

Разработка метода автокоррекции времени записи при спектральном анализе сигналов

А.Н. Назарычев, А.А. Скоробогатов, Е.М. Новоселов, С.Н. Литвинов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: captain.udgin@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса: Одной из задач спектрального анализа сигналов является точное определение значений частот гармонических составляющих. Традиционно эта задача решается путем увеличения времени записи сигнала, которое может достигать до нескольких минут для низкочастотных составляющих спектра, в результате чего может произойти изменение режимного параметра, смещение датчика и ряд других явлений, приводящих к потере точности измерения. В связи с этим актуальной является разработка такого способа уменьшения времени записи сигнала при определении частот гармонических составляющих, который бы не приводил к потере точности.

Материалы и методы: В качестве метода исследования поведения спектральной функции гармонического сигнала определенной частоты при изменении времени записи сигнала использован спектральный анализ.

Результаты: Разработан алгоритм автокоррекции времени записи сигнала, с помощью которого удалось сократить время записи без потери точности последующего определения частотных составляющих.

Выводы: Увеличение погрешности определения частоты при изменении времени записи сигнала приводит к усилению эффекта растекания спектра, и наоборот. Данную зависимость можно использовать для оценки величины погрешности определения частоты.

Ключевые слова: спектральный анализ, частота дискретизации, время записи сигнала, эффект растекания спектра.

Developing of a spectrally-analyzed signal recording time self-correction method

A.N. Nazarychev, A.A. Skorobogatov, E.M. Novoselov, S.N. Litvinov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: captain.udgin@gmail.com

Abstract

Background: One of the signal spectral analysis aims is exact determination of harmonic frequencies. Traditionally, this goal is achieved by increasing the signal recording time that can reach several minutes for the low-frequency spectrum. This may result in a load change, sensor displacement and a number of other events reducing the accuracy. Therefore, it is urgent to develop a method of accelerating signal recording without accuracy reduction in determining harmonic frequencies.

Materials and methods: The dependence of the spectral function of harmonic signal of a certain frequency on the signal recording time change was studied based on spectral analysis.

Results: An algorithm of signal recording time self-correction was developed which made it possible to accelerate signal recording without accuracy reduction in the subsequent determination of frequency components.

Conclusions: An increase in the frequency calculation error in case of changing the signal recording time leads to spectrum spreading effect enhancement, and vice versa. This dependence can be used to calculate the error values of frequency determination.

Key words: spectral analysis, sampling speed, signal recording time, spectrum spreading effect.

В настоящее время с развитием микропроцессорной техники все более широкое распространение получает исследование процессов в электрооборудовании с помощью спектрального анализа сигналов, получаемых с установленных датчиков. В качестве примера можно привести устройства контроля состояния электродвигателей, основанные на мониторинге токов или вибрации машины [1, 2]. На сегодняшний день на объектах электроэнергетики находят широкое применение микропроцессорные устройства, которые позволяют производить спектральный анализ сигналов (токов, напряжений, магнитных полей и т.п.),

основанный на алгоритмах быстрого преобразования Фурье. Одной из задач спектрального анализа сигналов является точное определение значений частот гармонических составляющих. Традиционно эта задача решается путем увеличения времени записи сигнала, которое может достигать до нескольких минут для низкочастотных составляющих спектра. Данная проблема возникла при разработке способа определения скольжения асинхронного электродвигателя по гармоникам тока статора и внешнего магнитного поля машины [3]. Для обеспечения необходимой точности измерения (5 %) требовалось значительное время

записи сигнала, вплоть до нескольких минут. За это время могло произойти изменение нагрузки, смещение датчика и ряд других явлений, приводящих к потере точности измерения. В связи с этим возникла необходимость разработки способа уменьшения времени записи сигнала при определении частот гармонических составляющих, который бы не приводил к потере точности. Для этого рассмотрим влияние времени записи на точность определения частоты.

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется периодический сигнал с частотой $F_{\text{точн}} = 100,5$ Гц. Время записи сигнала составляет $T_{\text{зап}} = 1$ с. Тогда шаг по частоте будет равен [3, 4]

$$\Delta f = \frac{1}{T_{\text{зап}}} = 1 \text{ Гц},$$

а максимальная погрешность при определении частоты составит

$$\Delta f_{\text{макс}} = \frac{1}{2 \cdot T_{\text{зап}}} = 0,5 \text{ Гц}.$$

Действительный спектр сигнала представлен на рис. 1,а. В данном случае точное значение частоты гармоники $F_{\text{точн}}$ находится посередине между соседними отсчетами. Это означает, что значение частоты гармоники будет определено с максимальной погрешностью. На рис. 1,б показан спектр сигнала после быстрого преобразования Фурье. При этом значение

частоты гармоники отличается от точного значения $F_{\text{точн}}$ на величину погрешности.

Увеличение времени записи сигнала приводит к тому, что шаг по частоте уменьшается и, соответственно, уменьшается максимальная погрешность. Однако данный подход неэффективен, так как зачастую, чтобы достичь необходимой точности при определении значения частоты, требуется слишком большое время записи сигнала.

Предлагается пойти другим путем и вместо уменьшения шага по частоте подобрать время записи таким образом, чтобы частота искомой гармоники точно совпала с границей отсчета. Однако, чтобы практически реализовать данный подход, нужно точно знать, минимальна ли погрешность определения частоты в данный момент. Возможно, имеются некие отличительные признаки, с помощью которых можно характеризовать текущую величину погрешности определения частоты. Для изучения данного вопроса рассмотрим следующий пример.

Имеется периодический сигнал $A(t)$ с частотой 100 Гц, определяемый следующим выражением (рис. 2):

$$A(t) = 5 \cdot \text{Cos}(2\pi \cdot 100t),$$

частота дискретизации составляет $F_d = 10$ кГц.

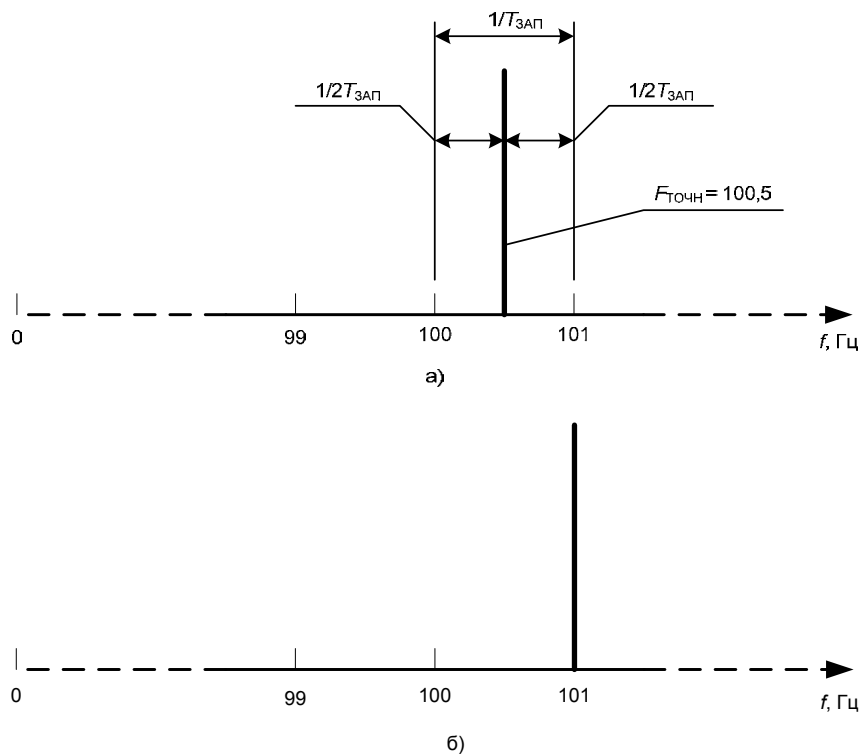
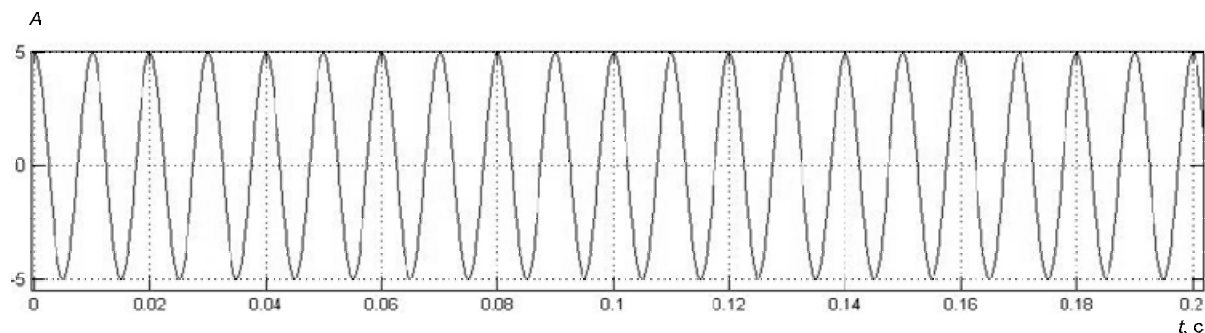


Рис. 1. Влияние времени записи сигнала на погрешность определения частоты: а – действительный спектр сигнала; б – спектр сигнала после быстрого преобразования Фурье

Рис. 2. Форма сигнала $A(t)$

Результатом быстрого преобразования Фурье сигнала $A(t)$ является спектральная функция $S(\omega)$ следующего вида [1]:

$$S(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k e^{j\omega t}, \quad (1)$$

где ω – угловая частота; C_k – коэффициент ряда Фурье.

По сути, спектральная функция представляет собой ряд комплексных чисел. Чтобы получить амплитудный спектр сигнала $A(t)$, необходимо совершить дополнительное преобразование. Амплитуда любой гармоники A_k связана с составляющей спектральной функции S_k следующим соотношением [2]:

$$A_k = \frac{2}{N_{OT}} \times \sqrt{(\operatorname{Re}(S_k))^2 + (\operatorname{Im}(S_k))^2}, \quad (2)$$

где N_{OT} – число отсчетов.

Число 2 в числителе выражения (2) учитывает мнимую часть спектра.

Изучим влияние времени записи на амплитудные спектры (далее просто спектры) сигнала $A(t)$. Рассмотрим следующие ситуации:

1. *Время записи сигнала* $T_{\text{зап.1}} = 1,005$ с.

Погрешность определения частоты максимальна, т.е. реальная частота сигнала $A(t)$ располагается точно посередине между соседними отсчетами (рис. 3,а).

2. *Время записи сигнала* $T_{\text{зап.2}} = 1,002$ с.

Погрешность определения частоты равна некоторому промежуточному значению (рис. 3,б).

3. *Время записи сигнала* $T_{\text{зап.3}} = 1$ с.

Погрешность определения частоты равна нулю, т.е. частота сигнала точно совпадает с границей отсчета (рис. 3,в).

4. *Время записи сигнала* $T_{\text{зап.4}} = 0,998$ с.

При этом ситуация аналогична той, что описана в пункте 2 (рис. 3,г).

5. *Время записи сигнала* $T_{\text{зап.5}} = 0,995$ с.

При этом ситуация аналогична той, что описана в пункте 1 (рис. 3,д).

На рис. 3,а–д N – номер отсчета, соответствующий гармонике с максимальной амплитудой, $N-1$ и $N+1$ – номера отсчетов (номера гармоник), расположенных слева и справа от гармоники с максимальной амплитудой,

A_N, A_{N-1}, A_{N+1} – амплитуды гармоник, соответствующие указанным отсчетам.

Проанализируем изменения спектра сигнала $A(t)$ в зависимости от времени записи.

Исходный сигнал $A(t)$ имеет всего одну гармонику с частотой 100 Гц, однако в спектре, который был получен при времени записи сигнала $T_{\text{зап.1}}$ (рис. 3,а), присутствует целый ряд ярко выраженных гармонических составляющих. Самым интересным является то, что наиболее сильно выраженная гармоника имеет частоту 100,5 Гц и амплитуду $A_N = 3,3$, что никак не соответствует параметрам заданного сигнала (его амплитуда равна 5). Отклонение частоты сигнала от заданного значения вызвано погрешностью, о чем уже неоднократно говорилось выше. Значительное уменьшение величины амплитуды A_N относительно заданного значения и рост амплитуд других гармонических составляющих спектра вызваны так называемым эффектом растекания спектра [4].

В спектре сигнала $A(t)$, полученном при времени записи $T_{\text{зап.2}}$ (рис. 3,б), также присутствует несколько выраженных гармонических составляющих, однако их амплитуды меньше, чем таковые на рис. 3,а. Наиболее сильно выраженная гармоника имеет частоту $f = 99,8$ Гц и амплитуду $A_N = 4,3$, что значительно ближе к параметрам заданного сигнала. При времени записи $T_{\text{зап.2}}$ отклонение частоты сигнала от заданного значения уменьшилось, значение амплитуды A_N увеличилось, а амплитуды посторонних гармоник, наоборот, уменьшились. Таким образом, при времени записи $T_{\text{зап.2}}$ эффект растекания спектра меньше, чем при времени $T_{\text{зап.1}}$.

Спектр сигнала $A(t)$, который был получен при времени записи $T_{\text{зап.3}}$ (рис. 3,в), имеет одну ярко выраженную гармонику с частотой, равной 100 Гц, и амплитудой $A_N = 5$, что полностью соответствует заданному сигналу. В данном случае эффект растекания спектра полностью отсутствует.

Спектры сигнала $A(t)$, который был получен при времени записи $T_{\text{зап.4}}$ и $T_{\text{зап.5}}$ (рис. 3,г,д), по своим свойствам соответствуют спектрам, полученным при времени записи $T_{\text{зап.2}}$ и $T_{\text{зап.1}}$ соответственно.

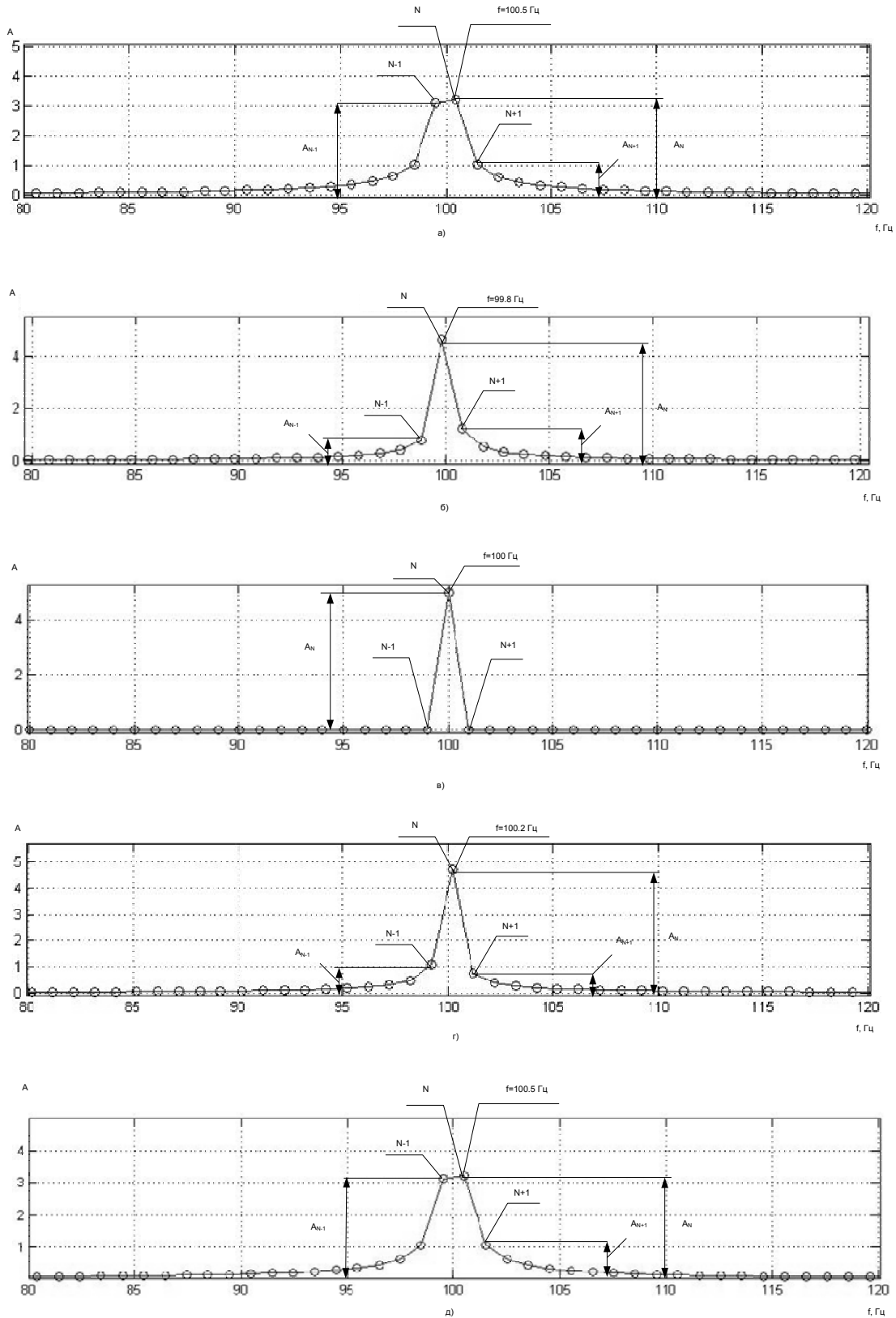


Рис. 3. Спектр сигнала $A(t)$ при различном времени записи сигнала $T_{\text{зап}}$: а – $T_{\text{зап},1} = 1,005$ с; б – $T_{\text{зап},2} = 1,002$ с; в – $T_{\text{зап},3} = 1$ с; г – $T_{\text{зап},4} = 0,998$ с; д – $T_{\text{зап},5} = 0,995$ с

На основании анализа полученных данных можно сделать вывод, что *увеличение погрешности определения частоты приводит к усилению эффекта растекания спектра, и наоборот, чем меньше погрешность, тем слабее эффект растекания.* Данную за-

висимость можно использовать для оценки величины погрешности определения частоты.

Также можно отметить цикличность изменения погрешности определения частоты при последовательном изменении времени записи сигнала. Последовательно уменьшая

время, начиная с $T_{\text{зап.1}}$, при котором погрешность была максимальна, сначала наблюдалось уменьшение погрешности вплоть до времени $T_{\text{зап.3}}$, а затем вплоть до времени $T_{\text{зап.5}}$ происходил рост величины погрешности. *Период изменения величины погрешности определения частоты (эффекта растекания спектра) равен периоду сигнала.* Таким образом, чтобы добиться минимизации погрешности определения частоты, не требуется значительного изменения времени записи.

Подбор оптимального времени записи может осуществляться согласно следующему выражению:

$$T_{\text{зап.}i} = T_{\text{зап}} - i \frac{1}{F_d}, \quad (3)$$

где $T_{\text{зап.}i}$ – время записи сигнала после i -го количества шагов уменьшения времени записи относительно исходного значения $T_{\text{зап}}$.

На каждом i -м шаге уменьшения этого параметра необходима оценка величины растекания спектра.

Определим критерии оценки величины растекания спектра.

В ходе анализа процесса, представленного на рис. 3, была отмечена закономерность изменения амплитуд гармонических составляющих сигнала $A(t)$ в зависимости от величины растекания спектра (i , соответственно, от величины погрешности определения частоты). С уменьшением эффекта растекания спектра значение амплитуды A_N увеличивается, а значения амплитуд A_{N-1} , A_{N+1} уменьшаются (значения амплитуд других гармоник также уменьшаются, однако нам интересны именно $N-1$ и $N+1$ гармоники). Исходя из этой информации рассмотрим различные возможные условия, при которых эффект растекания спектра минимален.

Наиболее очевидным и простым является следующее условие:

$$A_N = \max. \quad (4)$$

Однако на практике данное условие не всегда работает корректно, так как на амплитуду гармоники A_N влияние оказывает не только эффект растекания спектра, но и уменьшение числа отсчетов $N_{\text{от}}$ (см. выражение (2)). Требуется более надежный критерий, который бы учитывал, с одной стороны, максимальное значение амплитуды A_N , а с другой – минимум амплитуд соседних гармонических составляющих A_{N-1} , A_{N+1} . В качестве такого критерия предлагается величина V , определяемая следующим образом:

$$V = (A_N - A_{N-1})(A_N - A_{N+1}). \quad (5)$$

Рассмотрим, при какой величине V эффект растекания спектра будет минимален. На рис. 4 показана зависимость частоты N -й гармоники от номера шага уменьшения времени записи сигнала i , а на рис. 5 – зависимость величины V от номера шага уменьшения времени записи сигнала i .

Частота N -й гармоники совпадает с частотой сигнала $A(t)$, равной $f = 100$ Гц, на 50-й и 150-й итерации (рис. 4), при этом величина V достигает своих максимальных значений (рис. 5). Таким образом, эффект растекания спектра минимален при максимальном значении параметра V :

$$V = \max. \quad (6)$$

Если условие (6) выполняется, то можно говорить о том, что погрешность определения частоты минимальна.

Для минимизации данной погрешности предлагается алгоритм *автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС)*, позволяющий подобрать для любой гармонической составляющей спектра оптимальное время записи сигнала, при котором погрешность определения частоты минимальна.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 6.

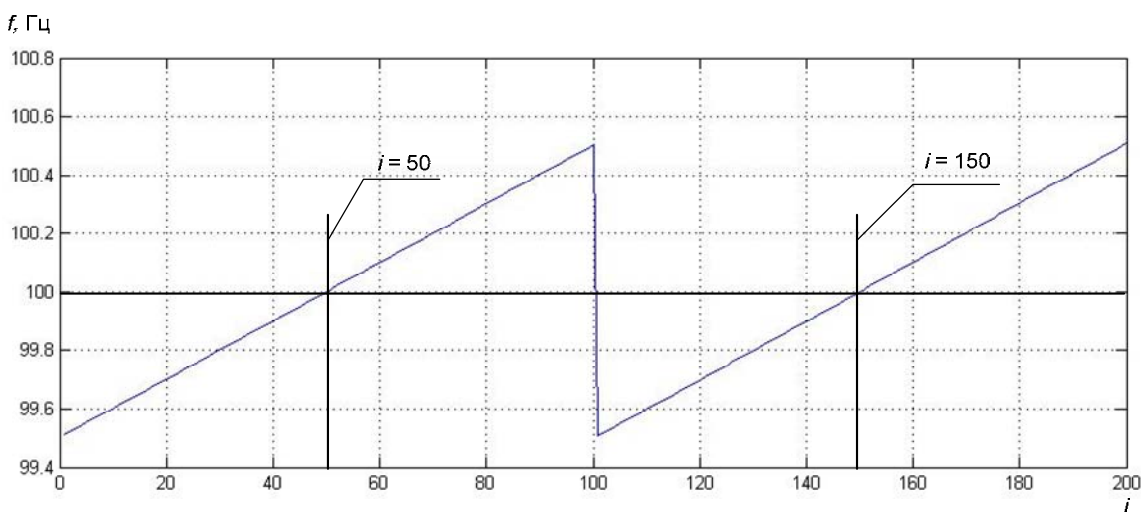


Рис. 4. Зависимость частоты N -й гармоники от номера шага уменьшения времени записи сигнала i

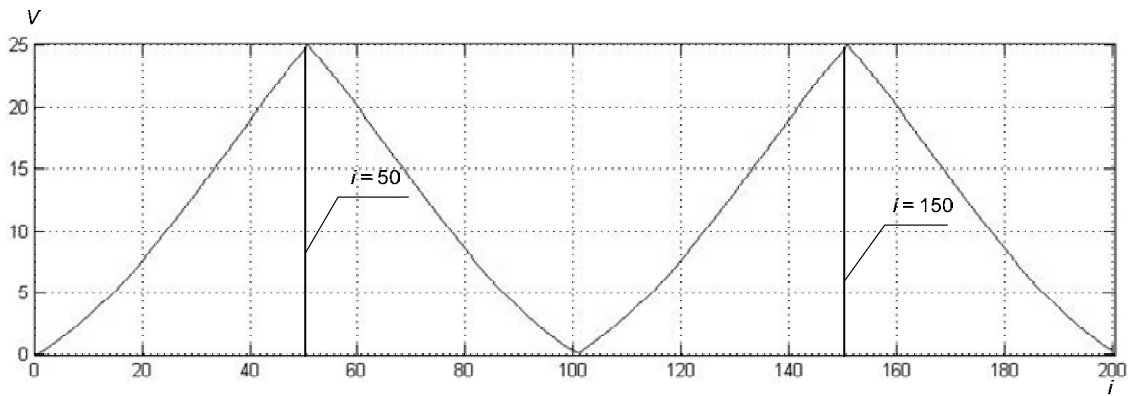


Рис. 5. Зависимость величины V от номера шага уменьшения времени записи сигнала i

Для того чтобы понять, каким образом алгоритм АВЗС влияет на значение частот гармонических составляющих спектра, рассмотрим следующий пример.

Пусть имеется периодический сигнал с частотой f , записанный с временем $T_{\text{зап}}$ и частотой дискретизации АЦП F_d .

Теперь рассмотрим работу алгоритма АВЗС (рис. 7). На первой итерации (рис. 7, верхний график) шаг по частоте будет равен

$$\Delta f_1 = \frac{1}{T_{\text{зап}}}.$$

Тогда значение частоты гармоники будет равно

$$f_1 = n_1 \cdot \Delta f_1,$$

где $n_1 = \frac{f_1}{\Delta f_1} = f_1 \cdot T_{\text{зап}}$ – число шагов.

На второй итерации (рис. 7, средний график) и последующих происходит уменьшение времени записи сигнала на величину $\Delta T_{\text{зап}1}$:

$$\Delta T_{\text{зап}1} = \frac{1}{F_d}.$$

Тогда время записи сигнала на второй итерации будет определяться следующим образом:

$$T_{\text{зап}2} = T_{\text{зап}} - \Delta T_{\text{зап}1} = T_{\text{зап}1} - \frac{1}{F_d}.$$

При этом шаг по частоте будет равен

$$\Delta f_2 = \frac{1}{T_{\text{зап}} - \frac{1}{F_d}}. \quad (7)$$

Тогда значение частоты гармонической составляющей можно будет определить как

$$f_2 = n_2 \cdot \Delta f_2$$

или

$$f_2 = n_2 (\Delta f_1 + \Delta f'),$$

где $\Delta f'$ – изменение шага по частоте между текущей и предыдущей итерациями:

$$\Delta f' = \Delta f_2 - \Delta f_1 = \frac{1}{T_{\text{зап}} - \frac{1}{F_d}} - \frac{1}{T_{\text{зап}}} = \quad (8)$$

$$= \frac{1}{T_{\text{зап}}(T_{\text{зап}} F_d - 1)}.$$

Тогда разницу значений частот Df гармонической составляющей между текущей и предыдущей итерациями можно определить следующим образом:

$$Df = f_2 - f_1 = n_2 (\Delta f_1 + \Delta f') - n_1 \cdot \Delta f_1.$$

Согласно рис. 7, число шагов по частоте n в процессе АВЗС не изменяется. Поэтому $n_1 = n_2 = n_i = n$,

тогда

$$Df = n \cdot \Delta f'. \quad (9)$$

Подставив в выражение (9) формулу (8), получим

$$Df = \frac{f \cdot T_{\text{зап}}}{T_{\text{зап}}(T_{\text{зап}} F_d - 1)}.$$

Окончательно разница частот Df гармонической составляющей между текущей и предыдущей итерациями будет определяться следующим выражением:

$$Df = \frac{f}{T_{\text{зап}} \cdot F_d - 1}. \quad (10)$$

Максимальная погрешность определения частоты Δf_m при использовании алгоритма АВЗС будет определяться следующим образом:

$$\Delta f_m = \frac{Df}{2}$$

или

$$\Delta f_m = \frac{f}{2(T_{\text{зап}} F_d - 1)}. \quad (11)$$

Согласно (11), максимальная погрешность определения частоты Δf_m при использовании алгоритма АВЗС зависит не только от времени записи сигнала, но и от частоты дискретизации. Так как современные АЦП могут работать при частоте, лежащей в области МГц, то уменьшать погрешность определения частоты следует за счет увеличения частоты дискретизации, а не за счет увеличения времени записи сигнала. Последний параметр при этом следует выбирать исходя из соображений минимально допустимого разрешения по частоте.

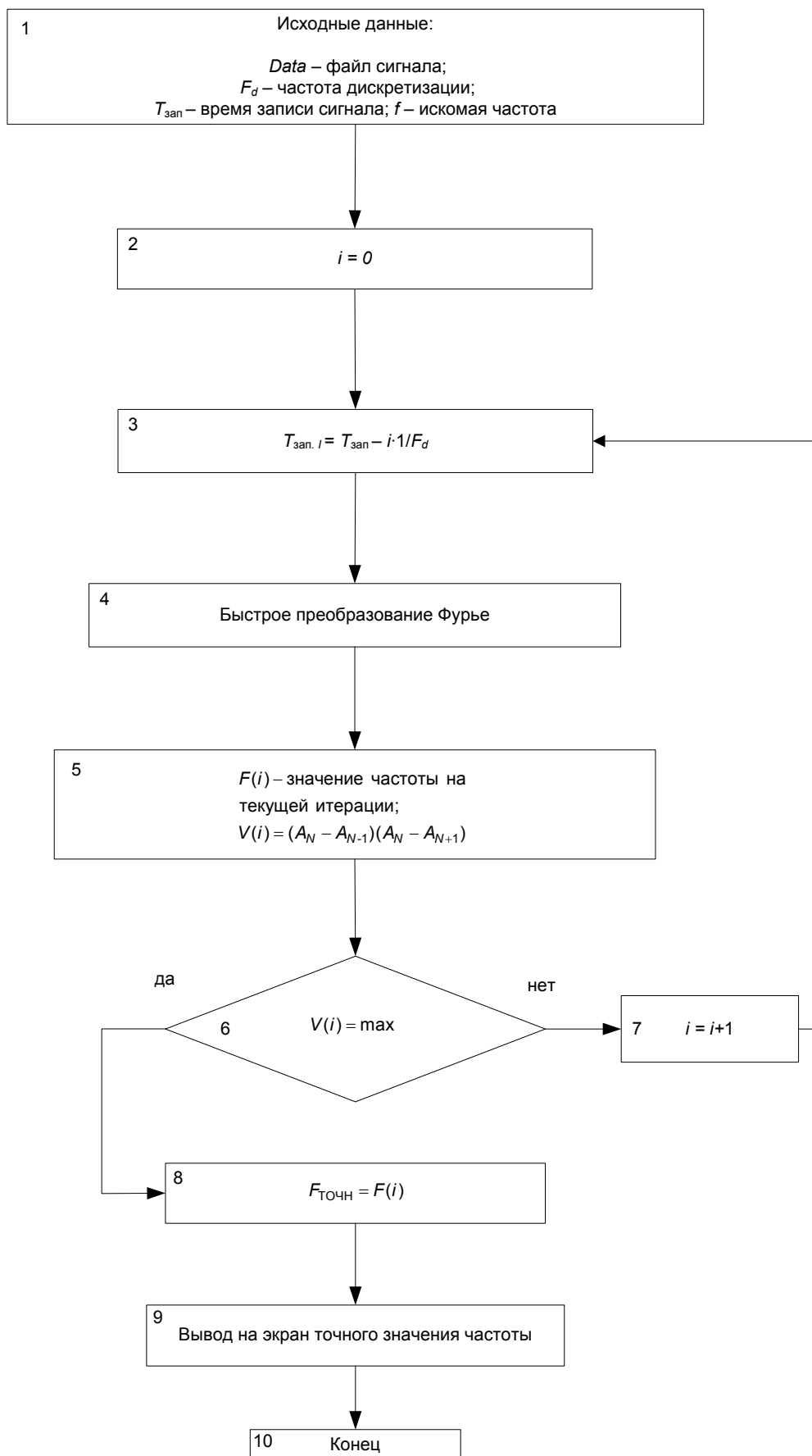


Рис. 6. Блок-схема алгоритма АВЗС

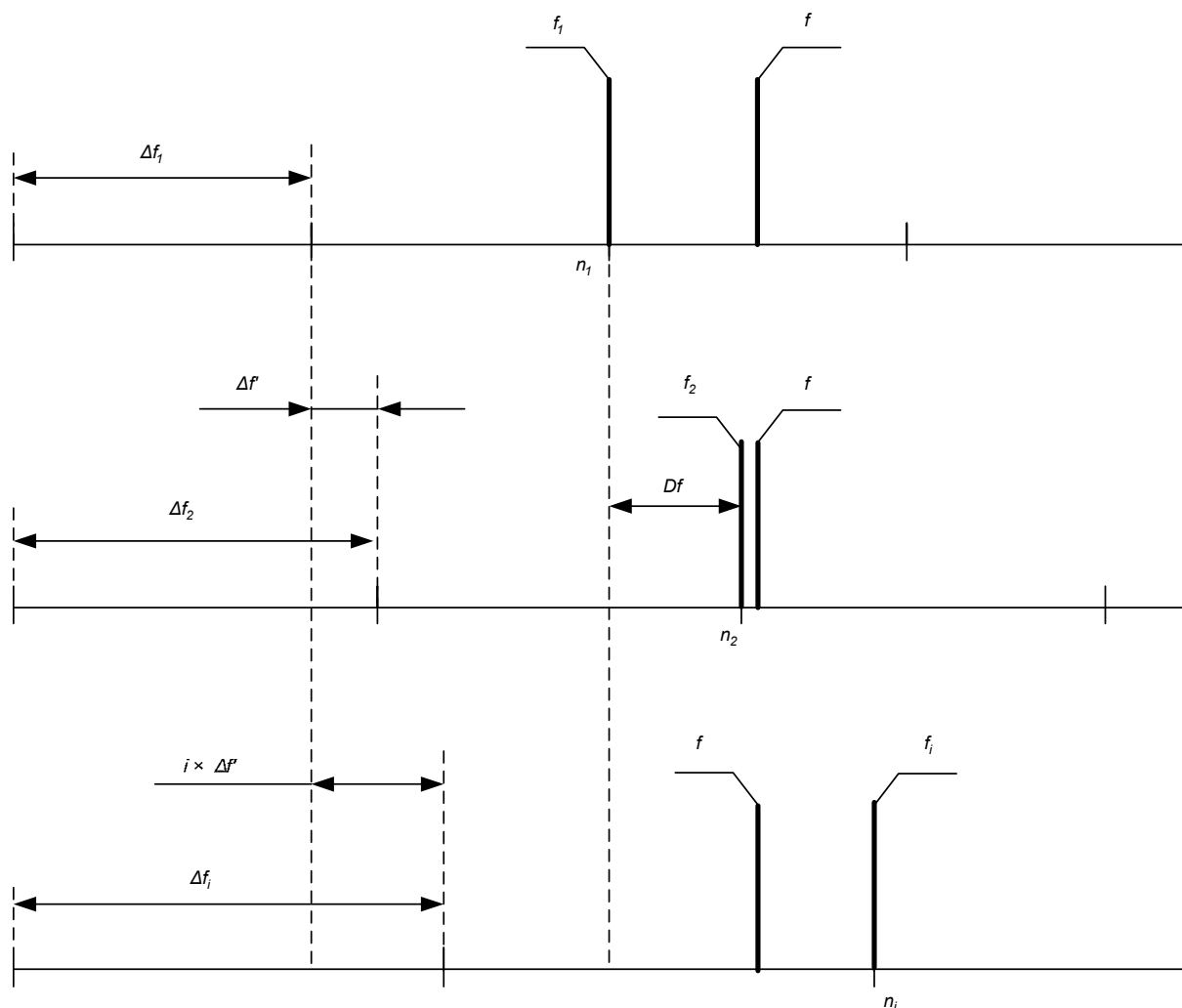


Рис. 7. Зависимость частоты от времени записи сигнала

Данный метод особенно эффективен при работе с низкочастотными составляющими. В зависимости от требуемой точности определения частоты, алгоритм АВЗС позволяет добиться многократного сокращения времени записи сигнала. Например, при определении скольжения асинхронного электродвигателя по гармоникам эксцентриситета ротора алгоритм АВЗС позволил сократить время записи сигнала с нескольких минут до нескольких секунд (менее 10 с).

Заключение

Разработанный алгоритм автокоррекции времени записи сигнала позволяет добиться высокой точности определения значений частот гармонических составляющих спектра при малом времени записи сигнала за счет увеличения частоты дискретизации, что положительно сказывается на помехозащищенности и быстродействии технических средств анализа сигналов.

Список литературы

1. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа

потребляемого тока // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 1(31). – С. 50–52.

2. Петухов В.С. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости ЭлектроТехники. – 2008. – № 1(49). – С. 50–52.

3. Анализ применения гармоник динамического эксцентриситета ротора для контроля скольжения электродвигателя / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Н.В. Глотова, А.А. Скоробогатов // Повышение эффективности работы энергосистем. Труды ИГЭУ. Вып. IX. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – С. 260–266.

4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.

References

1. Petukhov, V.S., Sokolov, V.A. *Novosti ElektroTehniki*, 2005, no. 1(31), pp. 50–52.

2. Petukhov, V.S. *Novosti ElektroTehniki*, 2008, no. 1(49), pp. 50–52.

3. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Glotova, N.V., Skorobogatov, A.A. Analiz primeneniya garmonik dinamicheskogo ekscentrisiteta rotora dlya kontrolya skol'zheniya elektrodvigatelya [Analysis of applying rotor dynamic eccentricity harmonic components to controlling electric drive slip]. *Trudy IGEU «Povyshenie effektivnosti raboty energosistem»* [Collected works of ISPEU «Efficiency enhancement of power systems»]. Moscow, Energoatomizdat, 2009, issue IX, pp. 260–266.

4. Sergienko, A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Saint-Petersburg, Piter, 2003. 604 p.

Назарычев Александр Николаевич,

Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
доктор технических наук, проректор по научной работе,
e-mail: captain.udgin@gmail.com

Скоробогатов Андрей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 26-99-24.

Новоселов Евгений Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 26-99-24.

Литвинов Сергей Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
инженер кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования,
телефон (4932) 26-99-24.