

УДК 621.3.083

В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко

Методика вычисления коэффициента гармоник сетевого тока в трехфазной сети

Предложена методика вычисления коэффициента гармоник тока сети, основанная на математическом аппарате перехода к синхронной вращающейся dq -системе координат в дискретной форме с последующей статистической обработкой накопленных в течение полного периода первой гармоники отсчетов. Предложенная методика позволяет в реальном времени оценивать качество фазного тока в трехфазной сети и может быть реализована на микроконтроллере, не имеющем аппаратной поддержки функций цифровой обработки сигналов. Из результатов моделирования и экспериментов следует, что процесс вычисления коэффициента гармоник сетевого тока по предложенной методике значительно быстрее в сравнении с методом спектрального анализа.

Ключевые слова: вычисление коэффициента гармоник, трехфазная сеть, активный силовой фильтр, качество сетевого тока.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-116-121

В последнее время для улучшения качества сетевого тока в трехфазных сетях вместо пассивных фильтров используются активные силовые фильтры (АСФ) [1–3]. Они имеют ряд преимуществ: во-первых, кроме компенсации высших гармоник тока АСФ позволяют компенсировать реактивную мощность, во-вторых, компенсация высших гармоник тока может осуществляться в более широких пределах по сравнению с пассивными компенсаторами. АСФ представляет собой полупроводниковый преобразователь, выполненный на полностью управляемых силовых элементах (как правило, IGBT транзисторах). Управление силовыми элементами осуществляется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ), при этом измерение сетевых токов, токов нагрузки и компенсации, а также расчет сигнала-задания на ток компенсации должны производиться в реальном времени на каждом такте ШИМ в соответствии с заложенной в алгоритм работы АСФ стратегией компенсации.

Существует ряд факторов, влияющих на качество компенсации гармонических составляющих тока сети. Среди них – инерционность системы управления АСФ и ограниченный рабочий диапазон частот АСФ. С целью улучшения качества компенсации гармонических составляющих был предложен ряд алгоритмов [4–6], однако оценка качества компенсации в результате применения того или иного алгоритма осуществлялась по косвенным признакам. В представленных алгоритмах приведение соответствия численного значения некоторого признака к определенному значению коэффициента гармоник сетевого тока осуществлялось посредством моделирования и последующего экспериментального исследования прототипа АСФ в определенных условиях. В первом случае расчет коэффициента гармоник тока осуществлялся посредством встроенных методов среды моделирования, во втором – с помощью специализированных измерительных приборов. Очевидно, что такие подходы не могут гарантировать достаточной достоверности в условиях реальной эксплуатации АСФ. Изменить ситуацию можно,

измеряя коэффициент гармоник сетевого тока непосредственно в точке общего присоединения, однако установка дополнительного измерительного оборудования повлечет удорожание АСФ. Также существует возможность вычисления коэффициента гармоник тока сети, например, методом спектрального анализа, зная отсчеты мгновенных значений фазных токов с последующей их обработкой посредством алгоритма дискретного или быстрого преобразования Фурье (БПФ) [7, 8]. Такие подходы получили весьма широкое распространение в последнее время. Многие современные микроконтроллеры имеют встроенные аппаратные средства для цифровой обработки сигналов и, по сути, являются цифровыми сигнальными процессорами (ЦСП).

Оценка машинных ресурсов, необходимых для вычисления коэффициента гармоник тока методом спектрального анализа

Для сравнения существующих и предлагаемой методик необходимо оценить затраты машинных ресурсов, требуемых для их реализации. Для этого были использованы рекомендации по применению специализированной функции комплексного БПФ из библиотеки цифровой обработки сигналов CMSIS DSP Software Library для микроконтроллеров ARM архитектуры [9, 10].

В общем случае коэффициент гармоник тока ($K_{ГТ}$) рассчитывается по известной формуле

$$K_{ГТ} = \sqrt{\sum_{n=2}^m \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}, \quad (1)$$

где I_1 – амплитуда первой гармоники, I_n – амплитуда n -й гармоники, m – максимальный номер гармоники.

В реальной системе максимальный номер гармоники целесообразно задавать исходя из частоты дискретизации в соответствии с теоремой Котельникова. Кроме того, для оценки качества тока сети допускается задавать максимальный номер гармоники не выше 40-й [11].

Последовательность операций для вычисления $K_{ГТ}$ с применением функций библиотеки CMSIS

DSP Software Library для одной фазы показана на рис. 1. В трехфазной системе эта последовательность выполняется трижды с последующим усреднением результатов.

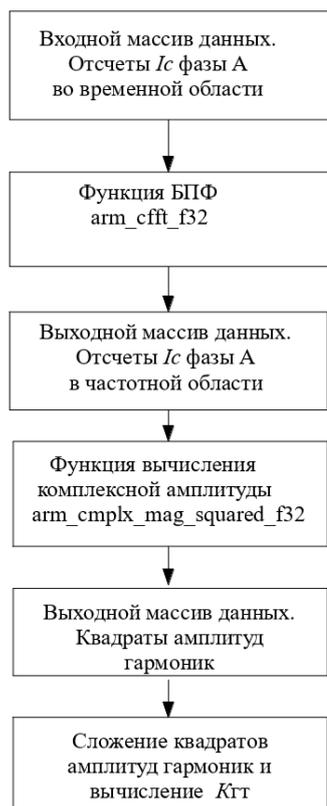


Рис. 1. Последовательность вычисления $K_{ГТ}$ с применением функций CMSIS DSP Software Library

Для машинной арифметики с плавающей запятой, функция комплексного БПФ `arm_cfft_f32` поддерживает фиксированный размер входного массива данных, кратный степени числа 2: от 16 до 4096 элементов (точек). Каждая точка представлена в виде реальной и мнимой части [9]. Этот же массив данных служит и для размещения результатов комплексного БПФ. Чтобы извлечь из результата комплексного БПФ квадраты амплитуд гармоник, необходимо воспользоваться функцией `arm_cmplx_mag_squared_f32`, результат выполнения которой размещается в новом массиве данных. Затем из полученных квадратов амплитуд по формуле (1) вычисляется $K_{ГТ}$. Для оценки машинных ресурсов, необходимых для вычисления $K_{ГТ}$, были выбраны входные массивы размером 64, 256 и 1 024 точки. Расчет машинного времени производился в среде разработки IAR Embedded Workbench for ARM версии 7.80 в режиме эмуляции с опцией максимальной оптимизации по скорости выполнения для ЦСП STM32F407VG с тактовой частотой 168 МГц. Полученные в ходе расчетов затраты машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1, для вычисления $K_{ГТ}$ для трех фаз по 64 точкам методом спектрального анализа требуется 78 мкс машинного времени и 768 байт

оперативной памяти. При этом максимальный номер гармоники ограничен 32. Для вычисления $K_{ГТ}$ по 1 024 точкам потребуется 1 935 мкс и 12 Кбайт оперативной памяти. Так как для системы управления АСФ задача вычисления $K_{ГТ}$ не является приоритетной и будет выполняться в фоновом режиме, значит, и увеличится временной интервал от момента начала до момента окончания вычисления на неопределенное время. Указанные недостатки метода затрудняют его применение в системах управления АСФ.

Таблица 1
Затраты машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ методом спектрального анализа

	Размер входного массива данных, точек		
	64	256	1 024
Суммарное время вычисления, мкс	78	417	1 935
Требуемый размер оперативной памяти, байт	768	3072	12 288

Предложенная методика вычисления $K_{ГТ}$

Во многих реализациях трехфазных параллельных АСФ для вычисления тока компенсации используется метод активных и реактивных компонент тока (`id-iq-method`) [12]. Применение этого метода предполагает переход от фазной к синхронной вращающейся dq -системе координат посредством преобразований Е. Кларк [13] и Парка [14] (в отечественной литературе известного как преобразование Парка–Горева).

Для дискретной системы, которой является система управления АСФ, математический аппарат перехода к синхронной вращающейся системе координат имеет прямую аналогию с дискретным преобразованием Фурье (ДПФ). Так, базисные функции ДПФ [8] записываются как

$$C_k[n] = \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (2)$$

и

$$S_k[n] = \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad (3)$$

где $C_k[n]$ и $S_k[n]$ – косинусный и синусный сигналы длиной N отсчетов, k – порядок гармоники, n – текущий отсчет. Тогда для первой гармоники уравнение синтеза сигнала будет представлено в следующем виде:

$$X[n] = \text{Re } \bar{X} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \text{Im } \bar{X} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (4)$$

Матрица поворота преобразования Парка–Горева выглядит как

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $i\alpha$ и $i\beta$ – мгновенные значения тока сети в обобщенной $\alpha\beta$ -системе координат, id и iq – мгновенные значения тока сети в синхронной вращающейся dq -системе координат, θ – угол поворота (рис. 2).

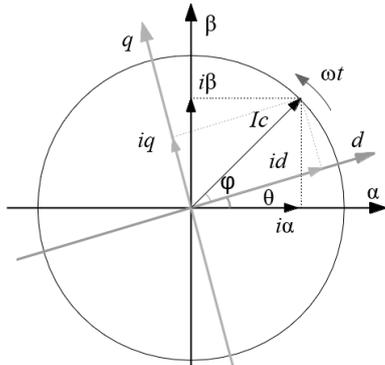


Рис. 2. Обобщенная $\alpha\beta$ - и синхронная вращающаяся dq -системы координат

Выразив угол поворота θ в дискретном виде

$$\theta = \frac{2\pi n}{N} \quad (6)$$

и подставив в (5), получим выражение для id , которое идентично (4), где в качестве действительной и мнимой частей сигнала выступают значения $i\alpha$ и $i\beta$ соответственно:

$$id = i\alpha \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + i\beta \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (7)$$

Подобным образом можно выразить и iq . Из приведенной аналогии, опираясь на свойства ДПФ, можно заключить, что в дискретной системе для синхронной вращающейся dq -системы координат, синхронизированной по первой гармонике, при наличии массива мгновенных значений тока сети размером в N элементов среднее значение по каждой координате будет эквивалентно амплитуде первой гармоники:

$$I_1 = \sqrt{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2}, \quad (8)$$

а отклонение от среднего значения следует рассматривать как наличие высших гармоник. Таким образом, вычислить $K_{ГТ}$ можно, рассчитав среднеквадратичные отклонения от среднего значения тока по каждой из координат:

$$K_{ГТ} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (id_k - \bar{id})^2 / N + \sum_{k=1}^N (iq_k - \bar{iq})^2 / N}{\bar{id}^2 + \bar{iq}^2}}. \quad (9)$$

Последовательность операций для вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике показана на рис. 3. Первая операция – вычисление средних значений обобщенного тока сети в dq -координатах выполняется методом «плавающего усреднения» [4–6]. В этом случае нет необходимости производить суммирование на всем интервале усреднения при каждом измерении, достаточно из общей суммы вычесть выбывающее из выборки значение и прибавить новое (рис. 4). Всего для вычисления среднего значения необходимо затратить три математические операции согласно выражению

$$\bar{id} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N id_k = \frac{1}{N} \left[\sum_{k=i}^{N+i} id_k - id_i + id_{N+i+1} \right], \quad (10)$$

где N – число отсчетов в выборке на интервале усреднения, k – номер отсчета, i – номер первого отсчета в выборке.



Рис. 3. Последовательность вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике

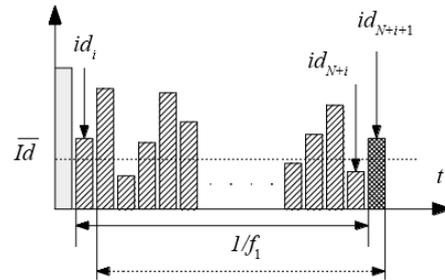


Рис. 4. Вычисление среднего значения id методом «плавающего усреднения»

По такому же принципу вычисляется и квадрат среднеквадратического отклонения от среднего, после чего выполняется итоговый расчет $K_{ГТ}$ по формуле (9). Таким образом, появляется возможность иметь актуальный $K_{ГТ}$ после каждого внесения в выборку мгновенных значений тока сети, однако достоверным результат будет только после полного заполнения выборки на интервале усреднения измеренными значениями.

Расчет машинного времени, необходимого для вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике, производился в среде разработки IAR Embedded Workbench for ARM версии 7.80 в режиме максимальной оптимизации по скорости выполнения для ЦСП STM32F407VG с тактовой частотой 168 МГц. Полученные в ходе расчетов затраты машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ представлены в табл. 2.

Сравнив данные из табл. 1 и 2, можно сделать вывод, что при сходных потребностях в оперативной памяти вычисление по предложенной методике вы-

полняется значительно быстрее, чем вычисление методом спектрального анализа.

Таблица 2
Затраты машинных ресурсов для вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике

	Размер входного массива данных, значений		
	64	256	1024
Суммарное время вычисления, мкс	38	181	652
Требуемый размер оперативной памяти, байт	656	3088	12 304

Моделирование и экспериментальные исследования

Для верификации предложенной методики вычисления $K_{ГТ}$ в среде имитационного моделирования устройств силовой электроники Psim была разработана имитационная модель. Блок-схема имитационной модели представлена на рис. 5. Параметры модели:

- трехфазная питающая сеть 0,4 кВ;
- нелинейная нагрузка в виде трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя и RLC-цепи, где $L = 1,5$ мГн, $R = 1$ Ом, $C = 15$ мкФ.

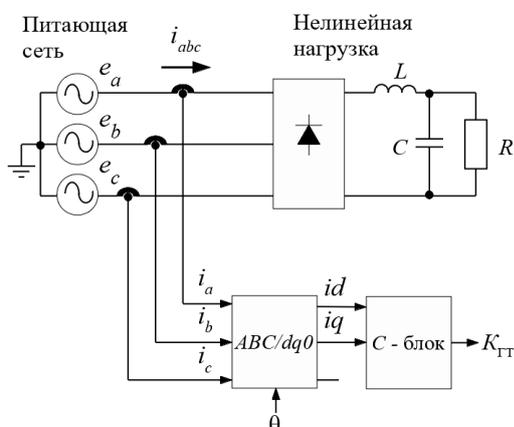


Рис. 5. Блок-схема имитационной модели, выполненная в среде Psim

Алгоритм вычисления $K_{ГТ}$ реализован на языке С и выполнялся в составе С-блока, на который поступали мгновенные значения тока сети i_d и i_q после преобразования в синхронную dq -систему координат (блок «ABC/dq0»).

Моделирование проводилось при размерах входного буфера в 64, 256 и 1 024 значений. Результат моделирования показан на рис. 6, где e_a – сетевое напряжение фазы А, i_a – ток фазы А, $K_{ГТ}$ – вычисленный по предложенной методике усредненный коэффициент гармоник тока для трех фаз. Как видно из результатов моделирования, $K_{ГТ}$ меняется скачкообразно в незначительных пределах, обусловленных погрешностями вычисления при моделировании на каждом такте дискретизации. Вычисленный предложенным способом $K_{ГТ}$ численно соответствовал коэффициентам гармоник токов фаз А, В и С, полученным встроенными средствами анализа пакета моделирования Psim с точностью до третьего знака

после запятой. Этот факт свидетельствует об адекватности предложенной методики вычисления $K_{ГТ}$.

Проверка реального времени вычисления проводилась на прототипе АСФ [15] с микропроцессорной системой управления (МПСУ), выполненной на базе ЦСП STM32F407VGT6 с тактовой частотой 168 МГц.

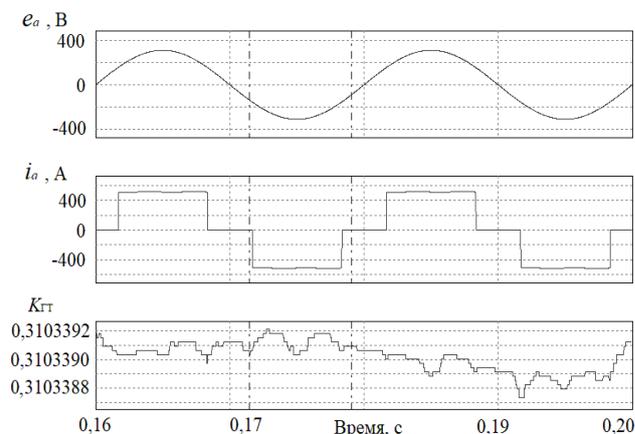


Рис. 6. Результаты моделирования, полученные в среде Psim

Для этого в ходе выполнения встроенной программы перед началом вычисления на заданном выводе ЦСП устанавливался высокий логический уровень, а после окончания – низкий. Время нахождения вывода ЦСП в высоком логическом состоянии измерялось с помощью цифрового осциллографа АК ИП-4115/3А. Полученная экспериментальная оценка времени вычисления $K_{ГТ}$ приведена в табл. 3.

Таблица 3
Оценка времени вычисления $K_{ГТ}$, полученная экспериментально

	Размер входного массива данных, точек		
	64	256	1 024
Время вычисления $K_{ГТ}$ методом спектрального анализа, мкс	120	620	2750
Время вычисления $K_{ГТ}$ по предложенной методике, мкс	64	266	1 010
Разность, мкс (%)	56 (46%)	354 (57%)	1 740 (63%)

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что вычисление $K_{ГТ}$ в трехфазной сети по предложенной методике более чем в 2 раза эффективнее, чем вычисление $K_{ГТ}$ отдельно по каждой фазе методом спектрального анализа с последующим усреднением.

Также в ходе эксперимента была выполнена реализация предложенной методики на отечественном микроконтроллере 1986ВЕ1ТК производства ПКК «Миландр», который не поддерживает на аппаратном уровне операции с плавающей запятой и функции ЦСП. Вычисление тригонометрических функций было реализовано табличным способом и производилось нормирование мгновенных значений в

выборке с тем, чтобы результаты вычислений не вызвали переполнения целочисленных переменных. Затраты на вычисление $K_{ГТ}$ были сопоставимы с приведенными для ЦСП, что говорит о пригодности предложенной методики для реализации на неспециализированных микроконтроллерах.

Заключение и выводы

В ходе проведенной работы предложена методика вычисления коэффициента гармоник тока для трехфазной сети переменного тока. Она основана на статистическом анализе выборки мгновенных значений фазных токов в синхронной вращающейся dq -системе координат, синхронизированной по напряжению фазы А. В ходе исследования показано, что предложенная методика дает преимущество по скорости вычисления более чем в два раза по сравнению с методом спектрального анализа, основанным на быстром преобразовании Фурье, в случае последовательного вычисления коэффициента гармоник по каждой фазе с последующим усреднением.

Другим достоинством предложенной методики является то, что число значений в выборке для анализа может быть не кратным 2^n . Это упрощает структуру аппаратной части системы управления АСФ, так как число значений в выборке связано с частотой дискретизации и кратностью ШИМ. Предложенная методика не предполагает использование аппаратных функций цифровой обработки сигналов и пригодна для неспециализированных микроконтроллеров. Кроме того, становится возможным иметь результат расчета коэффициента гармоник на каждом такте дискретизации при условии, что вся выборка заполнена актуальными значениями.

Наиболее хорошо предложенная методика подходит для систем управления АСФ, в которых для вычисления сигнала-задания на ток компенсации реализован метод активных и реактивных компонент тока (id - iq method), в этом случае результаты математических преобразований, выполняемых в ходе вычисления тока компенсации, также используются и для вычисления коэффициента гармоник. Сфера применения предложенной методики не ограничивается АСФ, возможно её применение в любых трехфазных системах, где существует необходимость контроля коэффициента гармоник тока.

Литература

1. Akagi H. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning / H. Akagi, E.H. Watanabe, M. Aredes. – USA: John Wiley & Sons, 2007. – 379 p.
2. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1996. – Vol. 32, Iss. 6. – P. 1312–1322.
3. Montero M.I.M. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems / M.I.M. Montero, E.R. Cadaval, F.B. González // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2007. – Vol. 22, No. 1. – P. 229–236.
4. Routimo M. A Novel Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for an Active Power Filter / M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 35-th Annual IEEE Power

Electronics Specialists Conference. – Aachen, Germany, 2004. – P. 3215–3220.

5. Pettersson S. A Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for a Four-Wire Active Power Filter / S. Pettersson, M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 12-th International Power Electronics and Motion Control Conference. – Portoroz, Slovenia, 2006. – P. 1648–1653.

6. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method / V.G. Tokarev, S.V. Brovanov, A.A. Yakimenko, A.V. Sidorenko, D.V. Solovlev // The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM). – Erlagol, Altai, 2016. – P. 577–582.

7. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: справочник / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.

8. Смит С. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / пер. с англ. А.Ю. Линовича, С.В. Витязева, И.С. Гусинского. – М.: Додэка XXI в., 2011. – 720 с. [Электронное издание на CD].

9. CMSIS DSP Software Library Version 1.7.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>, свободный (дата обращения: 01.08.2019).

10. AN4841 Application note. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00273990.pdf, свободный (дата обращения: 01.08.2019).

11. ГОСТ Р 30804.3.12–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. Введ. 2014-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 22 с.

12. Soares V. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current id - iq method / V. Soares, P. Verdelho, G.D. Marques // The 28 annual IEEE power electronics specialists conference, PESC'97 Record. – USA, 1997. – Vol. 2. – P. 1096–1101.

13. Duesterhoeft W.C. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components / W.C. Duesterhoeft, M.W. Schulz, E. Clarke // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1951. – Vol. 70, No. 2. – P. 1248–1255.

14. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1929. – Vol. 48, No. 3. – P. 716–727.

15. Имитационная и экспериментальная верификация прогнозирующего алгоритма управления активным силовым фильтром / В.Г. Токарев, С.В. Брованов, М.А. Дыбко, А.В. Удовиченко // Труды Семнадцатой Междунауч.-техн. конф. «Электроприводы переменного тока». – Екатеринбург, 2018. – С. 28–33.

Токарев Вадим Геннадьевич

Ст. преп. каф. вычислительной техники Новосибирского государственного технического ун-та (НГТУ)
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия. 630073
ORCID 0000-0002-3085-1477
Тел.: +7 (383-3) 46-11-53
Эл. почта: v.tokarev@corp.nstu.ru

Брованов Сергей Викторович

Д-р техн. наук, проректор по учебной работе НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (383-3) 46-04-22
Эл. почта: brovanov@corp.nstu.ru

Дыбко Максим Александрович

Канд. техн. наук, зам. зав. каф. электроники
и электротехники НГТУ
К. Маркса пр-т, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073
ORCID 0000-0002-5498-7010
Тел.: +7 (383-3) 46-48-14
Эл. почта: dybko@corp.nstu.ru

Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A.

Technique to calculate total harmonic distortion of phase current in a three-phase power system

In this paper, a technique to calculate the total harmonic distortion of the line current in a three-phase power system is proposed. This technique uses mathematical equations describing a transition to a synchronous rotating reference frame in the discrete form and statistical treatment of data accumulated during the period of the fundamental harmonic.

The proposed technique allows to evaluate the quality of the line current in a three-phase power system in real time and can be implemented on a microcontroller that does not have a digital signal processing feature.

Simulation results and experiments have shown that calculation of the total harmonic distortion of phase current in a three-phase power system by the proposed technique is much faster than by the spectral analysis method.

Keywords: total harmonic distortion calculation, three-phase power system, active power filter, power quality.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-116-121

References

1. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. USA, John Wiley & Sons, 2007, 379 p.
2. Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, v. 32, iss. 6, pp. 1312–1322.
3. Montero M.I.M., Cadaval E.R., González F.B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, vol. 22, no. 1, pp. 229–236.
4. Routimo M., Salo M., Tuusa H., A Novel Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for an Active Power Filter. *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004, pp. 3215–3220.
5. Pettersson S., Routimo M., Salo M., Tuusa H. A Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for a Four-Wire Active Power Filter. *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 1648–1653.
6. Tokarev V.G., Brovanov S.V., Yakimenko A.A., Sidorenko A.V., Solovov D.V. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method. *The 17th international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM)*, Erlagol, Altai, 2016, pp. 577–582.
7. Goldenberg L.M., Matyushkin B.D., Polyak M.N., *Cifrovaya obrabotka signalov: Spravochnik* [Digital signal

processing: Directory]. M., Radio i svyaz Publ., 1985, 312 p. (in Russ.)

8. Smith S.W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes Publ, 2003, 650 p. [Electronic edition on CD].

9. CMSIS DSP Software Library Version 1.7.0. Available at: <http://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>. (Accessed: August 01, 2019).

10. AN4841 Application note. Digital signal processing for STM32 microcontrollers using CMSIS. Available at https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00273990.pdf. (Accessed: August 01, 2019).

11. GOST R 30804.3.12–2013. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy garmonicheskikh sostavlyayushchih toka, sozdavaemyh tekhnicheskimi sredstvami s potrebyaemym tokom bolee 16 A, no ne bolee 75 A (v odnoj faze), podklyuchaemyimi k nizkovol'nym raspredelitel'nym sistemam elektrosnabzheniya. Normy i metody ispytaniy*, [GOST R 30804.3.12–2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. The norms of the harmonic components of the current created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (per one phase), connected to low-voltage power distribution systems. Standards and test methods]. M., Standartinform Publ., 2014, 22 p. (in Russ.).

12. Soares V., Verdelho P., Marques G.D. Active power filter control circuit based on the instantaneous active and reactive current id-iq method. *The 28 annual IEEE power electronics specialists conference, PESC'97*, Record, USA, 1997, vol. 2, pp. 1096–1101.

13. Dueterhoeft W.C., Schulz M.W., Clarke E. Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1951, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255.

14. Park R.H. Two-reaction theory of synchronous machines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, no. 3, pp. 716–727.

15. Tokarev V.G., Brovanov S.V., Dybko M.A., Udovichenko A.V. [Modeling and Experimental Verification of a Prediction Algorithm for Controlling an Active Power Filter]. *Proc. 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, Ekaterinburg, 2018, pp. 28–33 (in Russ.).

Vadim G. Tokarev

Novosibirsk State Technical University (NSTU)
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0002-3085-1477
Phone: +7 (383-3) 46-11-53
Email: v.tokarev@corp.nstu.ru

Sergey V. Brovanov

Doctor of Engineering Sciences NSTU
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone: +7 (383-3) 46-04-22
Email: brovanov@corp.nstu.ru

Maxim A. Dybko

Candidate of Engineering Sciences NSTU
20, K. Marx Ave., Novosibirsk, Russia, 630073
ORCID 0000-0002-5498-7010
Phone: +7 (383-3) 46-48-14
Email: dybko@corp.nstu.ru