влияния

искаженных токов на потери энергии в оборудовании силовой системы (в нагрузках трансформаторов и т.д.). Коэффициент телефонных помех характеризует шум на телефонной линии, вызванный токами и напряжениями гармоник в энергосистеме.

2. Методы обработки сигналов для измерения гармоник

Токи и напряжения гармоник характеризуются частотой, амплитудой и фазовым углом [6, 23, 25]. В качестве инструментов для оценки и расчета вышеуказанных величин были введены различные методы обработки сигналов. Некоторые из них рассмотрены ниже, но следует отметить, что перечисленные методы далеки от совершенства, и у каждого есть свои преимущества и недостатки.

При практических измерениях стандартный метод изучения и оценки гармонических составляющих сигналов тока и напряжения основан на использовании алгоритмов БПФ. Последнее хорошо работает при оценке периодических сигналов в стабильной сети, но при определенных условиях (например, паразитная амплитудная модуляция спектра, растекание спектра), результат будет неточен. Поэтому необходимо использовать альтернативные методы для расчета сигнала на основной частоте и его гармоник.

Преобразование Фурье на малом временном интервале, еще известное как БПФ в скользящем окне, имеет фиксированное разрешение для всех частот в соответствии с размером окна. Оно более удобно и эффективно для интерпретации при обработке гармоник [33].

Вейвлет-преобразования становятся все более популярным средством для измерения гармонических составляющих в сигналах напряжения или тока. Например, в [34] вейвлет-преобразования предлагаются для расчета искажений переходных гармоник энергетической системы путем рассмотрения сигнала в разных частотных поддиапазонах и исследования их характеристик по отдельности. В [35] для количественной оценки амплитуд и фаз частот гармоник используется комбинация дискретного и непрерывного вейвлет-анализа, тогда как [36] предлагает использовать пакетное вейвлет-преобразование.

Применяя дискретное вейвлет-преобразование к сигналам напряжения и тока (1) и (2), получаем:

$$DWT_{u_a}(m, n) = \langle u_a, \psi_{m,n} \rangle = (U_a, \phi) \quad (7)$$

$$DWT_{i_a}(m, n) = \langle i_a, \psi_{m,n} \rangle = (I_a, \vartheta) \quad (8)$$

где n и m – параметры, соответствующие времени и учитываемому диапазону частот (числу учитываемых гармоник) соответственно. Так как это комплексные величины, можно обозначить U_a и I_a как амплитуды, а ϕ и ϑ как фазовые углы напряжения и тока соответственно. Эта информация далее используется для определения суммарного КГ или других величин, связанных с мощностью (например, мгновенной активной и реактивной мощностей). Чтобы проверить

предложенный метод путем сопоставления с существующими методами (3), суммарный КГ напряжения выражается как:

$$K_{HU} = \frac{\sqrt{\sum_m \sum_n \|DWT_{u_a}(m, n)\|^2}}{\sqrt{\sum_n \|DWT_{u_a}(m_0, n)\|^2}} \quad (9)$$

где m_0 — параметр, соответствующий основной частоте. Аналогичное выражение может быть записано и для тока.

Известен еще один усовершенствованный метод оценки компонентов сигнала – фильтр Калмана. Этот метод определяет модель в пространстве состояний, отслеживающую изменения во времени амплитуды и фазы основной частоты и ее гармоник [37].

Другие подходы к измерению гармоник: метод Прони [28], статистический анализ [38], многофакторная классификация сигнала [39], применение гребенчатого фильтра с конечной импульсной частотной характеристикой [40]. метод наименьших квадратов [41-46], разложение по собственным значениям [47-52].

Вне зависимости от природы полученных значений гармонических искажений тока и напряжения, будь то имитационное компьютерное моделирование или результаты измерения в реальной электросети, их следует оценивать с учетом рекомендованных ограничений, представленных в стандартах [53].

3. Результаты измерений гармоник

Предварительные общие замечания:

- Сопротивления, используемые в измерениях, состоят из ламп накаливания и компактных люминесцентных ламп, а также выпрямителя с резистивно-индуктивной нагрузкой.
- Для напряжений и токов была выбрана частота дискретизации 6,4 кГц, следовательно, получаем 128 отсчетов сигнала на период основной частоты f_0 .
- В качестве эталона используется анализатор мощности РМ6000 [13], основанный на БПФ сигнала.

Чтобы оценить в реальном времени точность и поведение трех основных способов обработки сигналов (анализ Фурье, Вейвлет-анализ и фильтр Калмана), применяемых для измерения гармоник тока и напряжения сигналов, был проведен и проанализирован ряд онлайн тестов.

Тесты в основном выполняются при двух напряжениях распределительной сети: ДЗ напряжения 230 и 240 В. Рассматриваются только первые 15 гармоник. Методы измерения гармонических величин, их ДЗ и других метрик рассмотрены далее. Сначала приведены экспериментальные результаты измерения посредством БПФ.

3.1 Измерение гармоник на основе математического аппарата Фурье

Данные измерений напряжений и токов сняты с выпрямителя с резистивно-индуктивной нагрузкой, подключенного к однофазной цепи. Извлечение спектра гармоник проводилось по двум сценариям, затрагивающим прежде всего размер блока данных для анализа:

- Серия охватывает ровно один, два и восемь периодов сигнала, т. е. все вычисления выполняются на 128, 256 и 1024 отсчетах соответственно.
- Используется скользящее окно (например, треугольное или Ханна) длиной в два периода (40 мс или 256 отсчетов) или восемь периодов (200 мс или 1024 отсчета) без перекрытия.

Результаты измерения гармонических составляющих и ДЗ показаны на рис. 1.

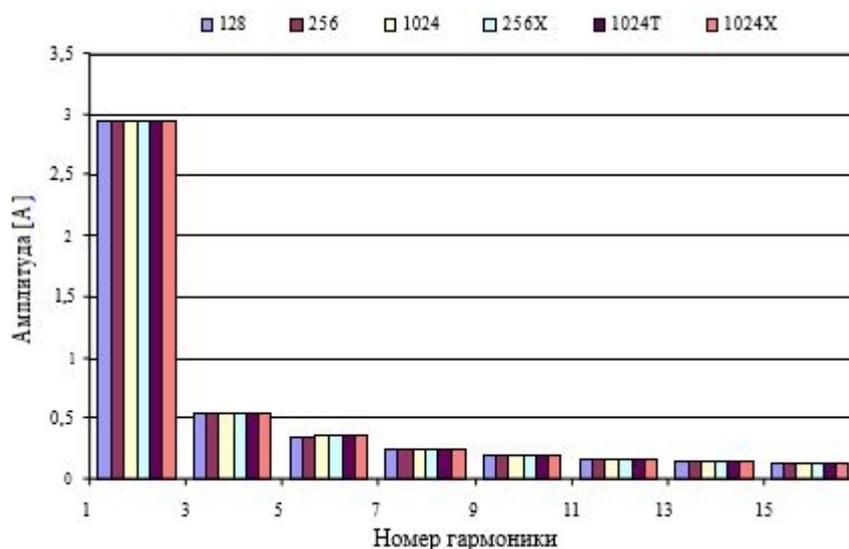


Рис. 1 – Измерение амплитуды гармоник с помощью БПФ: использовались окна Хана (X) и треугольное (T)

3.2 Измерение гармоник с помощью вейвлет-преобразования

Для метода, основанного на действительном вейвлет-преобразовании аналитического представления сигналов, необходимо учитывать следующие основные моменты:

- тип действительного вейвлет-преобразования должен быть ортонормированным;
- уровень вейвлета (фильтра), связанный с характеристикой разрешения частот для выбранного вейвлета: хорошее разрешение частот уменьшает растекание спектра;
- число уровней разложения, связанное с размером входного кадра, например, если количество входных выборок равно $N = 2^D$, то может быть выполнено максимум D разложений;

Сигналы дискретизируются при 128 отсчетах на период основной частоты f_0 . Выбраны пять параметров сдвига вейвлета и один уровень масштабирования. Такой выбор дает возможность включить основную частоту в поддиапазон,

расположенный на самой низкой частоте. Используется набор из ламп накаливания и люминесцентных ламп в качестве нагрузки.

Для начала, показаны результаты, полученные вейвлет-преобразованием аналитического представления измеренного сигнала (тока), с аппроксимацией посредством быстрого преобразования Фурье. В таблице 1 показано ДЗ каждого выходного диапазона, для каждого из трех ортонормальных вейвлетов (Добеши, симмлета и койфлета) [34-36] с различным числом коэффициентов.

Тесты, проеденные с помощью имитационного моделирования, показали, что наилучший результат дает вейвлет Добеши с 40 коэффициентами, позволяющий количественно оценить ДЗ тока нескольких гармоник в каждом диапазоне частот. Стоит отметить, что с увеличением числа коэффициентов, точность измерения для гармоник также возрастает. Поэтому вейвлет Добеши с 40 коэффициентами далее берется как эталон для экспериментов по онлайн измерению гармонических составляющих (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты измерения гармоник с помощью дискретного вейвлет-преобразования

Метод	Полоса частот (Гц)					
	0-100	100-200	200-400	400-800	800-1600	1600-3200
Добеши(6)	1,053	0,161	0,204	0,133	0,12	0,092
Добеши(20)	1,056	0,165	0,204	0,129	0,121	0,081
Добеши(40)	1,055	0,166	0,21	0,112	0,123	0,082
Койфлет(5)	1,052	0,166	0,207	0,125	0,119	0,086
Симлет(8)	1,054	0,164	0,2	0,133	0,121	0,092
Симлет(20)	1,052	0,165	0,203	0,131	0,119	0,086

Однако в результате дискретного вейвлет-преобразования получаются неоднородные полосы частот, что означает, что при более высоком уровне разложения полоса частот становится более широкой и охватывает больше гармонических составляющих (например, 5-я и 7-я гармоники вместе составляют часть полосы частот: 200 ~ 400 Гц, 9, 11, 13, 15, 400 ~ 800 Гц и т.д.). Для преодоления этого ограничения может использоваться дискретное вейвлет-преобразование, расширенное до пакетного вейвлет-преобразования [35].

Результаты показывают, что значения, рассчитанные с использованием метода дискретного вейвлет-преобразования, довольно достоверны. Различие в результатах БПФ и вейвлет-метода — это следствие разложения сигнала (симметричного и асимметричного) и связанные с ними проблемы растекания спектра. Таким образом, при асимметричном разложении (дискретное вейвлет-преобразование) учитываются только данные первых трех уровней вейвлета и уровня масштабирования для расчета ДЗ, а также в некоторых полосах частот может возникать растекание спектра.

Помимо создания аналитического представления сигнала через БПФ, альтернативный способ предлагается на основе фильтра с конечной импульсной характеристикой. В исследовании используется длина фильтра 60. Алгоритм, основанный на аналитическом представлении сигнала, полученном посред-

ством фильтра с конечной импульсной характеристикой оказывается более эффективным для более низких частот дискретизации (например, $f_s = 1600$ Гц вместо $f_s = 6400$ Гц), что также продемонстрировано посредством моделирования и измерения (Таблица 2).

Таблица 2 – Результаты измерений пакетным вейвлет-преобразованием

Пакетное вейвлет-преобразование (Добеши (40))	Гармоника тока							
	1	3	5	7	9	11	13	15
5 уровней	0,938	0,159	0,217	0,059	0,047	0,031	0,035	0,011
3 уровня	1,056	0,167	0,13	0,072	0,041	0,027	0,019	0,015

Обобщая, тип вейвлета и особенно его порядок, количество уровней, способ разложения сигнала (асимметричный, как в дискретном вейвлет-преобразовании или симметричный, как в пакетном вейвлет-преобразовании), способ аппроксимации аналитического сигнала (через быстрое преобразование Фурье или через фильтр с конечной импульсной характеристикой) являются важными характеристиками и оказывают большое влияние на идентификацию и измерение гармонических составляющих.

3.3 Измерение гармоник фильтром Калмана

Выход фильтра Калмана используется для отслеживания гармоник. Стоит упомянуть, что алгоритм фильтра Калмана требует, чтобы частоты измеряемых гармоник (некоторое количество гармоник) и шума были заранее точно известны (до запуска алгоритма фильтра Калмана). В таких условиях точность, стабильность, сходимости — это всего лишь несколько аспектов, которые должны быть рассмотрены. Коэффициент Калмана рассчитан с использованием функции Матлаба `kalman.m` с учетом дискретно-временной модели и дисперсии. Набор из ламп накаливания и люминесцентных ламп используется в качестве нагрузки.

В первую очередь, изучается влияние погрешности модели и шумов измерения (обозначенные как Q и R) на точность измерения. В рассматриваемом эксперименте измерены несколько гармоник: все нечетные до 7-й гармоники.

Дисперсия шума при измерениях установлена равной $\sigma_r^2 = 0,2$. На рис. 2 показаны измеряемые величины основной и нечетных гармоник во времени. В левом столбце приводятся результаты измерений, когда используется небольшая погрешность модели $\sigma_q^2 = 0,0001$, а в правой колонке приведены результаты для большего значения $\sigma_q^2 = 0,1$.

Как видно из рис. 2, при небольшой дисперсии шума (левые графики) в измерениях гармонических величин присутствуют небольшие флуктуации. Однако это лишь означает, что сходимость алгоритма занимает чуть больше времени, что нельзя считать серьезной проблемой.

Другой аспект, который необходимо учитывать, связан с количеством измеряемых фильтром Калмана гармоник. Параметры шума устанавливаются равными $\sigma_q^2 = 0,1$ и $0,0001$ для обеспечения достаточно высокой точности.

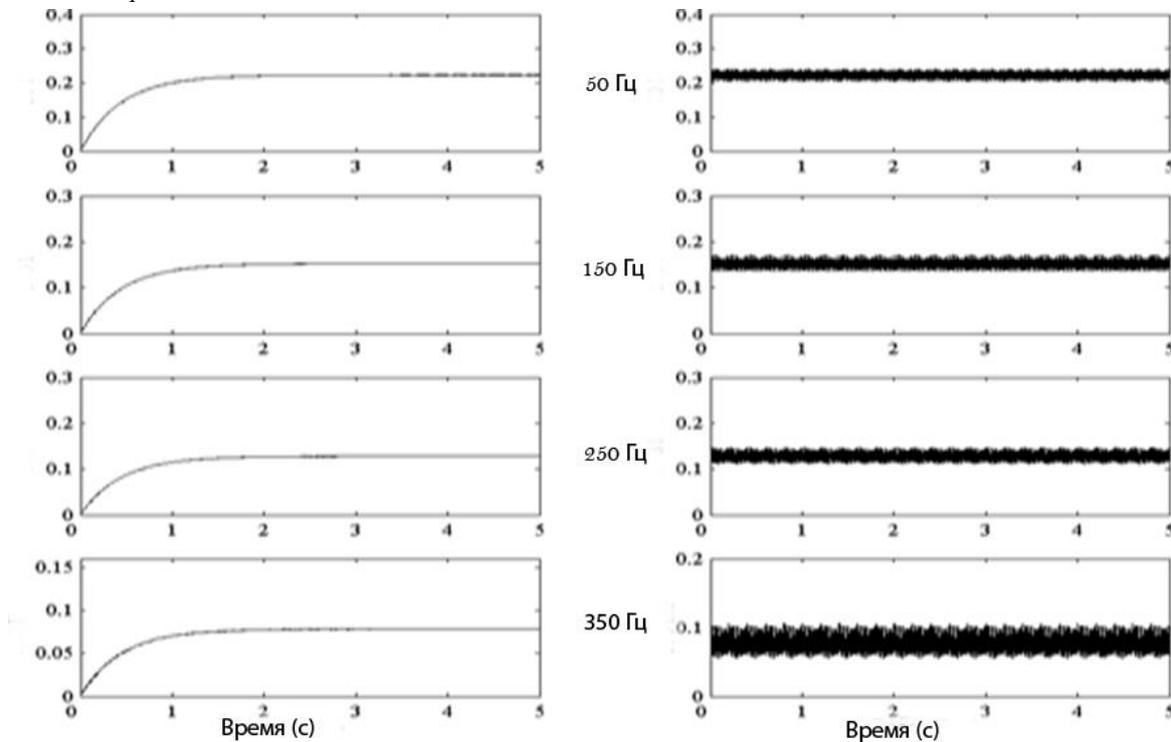


Рис. 2 – Амплитуда гармоник, измеряемая с использованием фильтра Калмана, дисперсия шумов измерений $\sigma_r^2 = 0,2$. Рассмотрены 1, 3, 5 и 7 гармоники. (Слева) погрешность модели $\sigma_q^2 = 0,0001$, (справа) — $\sigma_q^2 = 0,1$.

На рис. 3 (сверху) показана измеренная величина тока, когда модель Калмана описывает только основную частотную составляющую (2 переменных состояния). Как видно, измерения не так точны, а основная частота колеблется с течением времени.

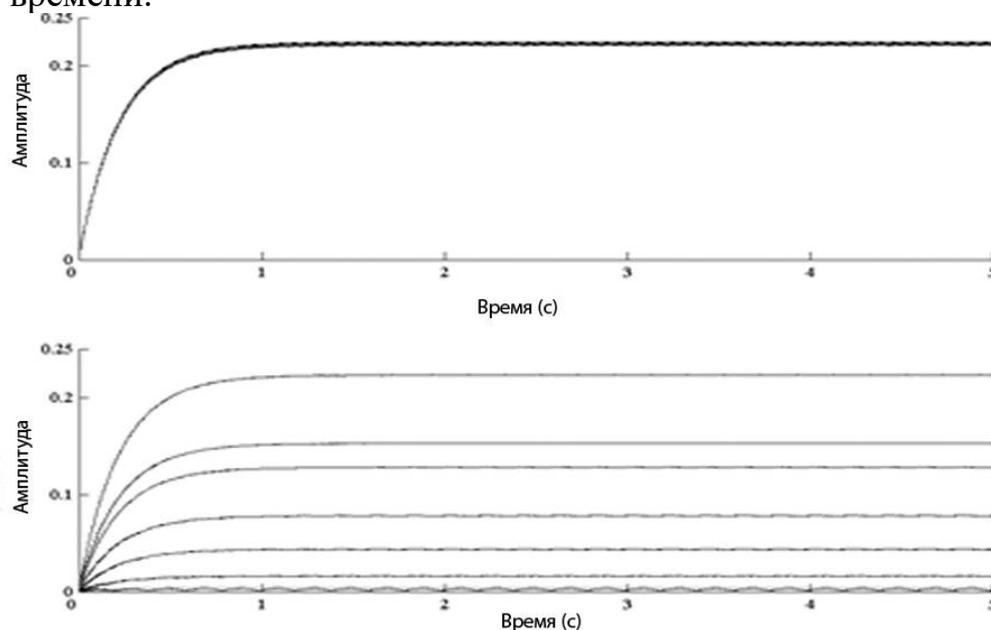


Рис. 3 – Результаты измерения амплитуд гармоник фильтром Калмана с дисперсией шумов измерений $\sigma_r^2 = 0,1$ и погрешностью модели $\sigma_q^2 = 0,0001$. Верхний график — измерения только основной частоты; нижний — измерения основной и первых 7 нечетных гармоник

Ниже, на рис. 3 проиллюстрирована измеренная величина тока основной частоты при использовании модели с большим количеством состояний путем добавления к основной первых нечетных гармоник (от 3-го до 15-го), получая таким образом 16 переменных состояния. Видно значительное улучшение точности измерения. Даже если требуется измерение только основной частоты, важно измерить также и несколько других гармоник, что значительно улучшит качество измерений в общем.

Можно сделать вывод, что фильтр Калмана измеряет гармонические составляющие достаточно точно. Однако, если параметры не будут тщательно подобраны (уравнения состояний и измерений, а также дисперсия шума), точностные характеристики фильтра Калмана ухудшаются, что приводит к большим ошибкам при измерении.

4. Сравнение методов измерения гармоник

На основании приведенных выше результатов проведено сравнение всех трех методов:

- БПФ — проводится 128 отсчетов на одном периоде основной частоты f_0 .
- Пакетное вейвлет-преобразование (ПВП) — выбраны 5-уровневая симметричная структура и вейвлет Добеши с 40 коэффициентами.
- Фильтр Калмана - модель с 16 переменными состояниями и с дисперсией шумов измерений $\sigma_r^2 = 0,5$, и дисперсией погрешности модели $\sigma_q^2 = 0,0001$.

Используется выпрямитель с резистивно-индуктивной нагрузкой.

На рис. 4 показан спектр, полученный путем применения этих трех методов измерения. Результаты показывают, что различия между тремя наборами значений незначительны.

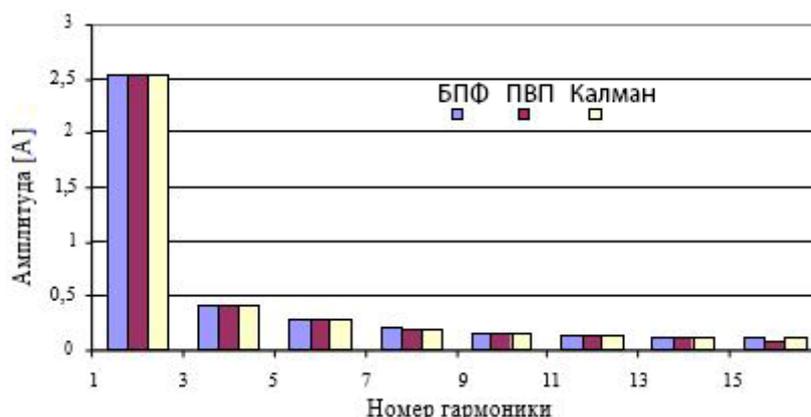


Рис. 4 – Измерение амплитуды гармоник с использованием технологий БПФ, пакетного вейвлет-преобразования (ПВП) и фильтра Калмана

Обратите внимание, что у каждого метода есть свой собственный набор параметров, тщательный выбор которых является необходимым критерием для применения данных методов в гармоническом анализе.

Заключение

В работе был проведен сравнительный анализ трех популярных методов измерения параметров гармоник тока и напряжения в промышленных сетях переменного тока. Исследовались методы быстрого преобразования Фурье, вейвлет анализа и фильтра Калмана. Показано, что они дают сходные по точности результаты, которые уступают наиболее точному методу максимального правдоподобия, но превосходят его с точки зрения экономии вычислительных ресурсов.

Литература:

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в сетях промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
2. Waller, M. Harmonics / M. Waller. – Indianapolis: PROMPT Publications, Inc., 1994.
3. Gonos, I.F. Harmonic distortion in electric power systems introduced by compact fluorescent lamps / I.F. Gonos, M.B. Kostic, F.V. Topalis // Proc. IEEE Budapest Power Tech, Paper BPT99-222-41. – 1999. – P. 1-5.
4. Schlabbach, J. Expert system measures harmonics and EMC / J. Schlabbach // IEEE Trans. on Computer Application in Power, 1994. – Vol. 7. – P. 26-29.
5. Lonie, B. Proactive Power Quality Program / B. Lonie // Power Quality Today Magazine, 1995. – Vol. 1. – No. 2. . – P. 123-128.
6. Карпов, И.В. Симметрия гармонического спектра трехфазных цепей / И.В. Карпов // Проблемы технической электродинамики, 1975. – Вып. 55. – С. 51-55.
7. DC Appliance Safety Standards Guideline through Comparative Analysis of AC and DC Supplied Home Appliances / J.-H. Ahn, D.-H. Kim, B.-K. Lee et al. // J. Electrical Eng. Technology, 2012. – No. 7. – P. 51-57.
8. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко. — М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
9. Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion / R. Arseneau, Y. Baghzouz, J. Belanger et al. // IEEE Trans. on Power Delivery, 1996. – Vol. 11. – No. 1. – P. 79-101.
10. Аррилага Д. Гармоники в электрических системах / Д. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 215 с.
11. Артюхов, И.И. Метод измерения реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока / И.И. Артюхов, М.А. Соломин, Е.В. Львова // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016: Материалы XI Междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. Саратов: ООО «Амирант», 2016. – Т.2. – С. 361-366.

12. Comparison of High-Accuracy Measurement Methods for Power Quality Characterization / E.V. L'vova, R.M. Glukhova, N.S. Vagarina et al. // Proc. of the 2017 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia: IEEE, 2017. – P. 369-374.
13. Исследования измерителей мощности в режиме несинусоидальных сигналов / О.М. Балабан, Е.В. Львова, А.А. Серанова, Ю.Б. Томашевский // Надежность и качество: сб. тр. XXII Междунар. симп.: в 2 т. – Пенза: ПГУ, 2017. – Т. 2. – С. 124-128.
14. Долинина, О.Н. Сравнительный анализ двухканальных алгоритмов оценки параметров синусоидальных сигналов в системах управления качеством электроэнергии / О.Н. Долинина, Е.В. Львова, А.А. Серанова // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. – Вып. 5. – С. 46-59.
15. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE 1459, 2000.
16. Directive 2004/22/EC of the European Parliament and of the Council of 31 March 2004 on measuring instruments OJ L 135, 30/04/2004. – P. 1–80.
17. IEC EN 62053-21 – Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2), 2003-11
18. Проблема измерения реактивной мощности несинусоидальных сигналов в системах электроснабжения / О.М. Балабан, Е.В. Львова, А.А. Серанова, Ю.Б. Томашевский // Надежность и качество: сб. тр. XXII Междунар. симп.: в 2 т. – Пенза: ПГУ, 2017. – Т. 2. – С. 128-132.
19. Методы оценки параметров гармоник напряжения в промышленных электросетях / Е.В. Львова, О.Н. Долинина, О.М. Балабан, А.В. Костин // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2017. – С. 530-537.
20. Сравнение методов оценки параметров гармоник напряжения в промышленных электросетях / Е.В. Львова, О.Н. Долинина, О.М. Балабан, Д.И. Кочанов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2017. – С. 538-544.
21. A New Methodological Approach to Quality Assurance of Energy Meters Under Non-Sinusoidal Conditions / D. Gallo, C. Landi, N. Pasquino, N. Polese // Proceed. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. – Sorrento, Italy: IEEE, 2006. – P. 1626-1631.
22. Emanuel, A.E. Powers in non-sinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning / A.E. Emanuel // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2009. – Vol. 26. – No 5. – P.1237-1244.
23. Львов, А.А. Неоднозначность методов измерения реактивной мощности в промышленных сетях переменного тока / А.А. Львов, И.И. Артюхов, М.А. Соломин // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр.

- IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 164-172.
24. Cataliotti, A. A time domain approach for IEEE Std 1459-2000 powers measurement in distorted and unbalanced power systems / A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. – Sorrento, Italy: IEEE, 2006. – P. 1357-1361.
25. Svensson, S. Measurement techniques for nonsinusoidal conditions / S. Svensson. – Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1999. – 159 p.
26. IEC, Reactive power in nonsinusoidal situations, vol. Report TC 25/wg7.
27. Микроволновый бесконтактный измеритель линейных перемещений / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов, П.А. Львов, В.М. Дорошенко // Математические методы в технике и технологиях. – 2023. – № 2 (2). – С. 75-79.
28. Lobos, T. Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD / T. Lobos, T. Kozina, H.J. Koglin // IEEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution, 2001. – Vol. 148. – P. 567-572.
29. On some spectrum estimation methods for analysis of non-stationary signals in power systems Part II: Numerical application / A. Bracale, G. Carpinelli, L.Z. Leonowicz et al. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power. – Piscataway, NJ: IEEE, 2004. – P. 245-257.
30. Yang, J.Z. A new method for power signal harmonic analysis / J.Z. Yang, C.S. Yu, C.W. Liu // IEEE Trans. on Power Delivery, 2005. – Vol. 20. – No. 2. – P. 1235-1239.
31. IEC 61000-4-7 (2009). Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, Edition 2.1, IEC, ISBN 2-8318-1062-6.
32. IEEE Std. 1159-2009. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Power & Energy Society, ISBN 978-0-7381-5939-3.
33. Gu, Y.H. Time frequency and timescale domain analysis of voltage disturbances / Y.H. Gu, M. Bollen // IEEE Trans. on Power Delivery, 2000. – Vol. 15. – No. 4. – P. 1600-1605.
34. Ribeiro, P. Wavelet transform: an advanced tool for analyzing non stationary harmonic distortion in power systems / P. Ribeiro // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Harmonics in Power Systems, 1994. – P. 573-577.
35. Pham, V.L. Wavelet-transform-based algorithm for harmonic analysis of power system transforms / V.L. Pham, K.P. Wong // IEEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution, 1999. – Vol. 148, No. 3. – P. 249-254.
36. Hamid, E.Y. Wavelet transform for RMS values and power measurements / E.Y. Hamid, Z.I. Kawasaki // IEEE Power Engineering Letters, 2001. – No. 9. – P. 49-51.
37. Girgis, A.A. Measurement and prediction of voltage flicker magnitude and frequency / A.A. Girgis, J. W. Stephens, E.B. Makram // IEEE Trans. on Power Delivery, 1995. – Vol. 10. – No. 3. – P. 1600-1605.

38. Van den Keybus, J. Development of a universal electric energy measurement and control platform for low-voltage grid-coupled applications in a deregulated electricity market / J. Van den Keybus: PhD Dissertation, K.U. Leuven, Leuven, Dec. 2003.
39. On some spectrum estimation methods for analysis of non-stationary signals in power systems Part II: Numerical application / A. Bracale, G. Carpinelli, L.Z. Leonowicz, et al. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power. – Lake Placid, NY: IEEE, 2004. – P. 260-265.
40. Yang, J.Z. A new method for power signal harmonic analysis / J.Z. Yang, C.S. Yu, C.W. Liu // IEEE Trans. on Power Delivery, 2005. – Vol. 20. – No. 2. – P. 1235-1239.
41. Николаенко, А.Ю. Прямое преобразование частоты в системе RFID на основе многоканального векторного вольтметра / А.Ю. Николаенко, А.А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации: сб. тр. V Междунар. юбилейн. науч. конф. – Саратов: ООО СОП «Лоди», 2017. – С. 563-568.
42. Львов, А.А. Основы статистической обработки измерительной информации в задачах автоматического управления: учеб. пособие для студ. вузов / А.А. Львов. – Саратов: СГТУ, 2005. – 84 с.
43. Мусатов, М.В. Применение общего метода наименьших квадратов при испытаниях АЦП / М.В. Мусатов, А.С. Моисеев, А.А. Львов // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. – № 4(51). – Вып. 3. – С. 86–88.
44. Анализ алгоритмов тестирования АЦП, основанных на методе наименьших квадратов / М.В. Мусатов, В.Б. Половикова, А.С. Моисеев, А.А. Львов // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2010. – № 4(51). – Вып. 3. – С. 156-160.
45. Synthesis of a Wideband Multiprobe Reflectometer / В.М. Kats, V.P. Meshchanov, L.V. Shikova et al. // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 2008. – Vol. 56. – No. 2. – P. 507-514.
46. Lobos, T. Power system harmonics estimation using linear least squares method and SVD / T. Lobos, T. Kozina, H.J. Koglin // Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. – Venice, Italy: IEEE, 1999. – Vol. 2. – P. 789-794.
47. Оценивание параметров квазигармонических сигналов методом максимального правдоподобия / А.А. Львов, В.П. Глазков, В.П. Краснобельмов и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2014. – № 4(77). – Вып. 1. – С. 147-154.
48. Казаков, К.В. Алгоритм двухканального оценивания параметров квазигармонических сигналов / К.В. Казаков, А.А. Львов, В.А. Пыльский // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2009. – №. 4(43). – Вып. 2. – С. 38-41.
49. Moutchkaev, A.S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Theory and Algorithm / A.S. Moutchkaev, S.-H. Kong,

-
- A.A. L'vov // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1-6. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879042.
50. Moutchkaev, A.S. Parameter Estimation of Superimposed Sinusoids by Data Matrix Subfactorization: Analysis and Results / A.S. Moutchkaev, S.-H. Kong, A.A. L'vov // Proc. of the 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering. – Saratov, Russia: IEEE, 2016. – P. 1-8. DOI: 10.1109/APEDE.2016.7879043.
51. Сравнение методов оценивания параметров квазигармонических сигналов / А.А. Львов, А.А. Серанова, Р.В. Ермаков, А.С. Мучкаев // Радиотехника, 2019. – №8(12). – С. 88-95. DOI 10.18127/j00338486-201908(12)-14.
52. Comparison of Methods for Parameter Estimating of Superimposed Sinusoids / Seranova A., Ermakov R., Sytnik A. et al. // Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 337: Recent Research in Control Engineering and Decision Making. – Springer Nature Switzerland, 2020. – P. 140-151. DOI: 10.1007/978-3-030-65283-8_12.
53. Львова, Е.В. Измерение мощности в промышленных электрических сетях цифровыми методами: обзор стандартов / О.Н. Долинина, О.А. Торопова, Е.В. Львова // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2020. – № 2 (85). – С. 5-16.