УДК 621.38

On-line расчет показателей качества электроэнергии

Татьяна АББАСОВА
Tatiana S.ABBASOVA

Владимир АРТЮШЕНКО
Vladimir M.ARTUSHENKO

Артюшенко Владимир Михайлович *– доктор технических наук, профессор Финансово-технологической академии (ФТА).*
Аббасова Татьяна Сергеевна *– кандидат технических наук, доцент ФТА (г. Королёв, Московская область).*

Предложено проводить анализ показателей качества электроэнергии с помощью микропроцессоров и разработанного под эти цели программного обеспечения. Для расчета показателей создана методика формирования базы данных значений, полученных при цифровой фильтрации в режиме реального времени. В соответствии с поставленной задачей и на основе быстрого преобразования Фурье, применения алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси авторы осуществляют численный анализ способов диагностики качества электроэнергии, поступающей в сеть после преобразования постоянного напряжения в переменное.

Ключевые слова: система энергопитания, возобновляемые источники электроэнергии, центры обработки данных для железных дорог, цифровая фильтрация, алгоритм фильтрации, параметры электрической сети, показатели качества электроэнергии.

Способность электрооборудования нетяговых и нетранспортных потребителей, в том числе центров обработки данных для железных дорог, выполнять свои функции в большой степени зависит от надежности и качества электроэнергии питающей системы. Одним из эффективных способов повышения надёжности электроснабжения является применение автономных систем на базе возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ), в частности, работающих на солнечной энергии. Качество солнечного ВИЭ влияет не только на функциональные способности систем управления, релейной защиты автоматики, телемеханики, но и систем связи и вычислительной техники.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На современном этапе развития электротехнологий требуются приборы, умеющие производить анализ показателей качества электроэнергии в режиме реального времени, обладающие значительным объемом памяти, большой точностью и высоким быстродействием.

В связи с этим актуальна разработка математических моделей для расчета качества электроэнергии, полученной с помощью преобразования инвертором солнечной энергоустановки постоянного напряжения в переменное.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДИАГНОСТИКИ

При проведении численного анализа качества электроэнергии можно использовать только регламентированные ГОСТ 13109-97 расчетные формулы и процедуры.

Для достижения повышенной точности при определении показателей качества электроэнергии в режиме реального времени применяется сплайн-интерполяция функции $y=f(t)$, которая используется при расчете амплитуды и частоты входящего сигнала.

Как известно, сплайном называется кусочно-полиномиальная функция, определенная на отрезке $[a, b]$ и имеющая на этом отрезке некоторое количество непрерывных производных. Преимущества интерполяции сплайнами по сравнению с обычными методами интерполяции – в сходимости и устойчивости вычислительного процесса [1].

В соответствии с ГОСТ 13109-97 для расчета показателей качества электроэнергии и вспомогательных параметров необходимо осуществить гармонический анализ измерительных данных, основанный на преобразовании Фурье.

По этой причине, а также с целью увеличения скорости в разработанном диагностическом оборудовании был реализован алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ).

В рассматриваемой задаче диагностики качества электроэнергии алгоритм БПФ можно реализовать тремя способами.

1) Использовать микропроцессоры и прилагаемое к ним программное обеспечение, позволяющие ускорить цифровую обработку измерительных данных.

При этом необходимо разработать или купить дополнительное программное обеспечение и библиотеки программ для микропроцессоров; решить проблемы сопряжения микропроцессоров и программного обеспечения с аппаратурой и программной оболочкой разрабатываемой системы.

2) Использовать готовые и довольно громоздкие пакеты объектных библиотек, содержащих типовые операции цифровой обработки сигналов.

В этом случае могут возникнуть проблемы с надежностью и эффективностью пакетов объектных библиотек при их приспособлении к рассматриваемой задаче; следует оплачивать полный пакет объектных библиотек, хотя набор применяемых программ может составить всего лишь 5% от их общего объема.

3) Использовать в программной оболочке языки программирования высокого уровня.

Такой способ характеризуется более низкой скоростью, сложностью при тестировании программы.

Проведенный анализ показал, что для достижения повышенной точности наиболее оптимальным является способ, предполагающий применение микропроцессоров и разработку для них специального программного обеспечения.

СХЕМА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Цифровая обработка сигналов проводится по следующей схеме [2]. После проведения цифровой фильтрации измерительных данных, зарегистрированных в моменты времени $t_k = t_0 + k\times\Delta t$, $k = 0, 1,..., N$ с шагом Δt, формируется последовательность значений y_i функции $y = f(t)$.

Чтобы провести анализ показателей качества электроэнергии, совершим на отрезке $[t_0, t_N]$ интерполяцию дискретной функции $y = f(t)$ гладкой сплайн-функцией второго порядка

$$y = \Psi(t) = \{\Psi_k(t), k = 1,2,..., N-1\},$$

которая на каждом из отрезков $[t_k, t_{k+1}]$ при $k = 0, 1,..., N-1$ представляет собой квадратный трехчлен

$$\Psi_k(t) = a_k t^2 + b_k t + c_k. \quad (1)$$

Для задач диагностики качества электроэнергии наиболее целесообразным является такой вариант сплайн-интер-

поляции, когда на концах отрезков $[t_k, t_{k+1}]$ выполняются следующие условия сращивания:

$$\Psi_1(t_0) = y_0, \quad (2)$$

$$\Psi_1(t_1) = y_1, \quad (3)$$

$$\Psi_1(t_2) = y_2, \quad (4)$$

$$\Psi_k(t_k) = y_k, \quad (5)$$

$$\Psi_{k+1}(t_{k+1}) = y_{k+1}, \quad (6)$$

$$\frac{d\Psi_{k-1}}{dt}(t_k) = \frac{d\Psi_k}{dt}(t_k), \; k = 2,..., N-1, \quad (7)$$

позволяющие получить на всем отрезке $[t_k, t_{k+1}]$ гладкую функцию $y = \Psi(t)$.

Вычислим коэффициенты a_k, b_k, c_k квадратных трехчленов (1), воспользовавшись формулами (1) – (2). Вычисление будем проводить последовательно в соответствии с возрастанием индекса k, начиная со значения $k=1$, то есть с квадратного трехчлена $\Psi_1(t)$ [3].

Чтобы определить коэффициенты квадратного трехчлена $\Psi_1(t)$, вычтем из соотношения (3) соотношение (2), а из (4) – (3). В результате получим:

$$a_1(t_1^2 - t_0^2) + b_1(t_1 - t_0) = y_1 - y_0, \quad (8)$$

$$a_1(t_2^2 - t_1^2) + b_1(t_2 - t_1) = y_2 - y_1. \quad (9)$$

Поскольку $t_2 - t_1 = t_1 - t_0 = \Delta t$, то соотношения (8), (9) в результате деления на Δt преобразуются к виду

$$a_1(t_1 + t_0) + b_1 = \frac{1}{\Delta t}(y_1 - y_0), \quad (10)$$

$$a_1(t_2 + t_1) + b_1 = \frac{1}{\Delta t}(y_2 - y_1). \quad (11)$$

Вычитая из (11) соотношение (10) и учитывая, что $t_2 - t_0 = 2\Delta t$, получим выражение

$$a_1 2\Delta t = \frac{1}{\Delta t}(y_2 - 2y_1 + y_0),$$

из которого следует, что

$$a_1 = \frac{1}{2(\Delta t)^2}(y_2 - 2y_1 + y_0).$$

Далее из соотношений (10) и (11) получим выражения для остальных коэффициентов квадратного трехчлена $\Psi_1(t)$:

$$b_1 = \frac{1}{\Delta t}(y_1 - y_0) - a_1(t_1 + t_0),$$

$$c_1 = y_0 - a_1 t_0^2 - b_1 t_0.$$

Для того чтобы найти коэффициенты квадратного трехчлена $\Psi_k(t)$, в случае $k > 1$ вычтем из (6) выражение (5). Полученное соотношение совместно с (7) образует систему уравнений

$$a_k(t_{k+1}^2 - t_k^2) + b_k(t_{k+1} - t_k) = y_{k+1} - y_k \quad (12)$$

$$2a_k t_k + b_k = 2a_{k-1} t_k + b_{k-1} \quad (13)$$

с неизвестными a_k, b_k,, в которую входят коэффициенты a_{k-1}, b_{k-1} квадратного трехчлена $\Psi_{k-1}(t)$, вычисленные на предыдущем шаге.

Поскольку $t_{k+1} - t_k = \Delta t$, то в результате деления на Δt выражение (12) преобразуется к виду

$$a_k(t_{k+1} - t_k) + b_k = \frac{1}{\Delta t}(y_{k+1} - y_k). \quad (14)$$

Вычитая теперь из (14) выражение (13), получим:

$$a_k(t_{k+1} - t_k) = \frac{1}{\Delta t}(y_{k+1} - y_k) - (2a_{k-1} t_k + b_{k-1}),$$

откуда с помощью (13) и (5) находим выражения для коэффициентов квадратного трехчлена $\Psi_k(t)$:

$$a_k = \frac{1}{(\Delta t)^2}(y_{k+1} - y_k) - \frac{1}{\Delta t}(2a_{k-1} t_k + b_{k-1}), \quad (15)$$

$$b_k = 2a_{k-1} t_k + b_{k-1} - 2a_k t_k, \quad (16)$$

$$c_1 = y_k - a_k t_k^2 - b_k t_k. \quad (17)$$

Формулы (5) – (17) дают возможность рекуррентно вычислить значения функции $y = \Psi(t)$ для всех значений аргумента $t \in [t_0, t_N]$.

Следующим после подсчета коэффициентов a_k, b_k, c_k этапом алгоритма является выяснение вопроса о существовании на каждом из отрезков $[t_k, t_{k+1}]$ точек локального максимума (минимума) и нулей трехчлена $\Psi_k(t)$.

Для нахождения точек локального максимума (минимума) трехчлена вычисляются значения

$$\tilde{t}_k = -\frac{b_k}{2a_k},$$

а для определения нулей – значения

$$(t_k)_{1,2} = \frac{-b_k \pm \sqrt{b_k^2 - 4a_k c_k}}{2a_k}.$$

Те из значений $\tilde{t}_k, (t_k)_{1,2}$, которые оказываются расположенными на отрез-

ке $[t_k, t_{k+1}]$, заносятся в специальный массив. В этот массив заносятся также значения квадратного трехчлена $\Psi_k(\tilde{t}_k)$ в точках максимума (минимума).

Полученная база данных используется для расчета показателей качества электрической энергии, причем по значениям $\Psi_k(\tilde{t}_k)$ находится амплитуда входящего электрического сигнала, а по расположению нулей $(t_k)_{1,2}$ вычисляется частота.

Расчет показателей качества электрической энергии проводится параллельно с регистрацией и фильтрацией новых данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА БПФ

Как известно, преобразованием Фурье функции $x(t)$ называется функция $X(\omega)$, заданная соотношением

$$X(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)e^{-i\omega t}dt\,, \qquad (18)$$

а обратным преобразованием Фурье функции $X(\omega)$ называется соотношение

$$x(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}X(\omega)e^{i\omega}d\omega\,, \qquad (19)$$

позволяющее восстановить функцию $x(t)$, если известна функция $X(\omega)$.

Функции $x(t)$ и $X(\omega)$ считаются соответственно прообразом и образом Фурье и представляют собой аналоговый сигнал и его спектр, а независимые переменные t и ω играют роль времени и круговой частоты.

Если ввести частоту аналогового сигнала по формуле $f=\omega/2\varpi$, то соотношения (18) и (19) примут вид:

$$\hat{X}(f)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)e^{-i2\pi ft}dt\,, \qquad (20)$$

$$x(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{X}(f)e^{i2\pi ft}df\,, \qquad (21)$$

где $\hat{X}(f)=X(\omega)=X(2\pi f)$.

Поскольку диагностическое оборудование регистрирует входящий сигнал с определенным шагом h по времени, то функция $x(t)$ превращается в выборку зарегистрированных значений объема N: $x_n=x(t_0+nh)$, $n=0,1,2,...,N-1$.

Величина $1/h$ называется частотой дискретизации входящего сигнала, а половина частоты дискретизации, то есть величина $1/2h$ – частотой Найквиста.

По теореме Котельникова функция, спектр которой удовлетворяет условию $\left|\hat{X}(f)\right|<\frac{1}{2h}$, может быть полностью определена набором своих значений $\{x_n\}$.

С помощью частоты Найквиста и теоремы Котельникова можно оценить достаточность дискретизации сигнала. Действительно, если $\hat{X}(f)$ не стремится к нулю, когда $|f|\to\frac{1}{2h}$, то для повышения точности выбранную частоту дискретизации сигнала необходимо увеличить, и следовательно, шаг дискретизации h должен быть уменьшен.

Перейдем к описанию дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Для этого аппроксимируем суммой интеграл (20), вводя обозначение

$$f_k=\frac{k}{N\cdot h}\,,\ \text{где}\ k=-\frac{N}{2},-\frac{N-1}{2},...,0,...,\frac{N}{2}\,.$$

В результате получим соотношение

$$\hat{X}(f_k)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)e^{-i2\pi f_k t}dt\approx h\sum_{n=0}^{N-1}x_n e^{-i2\pi k\frac{n}{N}}\,,$$

причем формула

$$\hat{X}(f_k)=h\sum_{n=0}^{N-1}x_n e^{-i2\pi k\frac{n}{N}}$$

и называется дискретным преобразованием Фурье. Если ввести обозначение

$$\hat{X}_k=\frac{1}{h}\hat{X}(f_k)\,.$$

то, аппроксимируя суммой интеграл (21), получим соотношение

$$x(t_n)=\int_{-\infty}^{+\infty}\hat{X}(f)e^{i2\pi f\cdot t_n}df=\frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}\hat{X}_k e^{i2\pi k\frac{n}{N}}\,.$$

Таким образом, формулы прямого и обратного ДПФ имеют вид

$$\hat{X}_k = \sum_{k=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}}, \qquad (22)$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum \hat{X}(f_k). \qquad (23)$$

Если число N является степенью двойки, то расчет по формулам (22) и (23) можно значительно ускорить, применяя алгоритм БПФ.

Схема алгоритма БПФ состоит в следующем. Разобьем сумму в правой части формулы (22) на две части с отдельным суммированием по четным и нечетным индексам. Тогда из формулы (22) получается соотношение

$$\hat{X}_k = \sum_{k=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} = \sum_{s=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2s} e^{-i2\pi k \frac{2s}{N}} + \sum_{s=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2s+1} e^{-i2\pi k \frac{2s+1}{N}} \qquad (24)$$

и, если ввести обозначения

$$\hat{X}_k^0 = \sum_{s=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2s} e^{-i2\pi k \frac{2s}{N}},$$

$$\hat{X}_k^1 = \sum_{s=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2s+1} e^{-i2\pi k \frac{2s+1}{N}},$$

то формула (24) преобразуется к рекуррентному виду

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^0 + e^{-i2\pi k \frac{1}{N}} \cdot \hat{X}_k^1. \qquad (25)$$

Расчет по рекуррентной формуле (25) и является основой алгоритма БПФ.

В целом для нахождения спектра сигнала реализация алгоритма ДПФ требует порядка N^2 операций умножения и сложения. При использовании алгоритма БПФ количество операций сокращается до значения $N \times log_2 N$. Если же при реализации алгоритма БПФ применить операцию умножения с накоплением, так называемую «бабочку», то количество операций умножения и сложения сокращается до значения $\left(\frac{N}{2}\right) \cdot \log_2 N$.

В случае, когда объем выборки $N = 256$, алгоритм БПФ работает примерно в 70 раз быстрее, чем алгоритм ДПФ.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

В соответствии с изложенными исследованиями методика расчета показателей качества электроэнергии имеет в виду:

1) Анализатор качества электроэнергии измеряет входящий по каждому из каналов аналоговый сигнал в моменты времени t_n, $n = 1, 2, \ldots$ с шагом Δt. В результате измерений возникает последовательность измерительных данных x_n.

2) Затем после цифровой фильтрации последовательность измерительных данных x_n преобразуется в последовательность y_n значений дискретной функции $y = f(t)$.

3) Следующий этап цифровой обработки измерительных данных состоит в интерполяции на отрезке $[t_0, t_n]$ дискретной функции $y = f(t)$ гладкой сплайн-функцией второго порядка, которая на каждом из отрезков $[t_k, t_{k+1}]$, $k = 0, 1, \ldots, N - 1$ является квадратным трехчленом $y = \Psi_k(t)$.

4) Точки локального максимума и локального минимума квадратных трехчленов $y = \Psi_k(t)$ используются для расчета амплитуды входящего сигнала.

5) Нули квадратных трехчленов $y = \Psi_k(t)$ учитываются при расчете частоты.

6) Далее в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 осуществляется гармонический анализ функции $y = f(t)$. Для этого применяется алгоритм быстрого преобразования Фурье, использующий операцию умножения с накоплением (операция «бабочка»). Применяемый алгоритм значительно превосходит по скорости классический алгоритм дискретного преобразования Фурье.

7) В соответствии с расчетными схемами и формулами, регламентированными ГОСТ 13109-97, делается расчет показателей качества электроэнергии и других вспомогательных параметров электрической сети. Анализируются как основная гармоническая составляющая, так и высшие частотные составляющие. Расчет ведется в режиме реального времени.

В состав разработанного и созданного многоканального анализатора качества электроэнергии повышенной точ-

ности включены функционально связанные структурные элементы: блок преобразования входящих сигналов; микроконтроллер; блок автономного питания; дополнительная FLASH-память; блок цифровой фильтрации; гальваническая развязка; внешние интерфейсы.

ВЫВОДЫ

Предложенная методика применения алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси измерительных данных в задачах анализа качества электроэнергии, поступающей в сеть после преобразования постоянного напряжения с выхода автономного генератора для нетяговых и нетранспортных потребителей в переменное напряжение с помощью инвертора, позволяет проводить анализ показателей качества электроэнергии в режиме реального времени.

В результате применения алгоритма цифровой фильтрации сформирована последовательность значений yn дискретной функции y = f (t), численный анализ которой дает возможность определить все показатели качества электроэнергии и вспомогательные параметры, требуемые ГОСТ 13109-97, в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 430 с.

2. Самаров Е. К. Интерполяция функций квадратичными сплайнами и ее применение для диагностики качества электрической энергии// Материалы 10-й международной научно-практической конференции «Наука – сервису». – М.: МГУС, 2005. – С. 38–40.

3. Артюшенко В. М., Самаров Е. К. Применение алгоритма фильтрации Калмана-Бьюси в задачах анализа качества электроэнергии // Электротехнические и информационные комплексы и системы. –2006. – № 1. Т. 2. – С.17–23. ●

ON-LINE COMPUTATION OF ELECTRICAL ENERGY QUALITY RATES

Artushenko, Vladimir M. *– D.Sc. (Tech), professor of Financial and technological academy (FTA), Koroliev, Moscow region.*

Abbasova, Tatiana S. *– Ph.D. (Tech), associate professor of Financial and technological academy (FTA), Koroliev, Moscow region.*

The authors propose to analyze the quality rates of electrical power with the help of microprocessors and specially designed software. In order to compute the rates the authors created a technique to complete a database of rates through digital on-line filtering. The suggested technique of application of Kalman-Bucy filter method for filtering measured data in the problems of quality analysis of the power, which enters the network after DC voltage transformation from the outlet of autonomous generator for non-traction and non-transport customers into the AC current with the help of invertor, allows to analyze on-line electrical power quality rates. Using algorithm of digital filtering the authors have formed a sequence of values of a discrete function y = f(t). The numerical analysis of that function gives possibility to determine on-line all power quality rates as well as auxiliary rates, stipulated by state standard 13109-97.

Key words: *system of power supply, renewable electrical power sources, railway centers of data processing, digital filter, filtering algorithm, electrical network parameters, power quality rates.*

REFERENCES

1.Samarsky A.A., Gulin A.V. Numerical methods [Chislennye metody], Moscow, Nauka editions, 1989, 430 p.

2. Samarov E.K. Interpolation of functions by quadratic splines and its application for diagnostics of the electrical power quality [*Interpoliatsia funkciy kvadratichnymi splainami i ee primenenie dlia diagnostiki kachestva electricheskoy energii*]. Proceedings of 10th international scientific and practical conference "Science for services", Moscow, MGUS, 2005, pp.38-40.

3. Artushenko V.M., Samarov E.K. Application of Kalman-Bucy filter in the problems of analysis of electrical power quality [*Primenenie algoritma filtratsii Kalmana-Biusi v zadachah analiza kachestva elektroenergii*]. *Elektrotehnicheskiye i informatsionnye komplexy i system*y [Electro technical and information complexes and systems], 2006, Iss.1, Vol.2, pp.17-23.

Координаты авторов (contact information): Артюшенко В. М. (Artushenko, V.M.) – artuschenko@mail.ru, Аббасова Т. С. (Abbasova, T.S.) – abbasova_univer@mail.ru.

Статья поступила в редакцию / received 04.10.2012
Принята к публикации / accepted 22.10.2012