

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ В ВИДЕ 3D МОДЕЛИ

Д.В. Жматов (ИПУ РАН)

Представлена геометрическая модель анализа сети электроснабжения. Описаны методы и принципы диагностики входных параметров сети электроснабжения с применением вейвлет-анализа и построения имитационных моделей в среде графического программирования LabVIEW.

Ключевые слова: качество электроэнергии, вейвлет-анализ, идентификация, нелинейные искажения, имитационная модель.

### Введение. Эталонная геометрическая модель сети электроснабжения

При исследовании параметров качества электроэнергии в одно- и трехфазных системах электроснабжения необходимо определить наличие переходного процесса при коммутируемых режимах. Такие режимы возникают при включении/отключении силовых трансформаторов на подстанциях и при коммутациях на блочных компактных распределительных узлах городских и районных сетей.

Поэтому при определении нелинейных искажений в сети электроснабжения на определенном участке или узле энергосистемы необходим детализированный on-line анализ входных воздействий. Традиционно все современные анализаторы параметров качества электроэнергии (ПКЭ) используют непрерывное преобразование Фурье для исследования стационарных непрерывных сигналов при анализе качества электроэнергии. Однако задачу также можно решить с использованием вейвлет-анализа, при этом повышается детализация спектра сигнала по напряжениям и токам. В связи с этим рассмотрим подход, основанный на исследовании кратного-масштабных вейвлет-разложений исследуемых сигналов.

В [3] представлена процедура идентификации параметров ПКЭ на основе формирования их геометрических

образов для каждого момента времени  $t$ . Отклонение от «заданных» параметров «эталонной модели» при наличии нелинейных искажений определяется изменением геометрического образа.

В свою очередь, выбор формы фигуры осуществляется в зависимости от числа доступных измерению входных параметров при решении задач мониторинга и преобразования сигналов. Сигналы от первичных преобразователей информации (токовые клещи, гальванически развязанные трансформаторы) преобразуются в электрические параметры: токи и напряжения. Такими параметрами будем считать коэффициенты несимметрии по напряжению  $K_U$  и току  $K_I$ , а также коэффициент мощности  $K_p$ .

В качестве «эталона» выберем трехмерную сферическую модель [1].

Представим параметрическое уравнение сферы в виде:

$$\begin{cases} KU = x_0 + B_1 \times \sin \theta \cos \varphi \\ KI = y_0 + B_2 \times \sin \theta \sin \varphi \\ KP = z_0 + B_3 \times \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2)$  и  $\theta \in [0, 2\pi)$ ;  $B_1 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2}}{U_1}$ ;  $B_2 = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}}{I_1}$ ;

$B_3 = \frac{P}{S}$ ,  $P$  — активная мощность,  $S$  — полная мощность.

### Методика вейвлет-преобразования амплитуды напряжения

Главным достоинством вейвлет-анализа является возможность проследить за изменением спектральных свойств сигнала во времени и определить, какие частоты в сигнале присутствуют. Рассмотрим возможности аппарата вейвлет-анализа для исследования синусоидального периодического непрерывного сигнала.

Рассмотрим в виде порождающей функции непрерывный синусоидальный сигнал (рис. 1), ограниченный по времени и местоположению на временной оси и имеющий спектральный образ, локализованный на частотной оси. Базис пространства  $L_2(R)$  целесообразно конструировать из одной порождающей функции, норма которой должна быть равна 1. Для покрытия всей временной оси пространства используется операция сдвига (смещения по временной оси). Для покрытия всего частотного диапазона пространства  $L_2(R)$  используется операция временного масштабирования с использованием вейвлетов Морле:

$$\psi(t) = e^{-\frac{t}{2}} e^{i\omega t} \quad (2)$$

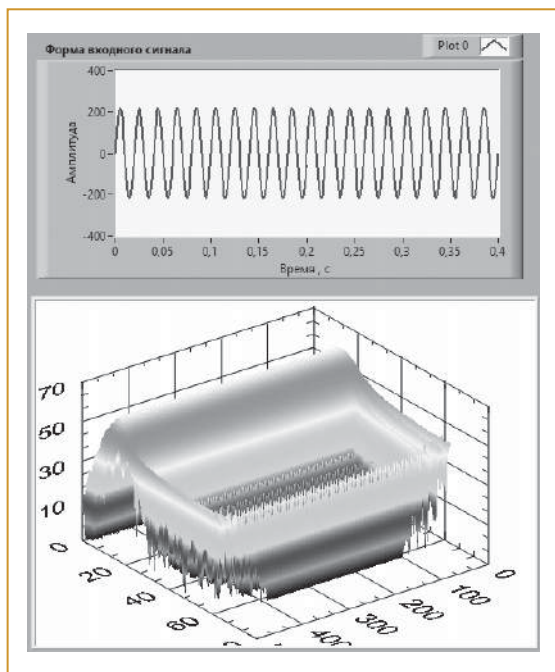


Рис. 1. Преобразование сигнала с использованием вейвлетов Морле

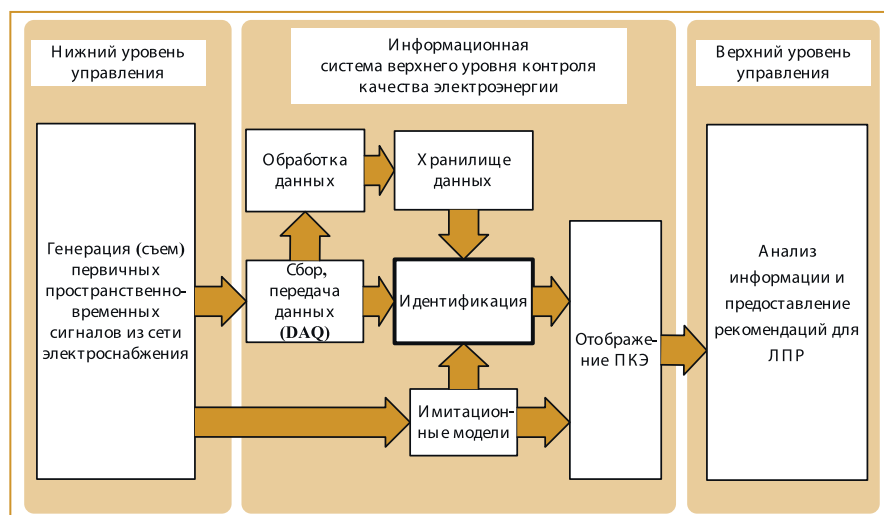


Рис. 2. Структура информационной системы контроля сети электроснабжения

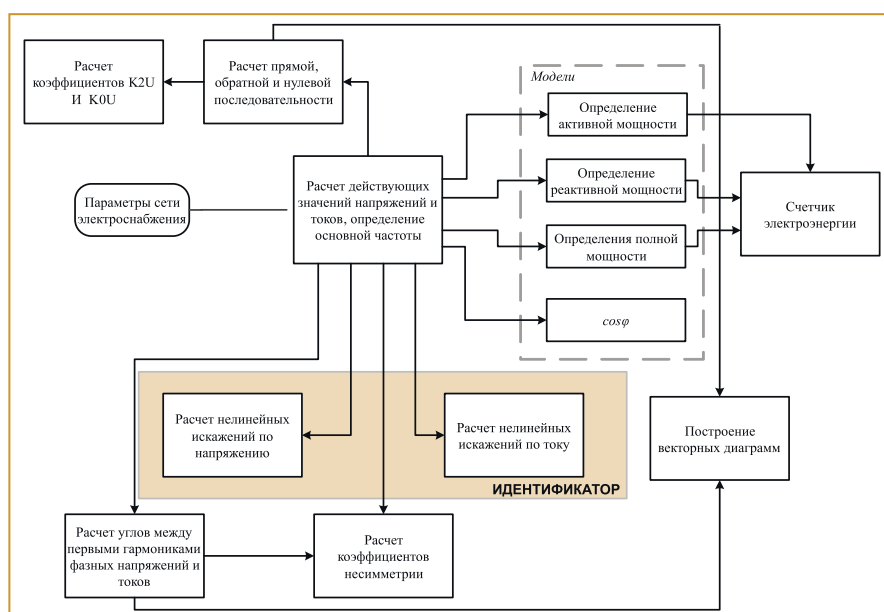


Рис. 3. Информационная модель для контроля ПКЭ

### Структура автоматизированной информационно-управляющей системы параметров качества электроэнергии

Разработана информационно-управляющая система поддержки принятия решений для контроля ПКЭ на основе идентификационных моделей. Система позволяет анализировать влияние нелинейных искажений по напряжению на качество электроснабжения и определять выбор компенсирующих устройств.

Особенность системы состоит в том, что она содержит комплекс идентификационных и имитационных моделей параметров качества электроэнергии, на основе сравнения которых с «эталонном» диспетчер принимает решение о корректировке режима сети с целью демпфировать возникающие искажения. В комплекс моделей входит получение действующих значений токов и напряжений, основной частоты, а также расчетные параметры нелинейных искаже-

ний по напряжению и току, а также учет электроэнергии.

При разработке имитационных моделей используются виртуальные приборы среды графического программирования LabVIEW. Использование виртуальных приборов позволяет сократить время на разработку ПО и повысить эффективность разрабатываемых алгоритмов.

«Блок идентификации» в информационно-управляющей системе при контроле параметров электроэнергии (рис. 2) осуществляет нахождение параметров системы (нелинейных искажений) с помощью анализа входных/выходных показателей напряжений в контролируемых узлах системы электроснабжения. Под идентификацией амплитудных искажений сигналов напряжений или токов понимается построение моделей по данным реального функционирования системы в системах электроснабжения.

Информационная модель системы поддержки принятия решений (ИУСППР) оператором для идентификации параметров качества электроэнергии, состоящая из ряда имитационных моделей приведена на рис. 3.

Имитационные модели разработаны для определения следующих ПКЭ:

- действующие значения напряжения и тока, частоты основной гармоники сетевого напряжения;
- потребленная активная, реактивная и полная электроэнергия;
- коэффициент мощности;
- фазовый сдвиг между напряжением и напряжением, током и током, напряжением и током в каждой фазе и построения векторных диаграмм;
- гармонические составляющие токов и напряжений в интервале до 50-й гармоники;
- коэффициент нелинейных искажений по напряжению и току;
- несимметрии напряжений по нулевой и обратной последовательности.

Разработанная информационно-управляющая система для анализа параметров качества электроэнергии включает программные и аппаратные средства для связи с реальными системами электроснабжения.

Рассмотрим работу имитационной модели на примере определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$ .

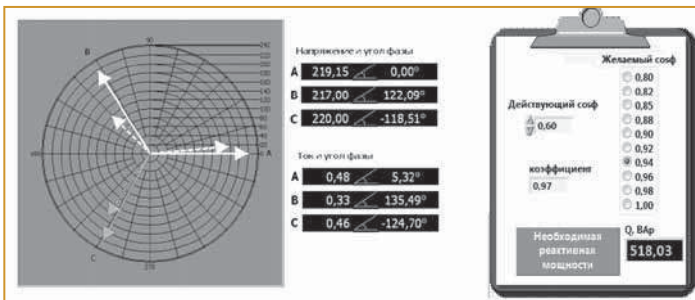


Рис. 4. Векторные диаграммы поддержки принятия решений

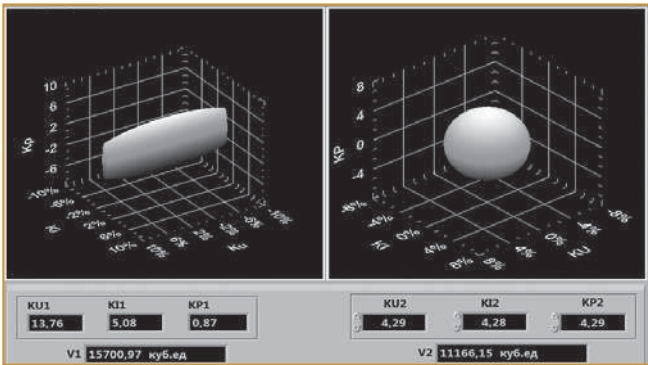


Рис. 5. Геометрическое представление параметров

#### Пример определения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения $K_U$

Общепринятой мерой нелинейных искажений, в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [2], является коэффициент нелинейных искажений. Измерение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  осуществляется для междуфазных напряжений. Для каждого  $i$ -го наблюдения за установленный период времени определяют действующие значения гармонических составляющих напряжения до 50-й гармоники.

На векторной диаграмме (рис. 4) показано потребляемое напряжение и ток из трехфазной сети асинхронным двигателем со следующими параметрами  $U_n = 380$  В,  $I_n = 2,4$  А, общей мощностью 0,75 кВт. Система определяет необходимую реактивную составляющую для выбора компенсирующих устройств.

При расчете компенсационных устройств реактивной мощности для производственных помещений используется база технологических знаний системы, из которой оператору предоставляется необходимый коэффициент мощности.

Весь процесс расчета необходимой реактивной мощности разделен на этапы: нахождение реактивной мощности системы электроснабжения в реальном времени; поиск элемента в массиве базы знаний реактивных составляющих; автоматический подбор коэффициента и расчет реактивной мощности для конденсаторной установки.

Критерии, накладывающие ограничения на модель, регламентируются ГОСТ 32144-2013 [2]. Коэффици-

**Жматов Дмитрий Владимирович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, заведующий кафедрой электротехники и электроники Московского института энергобезопасности энергосбережения.

E-mail: dmitry.zhmatov@mieen.ru

ент нелинейных искажений по напряжению КУ составляет 8%, коэффициент КР в электрических сетях напряжением до 35 кВ — в пределах 0,94...0,95, согласно приказу № 49 «Предельные значения коэффициента реактивной мощности» министерства промышленности и энергетики РФ. Выходные ПКЭ в виде геометрической модели сферы состоят из триады коэффициентов:  $K_U$ ,  $K_B$ ,  $K_P$ .

Таким образом, алгоритм идентификации заключается в сравнении параметров геометрических моделей сфер: эталонной (без искажений) и реальной. На вход имитационной модели и блок идентификации поступают одинаковые действующие значения напряжений и токов из сети электроснабжения, а коэффициенты нелинейных искажений  $K_U$ ,  $K_I$  разные.

На рис. 5 показаны конечные изменения коэффициентов нелинейных искажений по напряжению и току, а также коэффициента мощности в системе электроснабжения с асинхронным двигателем мощностью 0,75 кВт.

#### Заключение

Таким образом, на рис. 5 видно изменение объема геометрической сферы  $V_2$  от нормы  $V_1$ . Для анализа исследуется вейвлет-преобразование сигналов. Это позволит в дальнейшем повысить точность анализа режимов, при которых происходят нелинейные искажения в сетях электроснабжения.

С помощью вейвлет-анализа можно исследовать сигнал, позволяя получить частотные компоненты и их расположение на временной оси одновременно. Вейвлет-анализ является более информативным и позволяет оценить не только качественный состав параметров электрической энергии, но и временные параметры нелинейных искажений, позволяющие определить не только вид искажения, но и сопоставить его с работой определенного источника искажений [4]. Вейвлет-преобразование для анализа нестационарных режимов работы систем электроснабжения позволяет одновременно определять не только частотные компоненты исследуемых напряжений и токов, но и использовать данные функции во временной области.

#### Список литературы

1. Куско А., Томпсон М. Сети электроснабжения. Методы и средства обеспечения качества энергии. Перев. А.Н. Рабодзея. М.: Додэка-XXI. 2010. 336 с.
2. Сирмаха С.С. Алгоритмы Вейвлет-анализа при определении параметров качества электрической энергии // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 5 (5). Ч. 2. С. 22-25.
3. Черемухин В.Е., Белов Н.В., Жматов Д.В. Информационно-измерительный комплекс для анализа параметров сети электроснабжения // Энергобезопасность и энергосбережение. М.: ПТФ-МИЭЭ. 2012. №1. С. 39-43.