

**О.Г. ГРИБ**, д-р.техн.наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**Р.В. ЖДАНОВ**, инж., РЭС АК «Харьковоблэнерго», Красноград;  
**Д.А. ГАПОН**, доц. НТУ «ХПИ»;  
**А.А. ЗУЕВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ КАК ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Статья посвящена вопросу измерения частоты переменного напряжения электрической сети. Рассмотрены результаты математического моделирования различных методов измерения на примере реального сигнала, полученного с помощью цифрового регистратора. Сделаны выводы о выборе оптимального метода и интервала наблюдения при анализе качества электрической энергии.

**Ключевые слова:** энергосистема, качество электроэнергии, измерение частоты.

Частота основной гармоники питающего напряжения промышленной сети является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. Длительная работа при значительном отклонении частоты от номинального значения приводит к повышенному износу оборудования и преждевременному выходу его из строя. Понижение частоты приводит к снижению производительности многих механизмов и, как следствие, недоставке продукции. Ограничения, накладываемые нормативными и техническими требованиями на точность поддержания значения частоты, являются наиболее жесткими, по отношению к ограничениям на другие параметры электрического тока. Следует также отметить, что несоответствие частоты номинальному значению может приводить к возникновению дополнительных погрешностей при выполнении измерений других параметров электрического сигнала. Поэтому задача измерения частоты основной гармоники напряжения промышленной сети является актуальной задачей. Это подтверждается множеством публикаций в научных изданиях по всему миру, посвященных совершенствованию методов и средств измерения частоты [1-5].

При выборе метода измерения необходимо учитывать целый ряд факторов, влияющих на результаты связанных с наличием и величиной отклонений формы напряжения от синусоидальной. Так, многие методы измерения чувствительны к наличию высших гармонических составляющих и требуют обязательной предварительной фильтрации [1].

© О.Г.Гриб, Р.В.Жданов, Д.А.Гапон, А.А.Зуев, 2013

Однако, наиболее трудной задачей является отстройка измерительного органа частоты от влияния аperiodических составляющих, имеющих место во время электромагнитных переходных процессов [2]. Несмотря на относительную редкость таких явлений, они могут оказывать заметное влияние на общие результаты наблюдений. Целью данной статьи является выбор методов, позволяющих минимизировать влияние переходных процессов на эффективность измерений.

Наиболее часто применяемыми методами измерения частоты является метод выделения периода по моментам пересечения сигналом напряжения нулевого уровня с последующим пересчетом частоты [1,4], а также методы реализующие спектральный анализ с применением дискретного преобразования Фурье и его модификаций [2,4,5]. Кроме того, достаточно перспективными представляются методы измерения параметров электрических сигналов использующих аппроксимацию входного сигнала методом наименьших квадратов. Таким образом, для исследования были выбраны следующие методы измерения частоты:

- метод, на базе метода наименьших квадратов выполняющий аппроксимацию входного сигнала специальной функцией, далее обозначаемый НК;

- метод, вычисляющий значение частоты как скользящее среднее из трех последовательных значений, рассчитываемых по моментам пересечения с нулевым уровнем. Аналогичный метод применяется в устройствах ABB SPAF140C, SPAF340C, поэтому далее обозначен как ABB;

- метод, вычисляющий частоту как медиану из трех последовательных значений, полученных по моментам пересечения кривой входного сигнала с нулевым уровнем. Данный метод применяется в устройствах RELCIS и обозначен как REL;

- метод, использующих дискретное преобразование Фурье для получения комплексного вектора основной гармоники напряжения, обозначенный далее как DFT. Отклонение частоты от номинального значения вычисляется по разности углов двух векторов основной гармоники напряжения отстоящих друг от друга на время, равное одному периоду основной гармоники номинальной частоты.

Длительность интервала наблюдения для всех рассмотренных методов примерно соответствует трем периодам основной гармоники. Однако, следует отметить, что при отклонении частоты длительность интервала наблюдения для методов ABB и REL будет изменяться, в то время как для методов НК и DFT время наблюдения остается постоянным независимо от текущего значения частоты. Учитывая небольшой диапазон изменения частоты в энергосистеме, в котором допускается длительная

работа (49,0...50.5 Гц) этими отклонениями можно пренебречь. Кроме того, для метода DFT необходимо наличие двух последовательных вычисленных комплексных векторов основной гармоники, отстоящих на величину одного периода основной гармоники, поэтому, фактически, для вычисления значения частоты необходимо четыре полных периода основной гармоники. Несмотря на указанные особенности, рассматриваемые методы можно считать приближенно равными по быстродействию. Такая длительность интервала наблюдения позволяет получить достаточно высокую точность и, в то же время, позволяет отследить незначительные колебания частоты в энергосистеме, что способствует повышению точности измерения других параметров электрических сигналов. Кроме того, указанная длительность позволяет получить достаточное число измерений, для выполнения усреднения за период предусмотренный стандартом.

В качестве тестового сигнала использовались сигналы, полученные с помощью цифрового регистратора на шинах 110 кВ. Результаты измерений показаны на рис. 1.

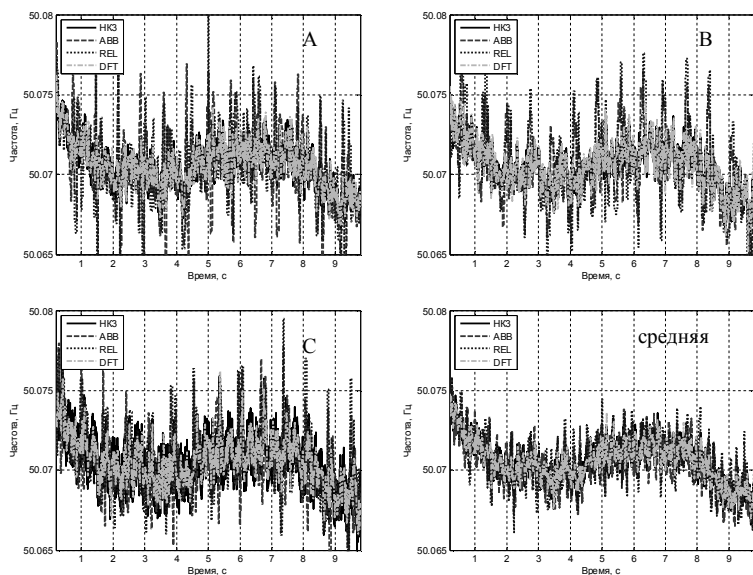


Рис. 1 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Из рисунка видно, что результат измерения содержит шумовую составляющую, которая отличается для различных методов и для различных фаз. В то же время, совпадение значений и общего характера

изменения частоты позволяет говорить о том, что измеренное значение отражает реальную скорость вращения машин в энергосистеме.

Более детально рассмотреть результаты измерения позволяют рис. 2 и 3, отражающие фрагменты измерений на промежутках длительностью 2 и 0,5 с соответственно.

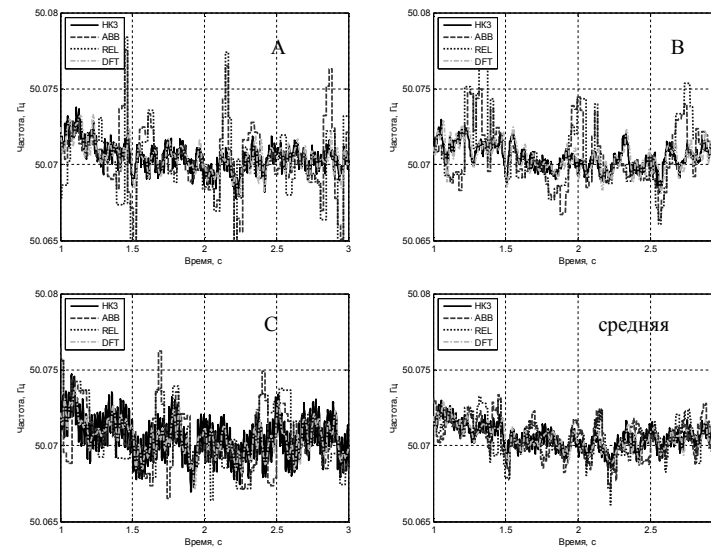


Рис. 2 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Фактически, при реализации измерения необходимо решить оптимизационную задачу, для нахождения оптимального сочетания быстродействия, помехоустойчивости и точности. Теоретически можно получить сколь угодно высокими, любые две из указанных характеристик, но в ущерб оставшейся. То есть можно получить высокую точность и быстродействие, но при этом любая помеха или искажение входного сигнала будет приводить к значительной ошибке. Реализация измерения с высокой помехоустойчивостью и точностью потребует значительного интервала наблюдения и т.д.

Логично предположить, что существует некоторый теоретический предел, преодолеть который невозможно, независимо от выбора метода измерения. Его можно найти, отталкиваясь от вероятностных характеристик шумовых составляющих. Однако, многообразие и нестационарность процессов в реальных энергосистемах не позволяет однозначно оценить характеристики всех возможных помех, поэтому предпочтение было отдано экспериментальному подходу.

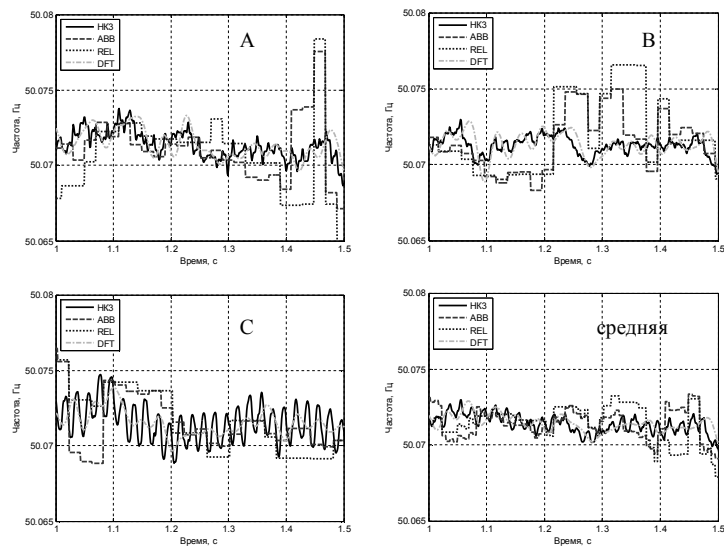


Рис. 3 – Результаты измерения частоты в фазах А, В, С и среднее значение

Анализ результатов показывает, что методы, основанные на выделении моментов пересечения нулевого уровня, уступают методам НКЗ и DFT по точности. Это объясняется тем, что, фактически, из всей информации о сигнале используется только ее небольшая часть, расположенная вблизи нулевого уровня. Вся остальная информация используется только при выполнении фильтрации. Кроме того, кривые изменения частоты, полученные методами НКЗ и DFT для фаз А и В в целом сходны, и, как правило, отличаются незначительно. Это также подтверждает достоверность полученных результатов. Колебательный характер кривой частоты, полученной методом НКЗ по напряжению фазы С может быть объяснен неучтенной шумовой составляющей в исходном сигнале.

**Выводы.** Таким образом, можно говорить, о том, что современные цифровые методы измерения частоты позволяют получить высокую точность измерения при длительности интервала наблюдения соответствующего трем-четырем периодам основной гармоники входного сигнала. Сокращение интервала наблюдения влечет за собой значительный рост погрешности как следствие более высокой чувствительности к отклонениям формы напряжения от синусоидальной формы. Увеличение интервала наблюдения не приводит к существенному повышению точности измерения. Несмотря на теоретически достижимую погрешность измерения менее 0,001 Гц влияние нелинейности и

нестационарности нагрузки не позволяет гарантированно получить погрешность менее 0,01 Гц. Методы НКЗ и DFT являются предпочтительными. Для повышения точности также может быть использовано усреднение значений частот полученных по трем фазным или линейным напряжениям. Рассмотренные методы измерения частоты могут быть успешно применены как в частотной автоматике энергосистем, так и при выполнении учета качества электрической энергии. В последнем случае необходимо производить усреднение значений, полученных в течение сравнительно больших интервалов времени, что положительно сказывается на результирующей точности и стабильности измерений.

**Список литературы:** 1. Арцишевский Я.Л. Мониторинг частоты при измерении электрических параметров режима энергосистемы в векторной форме / Арцишевский Я.Л., Журавлев Д.М. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2010. № 2. С. 63-67. 2. Lopez A. Power System Frequency Measurement Under Nonstationary Situations / Lopez A., Montao J.-C., Castilla M., Gutierrez J., Borrás M.D., Bravo J.C. // IEEE Transactions on Power Delivery – 2008 – vol.23 no.2 – P.562-567. 3. Adanir T. Extremely short term frequency estimation (ESTFE) algorithm for underfrequency protection // International Journal of Electrical Power & Energy Systems - 2007 – vol.29 no.4 P.329-337. 4. Максимов Б.К. Мониторинг частоты в переходных режимах работы электрической сети / Максимов Б.К., Арцишевский Я.Л., Климова Т.Г., Журавлев Д.М. // Электричество. 2010. № 04. С. 13-16. 5. Phadke A.G. Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions/ Phadke A.G., Kasztenny B.// IEEE Transactions on Power Delivery – 2009 - vol. 24 no.1 – P.89-95.

Надійшла до редколегії 20.01.2013

УДК 621.316

**Измерение частоты промышленной сети как показателя качества электрической энергии / О.Г. Гриб, Р.В. Жданов, Д.А. Гапон, А.А. Зуев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №.17 (990). – С.44-49. Бібліогр.: 5 назв, Іл.:3.**

Стаття присвячена питанню вимірювання частоти змінної напруги електричної мережі. Розглянуто результати математичного моделювання різних методів вимірювання на прикладі реального сигналу, отриманого за допомогою цифрового реєстратора. Зроблено висновки про вибір оптимального методу та інтервалу спостереження при аналізі якості електричної енергії.

**Ключові слова:** енергосистема, якість електроенергії, вимірювання частоти.

The article focuses on the alternating voltage frequency measurement. The results of mathematical modeling of the various measurement methods on real signal obtained with a digital recorder are given. The conclusions about the selection of the optimal method and observation interval when analyzing power quality are made.

**Keywords:** power system, power quality, frequency measurement.