

МЕТОД СКОЛЬЗЯЩЕЙ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ОГИБАЮЩИХ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ В УСТАНОВИВШИХСЯ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

Любимов Э.В., Исцелемов Д.А., Караневский С.Л.

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29), e-mail: lis@pstu.ru

Для определения параметров синусоидальных сигналов, снимаемых с датчиков тока и напряжения машин переменного тока в установившихся режимах, и для определения точек огибающих этих сигналов в переходных режимах, предложен единый метод скользящей тригонометрической аппроксимации. К параметрам относятся: частота, начальная фаза, амплитудные и действующие значения напряжения и тока, а также угол сдвига фаз между напряжением и током. По огибающим вычисляются показатели качества систем регулирования и управления, а также постоянные времени и другие динамические параметры электрических машин. Метод использован в алгоритмах новых виртуальных приборов программной среды разработки «LabVIEW». Как показали проведенные исследования, предлагаемые виртуальные приборы обеспечивают при появлении помех и шумов в измерительных каналах более точное определение основных параметров сигналов и их огибающих, чем лицензионные стандартные виртуальные приборы. Работа выполнена по гранту Российского фонда фундаментальных исследований №14-07-00104 «Разработка мобильной испытательно-диагностической станции электрических машин переменного тока», а также по проектной части государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

Ключевые слова: электрические машины переменного тока, программная среда разработки «LabVIEW», виртуальный прибор, параметры синусоидальных сигналов напряжения и тока, огибающие кривых переходных процессов.

USING SLIDING TRIGONOMETRIC APPROXIMATION TO DETERMINE BASIC PARAMETERS AND ENVELOPE CURVES OF SINUSOIDAL SIGNALS IN STATIONARY AND TRANSIENT MODES

Liubimov E.V., Istselemov D.A., Karanevskiy S.L.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia (614990, Perm, Komsomolskaya Ave., 29, e-mail: lis@pstu.ru)

To determine parameters of sinusoidal signals, acquired from current and voltage sensors of AC electric machines in stationary modes, as well as dots of envelope curves of these signals in transient modes, the unified method of sliding trigonometric approximation is suggested. The determined parameters of signals are frequency, initial phase, amplitude and RMS values of voltage and current, and also phase shift angle between voltage and current. Envelope curves are used to determine quality ratings of control systems, and also time constants and other dynamic parameters of electric machines. This method is used in the algorithms of new Virtual Instruments made in LabVIEW development system. The carried out researches shows that the suggested VIs determine basic parameters and envelope curves more accurately than the Virtual Instruments from standard LabVIEW package even if the acquired signals are noisy. The work is performed under the grant of the Russian Foundation for Basic Research №14-07-00104 «The development of the mobile AC electric machines' station for testing and diagnostics» and under the design part of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation «The development of methodological foundations of adaptive control of autonomous and non-autonomous gas turbine power plants with capacity up to 25 MW».

Keywords: AC electric machines, LabVIEW development system, Virtual Instrument, parameters of current and voltage sinusoidal signals, envelope curves of transient processes.

При создании программного обеспечения систем автоматизированного управления

энергетическими установками с электрическими машинами переменного тока, а также автоматизированных систем испытаний и диагностики машин переменного тока возникает необходимость в определении параметров синусоидальных сигналов, снимаемых с датчиков тока и напряжения в установившихся режимах, и точек огибающих этих сигналов в переходных режимах. К параметрам сигналов относятся: частота, начальная фаза, амплитудные и действующие значения напряжения и тока, а также угол сдвига фаз между напряжением и током. От точности определения этих параметров зависит точность определения других важных параметров электрических машин: коэффициента мощности, активной и реактивной мощности, потерь и КПД машины. От точности определения огибающих сигналов зависят показатели качества систем регулирования и управления и точность определения постоянных времени и других динамических параметров электрических машин.

Методология и результаты

В процессе автоматизированного съема информации проблема точного определения параметров токов и напряжений в установившихся режимах и их огибающих в переходных режимах осложняется появлением в измерительных каналах помех и шумов, искажающих регистрируемые значения. В связи с этим возникает необходимость использования при обработке на компьютере эффективных методов фильтрации.

Из рассмотренных эффективных методов фильтрации следует выделить метод, который основан на использовании быстрого преобразования Фурье входного сигнала, ограниченного с помощью окна Ханна. После разложения сигнала отыскивается гармоника с наибольшей амплитудой, для которой и определяются параметры сигнала [7]. Данный метод использован в виртуальном приборе «Extract Single Tone Information VI» из поставки программной среды разработки «LabVIEW» компании «National Instrument®» [5]. А для определения точек огибающих синусоидального сигнала в переходных режимах следует выделить метод, который основан на аппроксимации кубическим сплайном точек положительных и отрицательных вершин сигнала [4]. При реализации метода требуется использование виртуального прибора «Cubic Spline Fit» [8].

В настоящей работе для определения основных параметров и огибающих синусоидальных сигналов в установившихся и переходных режимах предлагается единый метод скользящей тригонометрической аппроксимации, который, как показали проведенные исследования, обладает лучшими фильтрующими свойствами, чем вышеуказанные.

Сигнал, снимаемый в установившемся режиме с датчика тока или напряжения

электрической машины переменного тока, можно представить в виде:

$$y^* = n(t) + A^* \sin(\omega^* t + \psi^*), \quad (1)$$

где $n(t)$ – аддитивная случайная составляющая сигнала.

Аналитические преобразования на основе метода наименьших квадратов и разностных уравнений позволили получить следующие выражения:

– для вычисления угловой частоты

$$\omega^* = \frac{\pi}{N\tau}, \quad (2)$$

где τ – шаг квантования по времени,

N – число точек на половине периода;

– для вычисления амплитуды

$$A^* = \begin{cases} \frac{D}{\sin \psi^*} & \text{при } |\sin \psi^*| > 0,5, \\ \frac{C}{\cos \psi^*} & \text{при } |\sin \psi^*| \leq 0,5; \end{cases} \quad (3)$$

– для вычисления начальной фазы

$$\psi^* = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{при } |C| < 10^{-8}, \\ \arctg \frac{D}{C} & \text{при } |C| \geq 10^{-8}; \end{cases} \quad (4)$$

– для вычисления коэффициентов

$$C = k_1 B_2 - k_2 B_1, \quad D = k_3 B_3, \quad B_1 = \sum_{i=4}^{N-4} y_i, \quad B_2 = \sum_{i=4}^{N-4} y_i \sin\left(\frac{\pi}{N} i\right), \quad B_3 = \sum_{i=4}^{N-4} y_i \cos\left(\frac{\pi}{N} i\right),$$

$$k_1 = \frac{1}{\sum_{i=4}^{N-4} \sin^2\left(\frac{\pi}{N} i\right) - k_4(N-7)}, \quad k_2 = k_1 k_4, \quad k_3 = \frac{1}{\sum_{i=4}^{N-4} \cos^2\left(\frac{\pi}{N} i\right)}, \quad k_4 = \frac{1}{N-7} \sum_{i=4}^{N-4} \sin\left(\frac{\pi}{N} i\right).$$

Гарантированную точность вычисления параметров сигнала обеспечивает следующий алгоритм:

- приближенное определение точек перехода через нуль синусоидального сигнала (напряжения и тока) на основе анализа точек, тяготеющих к около нулевой зоне;
- приближенное определение периода и угловой частоты на основе данных точек;
- расчет амплитудных значений синусоидального сигнала по приведенным выражениям;
- перевод синусоидального сигнала в относительные единицы;
- разбиение полученного сигнала на интервале 4 периодов на массивы длиной в 1/4 периода,

симметричных относительно нуля;

- аппроксимация каждого из полученных массивов на участке от $-\pi/6 \div \pi/6$ уравнением регрессии первого порядка по методу наименьших квадратов и определение их коэффициентов;
- нахождение «истинных» нулей синусоидального сигнала на основе найденных коэффициентов уравнений;
- определение средних значений периода, начальной фазы и амплитуды на всем снятом процессе на основе «истинных» нулей;
- определение среднего значения угла сдвига фаз между напряжением и током на всем снятом процессе на основе «истинных» нулей.

Данный алгоритм был реализован в новом виртуальном приборе программной среды разработки «LabVIEW» [1, 3]. Сравнительный анализ результатов исследования показывает, что предложенный виртуальный прибор обеспечивает более точное определение параметров сигналов напряжения и тока чем стандартный лицензионный прибор «Extract Single Tone Information VI».

В частности, при уровне помех 20% от уровня полезного сигнала, среднеквадратичные отклонения погрешностей предложенного виртуального прибора и стандартного составляют при определении: частоты, соответственно, 0,25 % и 0,45 %; амплитуды – 2 % и 2,5 %; начальной фазы – 1 % и 2 %; угла сдвига фаз 0,5 % и 2,5 %.

В общем виде почти всякий переходный процесс рассматриваемых режимов работы машин переменного тока может быть представлен конечной суммой затухающих составляющих:

$$y = n(t) + \left(A_0 + \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t}{T_i}} \right) \sin(\omega t + \varphi) + A_a e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (5)$$

Исследования показали, что если наименьшая постоянная времени удовлетворяет условию $T_{\min} \geq \pi/2\omega$ (что соблюдается в большинстве практических случаев), то переходный процесс на участках, прилегающих к экстремальным точкам (т. е. возле амплитудных значений), может быть с достаточной степенью точности аппроксимирован эквивалентной синусоидой, т. е. функцией вида

$$y^* = A_0^* + A_1^* \sin(\omega t + \psi^*). \quad (6)$$

Аналитические преобразования на основе метода наименьших квадратов и разностных

уравнений позволили получить следующие выражения (мало отличающихся от предыдущих), по которым вычисляются параметры аппроксимирующей функции для каждого конкретного участка:

$$A_0^* = k_1 B_1 - k_2 C, \quad A_1^* = \begin{cases} \frac{D}{\sin \psi^*} & \text{при } |\sin \psi^*| > 0,5, \\ \frac{C}{\cos \psi^*} & \text{при } |\sin \psi^*| \leq 0,5, \end{cases} \quad \psi^* = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{при } |C| < 10^{-8}, \\ \operatorname{arctg} \frac{D}{C} & \text{при } |C| \geq 10^{-8}, \end{cases}$$

$$C = k_3 B_2 - k_4 B_1, \quad D = k_5 B_3, \quad k_1 = \frac{1}{\gamma_2 - \gamma_1 + 1}, \quad k_2 = k_1 \sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} \sin\left(\frac{\pi}{N} i\right),$$

$$k_3 = \frac{1}{\sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} \sin^2\left(\frac{\pi}{N} i\right) - \frac{k_2^2}{k_1}}, \quad k_4 = k_3 k_2, \quad k_5 = \frac{1}{\sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} \cos^2\left(\frac{\pi}{N} i\right)}, \quad B_1 = \sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} y_i,$$

$$B_2 = \sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} y_i \sin\left(\frac{\pi}{N} i\right), \quad B_3 = \sum_{i=\gamma_1}^{\gamma_2} y_i \cos\left(\frac{\pi}{N} i\right), \quad \gamma_1 = 4, \quad \gamma_2 = N - \gamma_1.$$

Координаты точек огибающей для рассматриваемого j -го участка процесса будут следующими:

$$Y_j = A_{0j}^* + A_{1j}^*,$$

$$t_j = (l - 1)\tau + \pi/2\omega - \psi_{j^*}/\omega + (j - 1)\tau N + (k - 1)\tau, \quad (7)$$

где l – номер начальной точки интервала обработки.

Установлено, что погрешность вычисления Y_j , t_j зависит от следующих факторов:

- от расположения экстремальной точки в пределах участка;
- от границ участка (оптимальные значения $\gamma_1 = \pi/6$; $\gamma_2 = 5\pi/6$);
- от количества зарегистрированных значений на отрезке длиной в полпериода функции (для относительной погрешности квантования не более 1% $N \geq 25$);
- от точности определения периода функции для рассматриваемого участка.

В случае искажения исходной информации влиянием помех и шумов, к данным факторам добавляется зависимость погрешности от закона распределения случайной составляющей $n(t)$ (5).

Для получения гарантированной точности вычисления координат огибающих по всему переходному процессу разработан алгоритм скользящей аппроксимации с адаптацией ее параметров к конкретным свойствам обрабатываемого процесса (рис. 1).

В алгоритме можно выделить следующие основные операции:

- разделение процесса на зоны, в пределах каждой из которых период функции можно считать постоянным;
- центрирование, т. е. определение границ $(\gamma_1; \gamma_2)$ областей, «тяготеющих» к экстремальным точкам;
- аппроксимация процесса в каждой области;
- уточнение среднего периода колебаний в пределах зоны;
- определение координат точек огибающих через параметры аппроксимирующей функции.

Операция центрирования заключается в смещении начала координат, за счет параметров сдвига k (7), таким образом, чтобы экстремальная точка (ордината огибающей) находилась, по возможности, в середине рассматриваемой области. Она осуществляется за счет итерационного процесса адаптации начальной фазы ψ_j^* к срединному положению экстремума.

Период колебаний в каждой области адаптируется к среднему периоду зоны.

Исследования показали, что алгоритм скользящей тригонометрической аппроксимации обеспечивает надежное определение точек огибающих переходных и квазиустановившихся процессов машин и аппаратов переменного тока. Он был реализован в новом виртуальном приборе комплекса программ для автоматизации испытаний синхронных турбомашин [2, 6].

Анализ результатов тестирования виртуального прибора на модельных процессах и на процессах, которые были зафиксированы при заводских стендовых испытаниях, показал: при числе точек на половине периода $N = 25$ и разрядности числа в 16 бит относительная погрешность предложенного метода при вычислении координат точек огибающих не превышает 1% ; при появлении случайной составляющей, достигающей до 30 % от уровня полезного сигнала, относительная погрешность не превышает 3 %. Такое значение погрешности обусловлено тем, что для выделения огибающих используются только участки кривой переходного процесса возле экстремальных точек.

Заключение

Для определения параметров синусоидальных сигналов, снимаемых с датчиков тока и напряжения машин переменного тока в установившихся режимах, и для определения точек огибающих этих сигналов в переходных режимах, предложен единый метод скользящей тригонометрической аппроксимации. Метод использован в алгоритмах новых виртуальных

приборов программной среды разработки «LabVIEW». Как показали проведенные исследования, предлагаемые виртуальные приборы обеспечивают при появлении помех и шумов в измерительных каналах более точное определение основных параметров сигналов и их огибающих, чем лицензионные стандартные виртуальные приборы.

Список литературы

1. Исцелемов Д.А., Любимов Э.В., Беляев Н. А. Виртуальный прибор для определения основных параметров синусоидальных сигналов в стационарных режимах // Электротехника. – 2013. – № 11. – С.32-35.
2. Исцелемов Д.А., Любимов Э.В., Нургатин Р. Ф. Комплекс программ для испытаний синхронных турбомашин // Электротехника. – 2010. – № 6. – С.27-32.
3. Любимов Э.В., Беляев Н.А., Исцелемов Д.А., Южков М.Э., Матвеев Е.А. Демонстрационный стенд мобильной испытательной станции электрических машин переменного тока // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VI Междунар. науч.-техн. интернет-конф. – Пермь: Изд-во Перм. нац. иссл. политех. ун-та, 2012. – С. 193-204.
4. Судаков А.И., Чабанов Е.А., Шулаков Н.В. Модернизация вероятностно-статистических методов исследования переходных процессов мощных синхронных машин // Электротехника. – 2010. – № 6. – С. 20-26.
5. Тревис Дж., Кринг Дж. LabVIEW для всех. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 904 с.
6. Lyubimov E., Gladyshev S., Istselemov D., Belyaev N. Software for testing alternators of heavy-duty trucks and cars // SAE World Congress 2012. – Detroit, Michigan, 2012. – 2012-01-0022. – 14P.
7. Moriat A. Fast Frequency and Response Measurements using FFTs // NIWeek, 18–20 August, 1999.
8. Overview of Curve Fitting Models and Methods in LabVIEW. 31.07.2009. URL: <http://www.ni.com/white-paper/6954/en/> (дата обращения: 17.07.2012).

Рецензенты:

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизи», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г.

Пермь;

Цаплин А.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь.