Вниманию читателей предлагается подборка статей по материалам XII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений», которая прошла в МГТУ им. Н. Э. Баумана 4—6 февраля 2013 г.

Организаторы — МГТУ им. Н. Э. Баумана, институты РАН, вузы и НИИ России. На конференции были рассмотрены фундаментальные проблемы метрологии и теории измерений, вопросы квантовой и нанометрологии, конструкции приборов и технологии измерений линейных и угловых величин, времени и частоты, измерения в психологии и медицине.

В работе приняли участие представители вузов — МГУ им. М. В. Ломоносова, МГТУ «МАИ» и «Станкин», Владимирского и Орловского государственных университетов, Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Московского государственного строительного университета, Московского института экспертизы и испытаний, Академии стандартизации, метрологии и сертификации (Н. Новгород), Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова; научно-исследовательских институтов системы РАН: ФИАН им. П. Н. Лебедева, Нижегородский филиал ИМАШ им. А. А. Благонравова, ИПУ им. В. А. Трапезникова, ИПМаш (С.-Петербург); отраслевых институтов и промышленных предприятий: ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, ЗАО «ЗЭМ» «РКК «Энергия», НИИП им. В. В. Тихомирова, ВНИИМС, НИИизмерения, ВНИИ технической эстетики.

В ряде докладов особо подчеркивалась необходимость информационно-метрологического обеспечения жизненного цикла отечественной промышленной продукции как гарантии национальной безопасности страны. При этом отмечалась важность радикальных научно-технических и инженерных решений и необходимость совершенствования законодательной базы и нормативно-технической документации в области метрологии и измерительной техники.

621.317.3

Специфика измерения вектора гармонического сигнала в случае субгармонических помех и способ их подавления

Ю. Р. АГАМАЛОВ

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия,
e-mail: agamalov@ipu.ru*

Рассмотрены особенности измерения вектора гармонического сигнала на основе метода расщепляющихся множеств дискретных отсчетов периодических сигналов в случае субгармонических помех. Предложен способ подавления таких помех и обсуждены возможности его реализации в средствах измерений активных и пассивных электрических величин.

Ключевые слова: *вектор гармонического сигнала, субгармонические помехи, частотозависимая дискретизация.*

The peculiarities of harmonic signals vector measurements based on the method splitting sets of sampling readings of periodic signals in case of subharmonic noise action are considered. A method of this noise suppression is proposed and the possibilities of its realization in instruments for measuring the active and passive electrical values are discussed.

Key words: *harmonic signal vector, subharmonic noise, frequency-dependent sampling.*

При решении разного рода измерительных задач гармоническим сигналам как более информативным по сравнению с сигналами постоянного тока принадлежит особая роль, например, в процессе исследований объектов со сложными структурами. Однако при измерениях гармонических сигналов вместе с тем осложняется защита от помех, как в случае помех, подобных измеряемому сигналу, поскольку при этом приходится фильтровать однородные сигналы с нередко очень близкими значениями частот [1, 2], так и в случае периодических помех произвольного вида, трудности фильтрации которых связаны с их широким спектром частот [3, 4].

Особую группу задач, связанных с измерениями гармонических сигналов, составляют задачи спектрального и, прежде всего, гармонического анализа сложных сигналов, являющихся носителями информации, получение которой требует измерения сигналов с кратными по отношению друг к другу значениями частот. В частности, к этой группе может быть отнесена актуальная в энергетике задача измерения высших гармоник сетевого напряжения, от решения которой во многом зависит безопасность работы турбин гидроэлектростанций.

Ниже рассмотрены особенности измерения гармонического сигнала на фоне его субгармоник по сравнению с помехами иного вида и излагается способ их подавления, в общих чертах описанный в [5].

Ранее были предложены два алгоритма [1—4], позволяющие решать задачи повышения достоверности измерений векторных величин при воздействии периодических помех. Один из них связан с раздельными измерениями совместно действующих гармонических сигналов, а другой — с подавлением сигналов помех, описываемых периодическими функциями произвольного вида, причем в обоих случаях должно выполняться требование некратности их периодов периоду измеряемого сигнала. Оба алгоритма основаны на методе расщепляющихся множеств дискретных отсчетов периодических сигналов [2, 4]. Приведем его краткое описание и покажем, почему при помощи этих алгоритмов нельзя решить рассматриваемую задачу, а затем остановимся на особенностях предлагаемого способа подавления субгармонических помех, позволяющего выйти из создавшейся ситуации.

Метод расщепляющихся множеств дискретных отсчетов основан на особой частотозависимой дискретизации периодических сигналов, реализуемой с учетом характера описывающих эти сигналы функций, а также связанных с ними математических соотношений, отражающих свойства таких сигналов. Так, для любого периодического сигнала $S(t)$, имеющего период T, справедливо соотношение

$$S(t) = S(t \pm kT),\ k = 0,\ 1,\ 2\ ...,$$

из которого следует, что разность двух дискретных отсчетов такого сигнала через интервал времени, кратный его периоду, будет равна нулю. На этом свойстве периодических сигналов основан описанный в [3, 4] алгоритм, позволяющий осуществлять измерение вектора гармонического сигнала на фоне произвольного числа периодических помех (по сути произвольного вида), однако лишь при условии, что периоды таких помех не кратны периоду измеряемого сигнала.

Если периодический сигнал $S(t)$ является к тому же гармоническим, а именно, синусоидальным или косинусоидальным, то и на положительном, и на отрицательном полупериодах он имеет одну и ту же форму. Математически это выражается соотношением

$$S(t) = -S(t \pm kT/2),$$

где k — нечетное число. Поэтому если сделать два дискретных отсчета такого сигнала, отстоящих друг от друга на расстоянии, кратном нечетному числу полупериодов, то их сумма будет равна нулю. Это свойство гармонических сигналов легло в основу описанного в [1, 2] алгоритма, позволяющего раздельно измерять произвольное число совместно действующих гармонических сигналов (также с оговоркой о необходимости соблюдения условия некратности значений их периодов друг другу).

В общем данный метод (с учетом оговоренных условий) позволяет решать задачу измерения вектора гармонического сигнала, имеющего известный период T и описываемого функцией

$$S(t) = A \sin (2\pi t / T + \varphi_0),$$

в случае действия произвольного числа аддитивных периодических помех $P_i(t)$, где $i = \overline{1, n}$, составляющих вместе с ним суммарный сигнал

$$\sigma(t) = S(t) + \sum_{i=1}^{n} P_i(t). \tag{1}$$

Неизвестные параметры сигнала $S(t)$ — амплитуду A и начальный фазовый сдвиг φ_0 определяют, например, по следующим (наиболее распространенным) математическим соотношениям:

$$A = [(p')^2 + (p'')^2]^{1/2};\ \ \varphi_0 = \mathrm{arctg}\ (p' / p'').$$

Здесь p', p'' — проекции вектора сигнала $S(t)$ на два ортогональных вектора опорных сигналов, сдвинутых друг относительно друга по фазе на $\pi/2$. Значения этих проекций получают путем частотозависимой дискретизации сигнала $\sigma(t)$ и суммирования его дискретных отсчетов. Выборку последних проводят с помощью мгновенных импульсов, действующих в моменты времени, образующие соответственно для p', p'' множества $\{t'_j\}$, $\{t''_j\} = \{t'_j + \Delta T\}$, где $\Delta T = (2k \pm 1)T/4$, $k = 0, 1, 2, ...$ При этом оба множества формируют так, чтобы сумма дискретных отсчетов сигналов помех, полученных на этих множествах, была равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i(t) = 0.$$

В результате будут справедливы следующие соотношения:

$$p' = K \sum_{j=1}^{J} a_j \sigma \{t'_j\};\ \ p'' = K \sum_{j=1}^{J} a_j \sigma (t''_j), \tag{2}$$

где K — нормирующий множитель, $K = \left[\left(\sum_{j=1}^{J} a_j \sin 2\pi t'_j / T \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{J} a_j \sin 2\pi t''_j / T \right)^2 \right]^{-1/2}$; J — общее число дискретных отсчетов суммарного сигнала $\sigma(t)$; $a_j = \pm 1$ — знаки суммирования этих отсчетов.

Таким образом, метод позволяет решать весьма широкий круг измерительных задач, связанных с измерениями гармонических сигналов на фоне периодических помех. Однако общим для указанных выше алгоритмов является условие некратности периодов фигурирующих в них сигналов. В рассматриваемом случае периоды гармонических сигналов, наоборот, кратны друг другу и поэтому здесь данные алгоритмы, как правило, применять нельзя. Проиллюстрируем это на примере простейшего случая, когда вместе с измеряемым сигналом действует одна субгармоническая помеха.

Начнем с первого алгоритма [1, 2], согласно которому для подавления одной гармонической помехи с периодом T_1 при измерении p' достаточно иметь множество $\{t_j'\}$ в виде двух моментов времени: $t_1' = t_0$; $t_2' = t_0 + (2n+1)T_1/2$, n = 0, 1, 2, ...

В данном случае $T_1/T = n_1$. Для упрощения рассуждений (без потери общности результата) примем n = 0, что соответствует сдвигу t_1' относительно t_2' на один полупериод помехи. Тогда из (2) получим выражение

$$p' = A\sin(2\pi t_0'/T + \varphi_0) + A\sin(2\pi t_0'/T + \varphi_0 + \pi n_1),$$

откуда следует, что при нечетных значениях n_1 будет справедливо тождество p' = 0 (для p'' результат будет аналогичным). Иначе говоря, вместе с нечетной субгармонической помехой в этом случае будет подавлен и полезный сигнал. Что касается четных субгармоник, то их подавление с помощью данного алгоритма возможно.

В случае использования второго алгоритма при одной помехе имеем

$$p' = A\sin(2\pi t_0'/T + \varphi_0) - A\sin(2\pi t_0'/T + \varphi_0 + 2\pi n_1),$$

откуда следует, что результат будет отрицательным и для четных, и для нечетных гармоник $S(t)$.

Таким образом, чтобы осуществить подавление субгармонических помех вне зависимости от того, являются ли они четными или нечетными, необходимо основываться на каком-то другом свойстве гармонических сигналов, связанном с суммированием их дискретных отсчетов. Остановимся на этом подробнее.

Способ подавления субгармонических помех. Поиск свойства гармонических сигналов, позволяющего реализовать подавление субгармонических помех, привел к процедуре вывода формул интегралов тригонометрических функций, связанной с предельным переходом от сумм тригонометрических рядов дискретных отсчетов синусоиды (или косинусоиды) к их определенным интегралам. При этом отсчеты значений этих функций берут через интервалы дискретизации $\Delta t_д = T_1/N$, где N — целое число; T_1 в данном случае период сигнала помехи.

В процессе анализа были найдены соотношения, положенные в основу предложенного способа подавления субгармонических помех [6, 7]:

$$\sum_{i=0}^{N-1}\sin(ix + \varphi_0) = \sum_{i=0}^{N-1}\cos(ix + \varphi_0) = 0, \qquad (3)$$

которые выполняются для $x = 2\pi/N$ при $N \geq 2$ и эквивалентны равенству нулю соответствующих определенных интегралов [6]:

$$\int_t^{t+T_1}\sin(2\pi t/T_1)dt = \int_t^{t+T_1}\cos(2\pi t/T_1)dt = 0.$$

Соотношения (3) становятся ключом к решению поставленной задачи подавления субгармонических помех, если учесть, что период субгармоники T_1 в целое число раз больше периода измеряемого сигнала:

$$\Delta t_д = T_1/N, \text{ т. е. } N = T_1/\Delta t_д.$$

Суть состоит в том, что при таком значении $\Delta t_д$, если действует одна субгармоническая помеха, то она будет подавлена, а измеряемый сигнал, наоборот, даже усилен, а точнее, умножен на $N = T_1/\Delta t_д$. Чтобы убедиться в этом, достаточно в (2) подставить (1) при условии $n = N = T_1/\Delta t_д$. Итак, в случае только одной помехи достаточно выбрать интервал дискретизации $\Delta t_д$ равным периоду T измеряемого сигнала, чтобы выполнялось требующееся для ее подавления соотношение (3). При этом минимальное время наблюдения при измерении $S(t)$ будет равным периоду помехи $T_1 = nT$.

При наличии нескольких помех интервал дискретизации должен остаться тем же, чтобы обеспечить измерение полезного сигнала. Теми же должны остаться и условия подавления сигналов помех, а именно, каждый период сигнала помехи должен состоять из целого числа дискретных отсчетов, выполняемых с интервалами, равными периоду полезного сигнала. Нетрудно показать, что для соблюдения этих условий достаточно выбрать время наблюдения

$$T_н = T(T_1/T)(T_2/T)\ldots(T_n/T) = (T^{1-n})\prod_{i=1}^{n}T_i,$$

где T_i — период i-й помехи.

Однако это соотношение является слишком общим, поскольку целое число периодов измеряемого сигнала будет укладываться на каждом из периодов сигналов помех и в том случае, когда время наблюдения будет равно наименьшему общему кратному (НОК) чисел периодов полезного сигнала, которым кратны периоды сигналов помех.

Таким образом, окончательно для решения задачи измерения вектора гармонического сигнала на фоне n субгармонических помех достаточно просуммировать дискретные отсчеты суммарного сигнала (1), сделанные через интервалы времени, равные периоду измеряемого сигнала, при времени наблюдения

$$T_н = TM, \; M = \text{НОК}\{T_i/T\}, \; i = \overline{1, n},$$

а расчеты параметров $S(t)$ провести по формулам

$$p' = K\sum_{i=0}^{M-1}\sigma(t_i'); \quad p'' = K\sum_{i=0}^{M-1}\sigma(t_i'');$$

$$K=\left[\left(\sum_{i=0}^{M-1}\sin 2\pi t_i'/T\right)^2+\left(\sum_{i=0}^{M-1}\sin 2\pi t_i''/T\right)^2\right]^{-1/2}=1/M,$$

где множество моментов времени $\{t_i'\}$ выборки дискретных отсчетов суммарного сигнала $\sigma(t)$ формируют в виде

$$t_i'=Ti,\ i=\overline{0,\ M-1}.$$

При вычислении проекций p', p'' вектора измеряемого сигнала на оси ортогональных опорных напряжений важным фактором является также инвариантность (3) по отношению к φ_0, которая непосредственно следует из тригонометрической формулы для синуса суммы углов, с учетом которой имеем

$$\sum_{i=0}^{N-1}\sin(2\pi i/N+\varphi_0)=\cos\varphi_0\sum_{i=0}^{N-1}\sin 2\pi i/N+$$

$$+\sin\varphi_0\sum_{i=0}^{N-1}\cos 2\pi i/N=0,$$

так как обе суммы в правой части равенства согласно (3) являются нулями, причем как при четном, так и нечетном N.

Отметим, что из (3) также следует, что алгоритм [1, 2] фактически является частным случаем применения этого выражения при N = 2, и предлагаемый способ можно считать обобщением указанного алгоритма.

Выводы. Предложенный способ подавления субгармонических помех является дальнейшим развитием метода расщепляющихся множеств дискретных отсчетов периодических сигналов. Благодаря более простому, а именно целочисленному, соотношению периодов измеряемого сигнала и сигналов помех реализация этого способа существенно проще, чем алгоритмов [1—4]. Если измерения вектора гармонического сигнала проводятся при комбинации различных типов помех в присутствии четных субгармоник, то более рациональной может оказаться организация подавления помех, аналогичная описанной в [1—4].

Предложенный способ может быть реализован в средствах измерений как активных (в частности, при гармоническом анализе периодических сигналов, например, в энергетике для диагностирования механических объектов с вращающимися блоками), так и пассивных (прежде всего комплексных) электрических величин, например, в измерителях иммитанса, где в качестве тестового служит полигармонический сигнал. Перспективы и эффективность применения способа находятся в прямой зависимости от уровня интеллектуализации средств измерений, а также от динамических показателей интегральной элементной базы.

Случай измерения гармонического сигнала на фоне помех, выступающих в виде гармоник высшего порядка, требует особого рассмотрения.

Литература

1. **Пат. 2377577 РФ.** Способ измерения вектора гармонического сигнала / Ю. Р. Агамалов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 26.

2. **Агамалов Ю. Р.** Метод измерения векторов совместно действующих гармонических сигналов на основе их дискретизации и суммирования дискрет // Метрология. 2010. № 12. С. 26—35; **Agamalov Yu. R.** A method of measuring the vectors of jointly acting harmonic signals by sampling them and summing the samples // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 12. P. 1342—1347.

3. **Пат. 2466413 РФ.** Способ измерения вектора гармонического сигнала / Ю. Р. Агамалов // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 31.

4. **Агамалов Ю. Р.** Алгоритм измерения вектора гармонического сигнала, инвариантный к помехам, описываемым периодическими функциями // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 43—46; **Agamalov Yu. R.** An algorithm for measuring the vector of a harmonic signal, invariant to interference described by periodic functions // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 12. P. 1408—1412.

5. **Агамалов Ю. Р.** Способ измерения гармонического сигнала на фоне субгармонических помех // Состояние и проблемы измерений: Сборник материалов XII Всеросс. науч.-техн. конф. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 4—6 февраля 2013 г. С. 36—39.

6. **Хэмминг Р. В.** Численные методы. М.: Наука, 1972.

7. **Прудников А. П., Брычков Ю. А, Маричев О. И.** Интегралы и ряды. В 3-х т. Т. 1. Элементарные функции. М.: Физматлит, 2003.

Дата принятия 20.05.2013 г.