

DOI: 10.18721/JEST.230409

УДК 621.313.3621.317

*А.Н. Назарычев¹, Е.М. Новосёлов², А.С. Страхов³,
А.А. Скоробогатов⁴, Н.В. Коровкин⁵*

1 — Петербургский энергетический институт повышения квалификации,
Санкт-Петербург, Россия

2, 3, 4 — Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина, г. Иваново, Россия

5 — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА АВТОКОРРЕКЦИИ ВРЕМЕНИ ЗАПИСИ СИГНАЛА

Спектральный анализ сигналов является основным инструментом при разработке новых функциональных методов контроля асинхронных электродвигателей. В статье описывается анализатор спектра на базе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала, предназначенный для точного определения параметров гармоник характерных для сигналов, генерируемых асинхронными электродвигателями. Алгоритм позволяет минимизировать влияние растекания спектра сигнала на результаты спектрального анализа, что существенно повышает точность. Произведено сравнение с традиционными методами спектрального анализа, основанными на быстром преобразовании Фурье и оконном преобразовании Фурье. Разработанный анализатор обеспечивает более высокую точность определения амплитуд и частот гармонических составляющих спектра сигнала по сравнению с традиционными методами. Еще одним преимуществом является высокая стабильность результатов, которая сохраняется даже при уменьшении времени регистрации сигнала вплоть до одной секунды.

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ; СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ; РАСТЕКАНИЕ СПЕКТРА; БЫСТРОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ; ОКОННОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ; ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ; ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ.

Ссылки при цитировании:

А.Н. Назарычев, Е.М. Новосёлов, А.С. Страхов, А.А. Скоробогатов, Н.В. Коровкин. Анализатор спектра на основе алгоритма автокоррекции времени записи сигнала // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23, № 4. С. 98–109. DOI: 10.18721/JEST.230409.

*A.N. Nazarychev¹, E.M. Novoselov², A.S. Strakhov³,
A.A. Skorobogatov⁴, N.V. Korovkin⁵*

1 — Federal state educational establishment St. Petersburg power engineering institute for advanced studies, St. Petersburg, Russia

2, 3, 4 — Ivanovo state power engineering university, Ivanovo, Russia

5 — Peter the Great St. Petersburg state polytechnic university, St. Petersburg, Russia

SPECTRUM ANALYZER BASED ON AN AUTOCORRECTION ALGORITHM OF TIME RECORDING

Spectral analysis of signals is the main tool in the development of new functional methods for monitoring asynchronous electric motors. The article describes a spectrum analyzer based on an autocorrection algorithm of time recording. The algorithm allows to minimize the effect of spectral leakage on the results

of spectral analysis, which significantly increases the accuracy. The analyzer is designed to accurately determine the parameters of harmonics characteristic for the signals generated by asynchronous motors. A comparison is made with the traditional methods of spectral analysis based on the fast Fourier transform and the Windowed Fourier transform. The developed spectrum analyzer provides a higher accuracy of determining the amplitudes and frequencies of harmonic components of the signal spectrum in comparison with traditional methods. Another advantage is the high stability of the results, which is retained even with the reduction of the signal recording time up to one second.

ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR; SPECTRAL ANALYSIS; SPECTRAL LEAKAGE; FAST FOURIER TRANSFORM; WINDOWED FOURIER TRANSFORM; AMPLITUDE ERROR; FREQUENCY ERROR.

Citation:

A.N. Nazarychev, E.M. Novoselov, A.S. Strakhov, A.A. Skorobogatov, N.V. Korovkin, Spectrum analyze based on autocorrection algorithm of time recording, *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23(04)(2017)98–109. DOI: 10.18721/JEST.230409.

Введение

Во многих современных областях, таких, как радиотехника, акустика, медицина, электроэнергетика, существует необходимость в применении и разработке анализаторов спектров, с чем связано большое количество публикаций по этой тематике как в России [1–5], так и за рубежом [6–8]. Примером таких задач является контроль технического состояния асинхронных двигателей, основанный на спектральном анализе сигналов, в качестве которых могут выступать ток статора, индукция внешнего или внутреннего магнитного поля, сигналы вибрации и т.д. Суть подобных способов контроля заключается в обнаружении в частотных спектрах сигналов определенных гармоник, существенное возрастание амплитуд которых может служить диагностическим признаком повреждения того или иного узла [9–13].

Выпускаемые промышленностью анализаторы спектра способны с высокой точностью определять амплитуды и частоты гармонических составляющих сигнала, однако в случае выявления частот, характерных для повреждения узлов электродвигателя, (они, как правило, находятся в диапазоне от 0 до 1 кГц) анализаторы обладают избыточной функциональностью и сложностью конструкции, что приводит к значительному удорожанию этих устройств. К тому же некоторые анализаторы спектра имеют закрытую архитектуру и поэтому плохо поддаются модернизации.

В связи с этим некоторые авторы (например, Pu Shi, C.S. Kalaskar, C. Ressani и т.д.) разрабатывают специальные анализаторы спектра для контроля асинхронных двигателей [14–17]. Однако все эти анализаторы, основанные на

совершенно разных операциях, все еще находятся на стадии исследования (разработки) и не имеют практического применения.

Традиционно для контроля состояния асинхронных двигателей используется спектральный анализ, основанный на быстром преобразовании Фурье (БПФ) или оконном преобразовании Фурье (ОПФ). Метод быстрого преобразования Фурье мало пригоден для этих целей, что в первую очередь обусловлено таким явлением, как эффект растекания спектра, в результате чего мощные гармонические составляющие (например, основная гармоника сети) «размазываются» по всему спектру и амплитуды других гармоник могут быть определены ошибочно. Чтобы избежать подобного эффекта, необходимо увеличивать время записи сигнала (до нескольких минут для низкочастотных составляющих спектра). За это время могут произойти изменения нагрузки и ряда других параметров, смещение датчика и т.п., что приводит к потере точности измерения.

Метод оконного преобразования Фурье позволяет с довольно высокой точностью определять частоты и амплитуды гармонических составляющих даже при малом времени записи сигнала. Достигается это путём подавления боковых лепестков гармоник с большой амплитудой, что значительно уменьшает влияние эффекта растекания спектра на гармониках с малыми амплитудами. Однако при использовании ОПФ значительно увеличивается ширина основного лепестка гармоник, что приводит к неправильному определению гармонических составляющих с малыми амплитудами, находящихся вблизи высокоамплитудных гармоник, при малом времени записи сигнала.

Цель излагаемого исследования — разработка анализатора спектра сигналов от асинхронного электродвигателя, позволяющего с высокой точностью определять амплитуды и частоты любых гармонических составляющих сигнала и не требующего при этом большого времени записи сигнала.

Материал и методика работы

В основу разработанного анализатора был положен алгоритм автокоррекции времени записи сигнала (АВЗС) [18], который хорошо себя зарекомендовал при поиске частот гармоник динамического эксцентриситета ротора и скольжения асинхронного электродвигателя [19]. Принцип работы алгоритма АВЗС: при определении любой гармонической составляющей спектра сигнала, ограниченного во времени, определяется оптимальное время записи сигнала так, чтобы на интервале обработки укладывалась целое количество периодов сигнала. То есть алгоритм АВЗС для каждой гармоники подбирает такое время $T_{\text{зап}}$, при котором эффект растекания спектра минимален, а амплитуда гармоники максимальна. При этом оконное сглаживание не используется, то есть в качестве оконной функции применяется обычное прямоугольное окно.

Максимальная погрешность $\Delta f_{\text{макс}}$ определения частоты при использовании алгоритма АВЗС определяется следующим образом [19]:

$$\Delta f_{\text{макс}} = \frac{f_{\text{прибл}}}{2(T_{\text{зап}} F_{\text{д}} - i + 1)}, \quad (1)$$

где $T_{\text{зап}}$ — время записи сигнала; $F_{\text{д}}$ — частота дискретизации; i — количество итераций, произведенных алгоритмом АВЗС при определении значения измеряемой частоты; $f_{\text{прибл}}$ — приблизительное (предполагаемое) значение измеряемой частоты (например, для частоты сети оно равно $f_{\text{с.прибл}} = 50$ Гц).

Из (1) следует, что максимальная погрешность определения частоты 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.

Минимальное число итераций $N_{\text{ит мин}}$, необходимое для нахождения точных значений частоты и амплитуды рассматриваемой гармоники, определяется по формуле

$$N_{\text{ит мин}} = \frac{F_{\text{д}}}{f_{\text{прибл}}} + 1. \quad (2)$$

Блок-схема анализатора спектра на базе АВЗС представлена на рис. 1. Разработанный алгоритм включает следующие операции (блоки):

1. Преобразование зарегистрированного аналогового сигнала в цифровой *Data* (блок 1). Сигналом может служить ток статора, внешнее или внутренне магнитное поле и т.п. (блок 1).

2. Определение с помощью АВЗС точного значения частоты сети с предварительным заданием приблизительного значения частоты сети 50 Гц (для определения необходимого числа итераций) — блок 2. При этом в результате работы алгоритма получают сигнал *Data1* с меньшим временем записи T_1 .

3. Процедура цифровой фильтрации сигнала для устранения влияния основной гармоники сети на амплитуды информативных гармонических составляющих спектра; в результате из сигнала *Data1* эта гармоника удаляется (блок 3). При необходимости могут удаляться и другие мощные гармоники (например, кратные частоте сети).

Это реализовано следующим образом. Из спектра сигнала длительностью T_1 , при которой амплитуда основной гармоники сети будет максимальна, данная гармоника удаляется (эта процедура позволяет наиболее полно отфильтровать необходимые гармоники сигнала, минимизировав при этом их влияние на другие гармоники). После чего с помощью обратного преобразования Фурье формируется отфильтрованный сигнал *Data2* той же длительности T_1 , который и подвергают дальнейшему спектральному анализу.

4. Определение скольжения (блок 5) асинхронного двигателя (в случае необходимости) в соответствии со способом, представленным в [19]: по полученному значению частоты сети и числу пар полюсов электродвигателя вычисляют приблизительные значения частот гармоник эксцентриситета ротора первого порядка ($f_{\text{дЭприбл}}^{(1\pm)}$), а также границы зон поиска данных гармоник; по максимуму амплитуд внутри

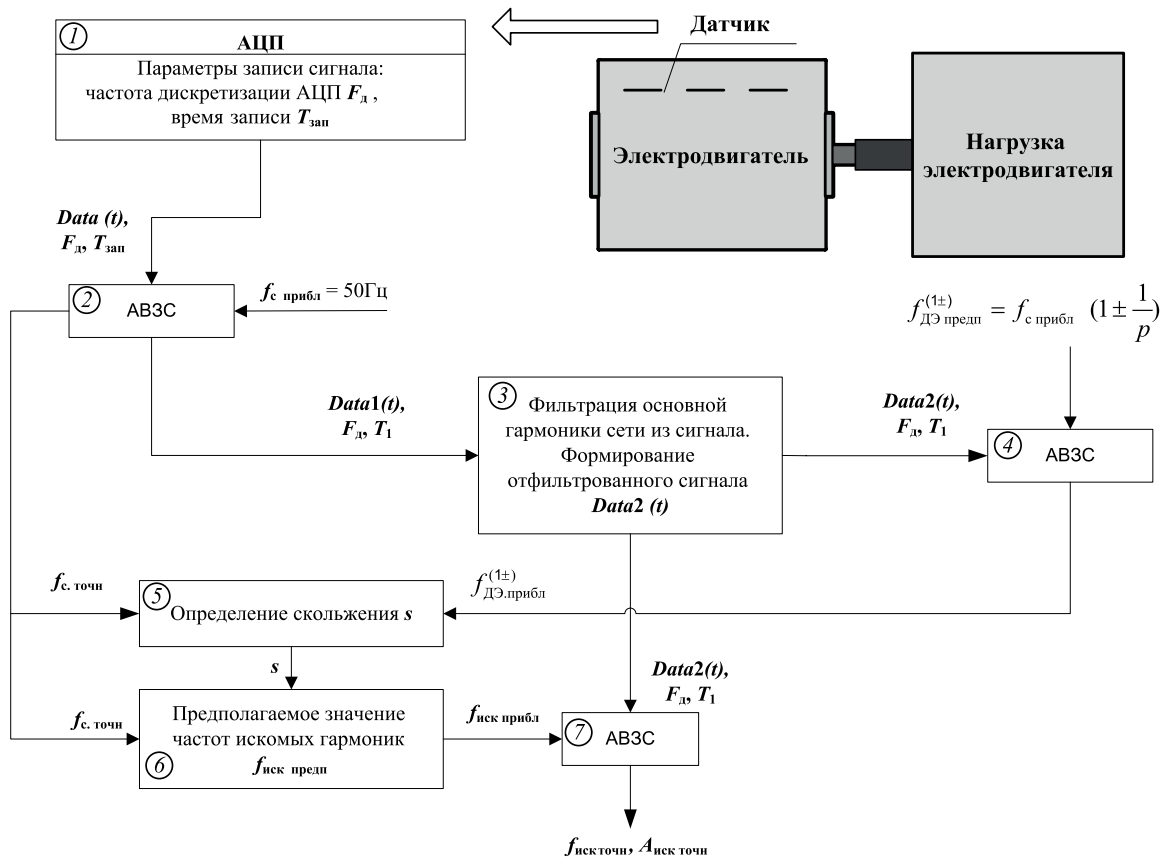


Рис. 1. Блок-схема анализатора спектра на базе АВЗС
 Fig.1. Algorithm of spectrum analyzer

зон поиска находят гармоники эксцентриситета ротора первого порядка и с помощью алгоритма АВЗС определяют точные значения $f_{ДЭ\text{ точн}}^{(1\pm)}$ их частот (блок 4). Далее по определенным значениям этих частот и точному значению частоты сети вычисляют скольжение s электродвигателя (блок 5).

5. Определение точных значений амплитуд и частот искомым гармоник. Зная скольжение двигателя и точное значение частоты сети, можно оценить приблизительные значения частот любых интересующих нас гармоник $f_{иск\text{ прибл}}$ (блок 6) и по методу АВЗС в спектре сигнала $Data2$ определить точные значения их амплитуд $A_{иск\text{ точн}}$ и частот $f_{иск\text{ точн}}$ (блок 7).

Благодаря использованию АВЗС и фильтрации мощных, но не несущих информацию о повреждении узлов электродвигателя гармоник, а также проверке достоверности определения скольжения [20], разработанный алго-

ритм позволяет автоматически производить обработку сигнала и с достаточной точностью определять частоты и амплитуды любой гармонической составляющей сигнала даже при времени записи сигнала порядка 1–3 сек.

Экспериментальное исследование

Корректность работы анализатора спектра проверялась на экспериментальном стенде. В качестве объекта испытания был использован асинхронный двигатель мощностью 250 Вт с одной парой полюсов при одном поврежденном стержне обмотки ротора. Для моделирования нагрузки асинхронного двигателя использовался генератор постоянного тока с подключенными к нему лампами накаливания. Для записи сигнала в воздушном зазоре асинхронного двигателя был установлен внутренний индуктивный датчик (ВИД) в виде витка провода, намотанного на зубец статора.

С помощью ВИД и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) была осуществлена запись и оцифровка сигнала, после чего производилась цифровая обработка сигнала на компьютере. В процессе спектрального анализа этого сигнала разработанным анализатором были определены амплитуды и частоты основной гармоники сети, гармоник эксцентриситета ротора первого порядка и гармоник фиктивной обмотки ротора (ФОР), которые используются для выявления обрывов стержней обмотки ротора [13]. Длительность записи сигнала первоначально была принята достаточно большой (30 с) для более точного определения параметров каждой гармоники. Далее по полученным значениям частот ФОР, часть из которых соответствует частотам основной гармоники сети и гармоники динамического эксцентриситета, и амплитуд этих составляющих был сгенерирован искусственный сигнал (тест-сигнал), имитирующий реальный и состоящий только из этих гармоник. В дальнейшем с помощью разработанного алгоритма и традиционных БПФ и ОПФ были проведены обработка тест-сигнала и сравнение полученных амплитуд гармоник с их реальными значениями.

В табл. 1 представлены действительные значения частот и амплитуд гармоник тест-сигнала, которые требовалось определить.

В табл. 2 и на рис. 2–5 показаны результаты определения амплитуд при времени записи сиг-

нала от 2 до 30 сек. с помощью обычного БПФ, с помощью ОПФ при использовании окон Ханна (окно высокого разрешения) и Флэттоп (окно низкого разрешения) и с помощью разработанного анализатора спектра. Также для сравнения разработанного анализатора и окна Флэттоп дополнительно была произведена оценка значения скольжения при различном времени записи. Результаты расчёта приведены в табл. 3 и на рис. 6.

Таблица 1

Параметры сигнала

Table 1

Parameters of the signal

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда, мВ
1	47,8	0,62
2	49,99	172,9
3	96,7	6,045
4	98,9	13,463
5	145,7	6,141
6	147,8	5,991
7	194,6	5,606
8	196,7	4,737
9	243,5	4,248
10	245,6	1,98

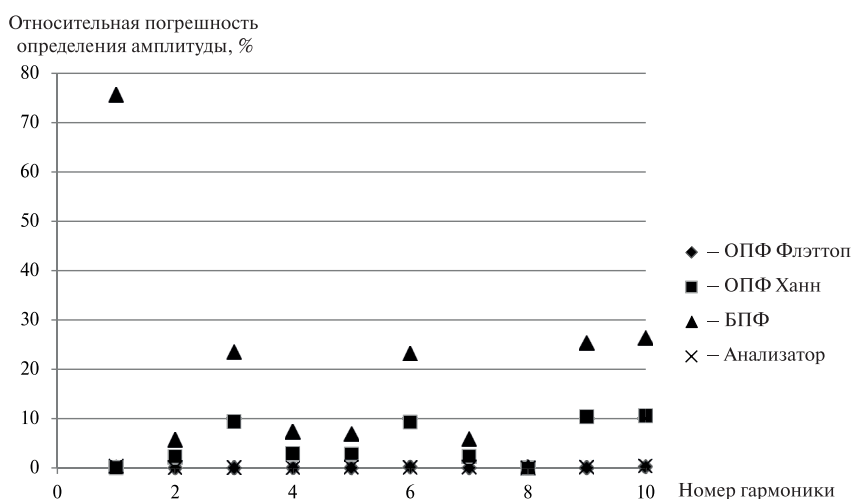


Рис. 2. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 30 с

Fig. 2. Relative error in determining the amplitudes at a recording time of 30 s

Таблица 2

**Результаты расчёта сгенерированного сигнала при использовании БПФ,
ОПФ (окна Ханна и Флэттоп) и разработанного анализатора**

Table 2

**Results of calculation of the generated signal using FFT, WFT (Hann and Flat top windows)
and the developed analyzer**

Номер гармоники	Применяемый метод обработки сигнала	Амплитуда гармоники, мВ, при разных значениях времени записи				
		30 сек	10 сек	5 сек	3 сек	2 сек
1	БПФ	1,089	0,901	1,076	1,083	2,215
	ОПФ (Окно Ханна)	0,62	0,577	0,606	0,531	88,08
	ОПФ (Окно Флэттоп)	0,619	0,62	0,62	34,625	34,134
	Анализатор	0,622	0,624	0,626	0,641	0,625
2	БПФ	163,04	171,8	172,63	172,8	172,84
	ОПФ (Окно Ханна)	169	172,47	172,79	172,86	172,89
	ОПФ (Окно Флэттоп)	172,94	172,91	172,91	172,9	172,9
	Анализатор	172,81	172,58	172,24	171,76	171,17
3	БПФ	4,627	4,072	5,898	5,879	4,331
	ОПФ (Окно Ханна)	5,477	5,254	5,769	5,816	8,654
	ОПФ (Окно Флэттоп)	6,045	6,041	6,047	6,047	6,434
	Анализатор	6,048	6,177	6,091	6,567	6,81
4	БПФ	12,482	13,422	9,194	12,015	13,2
	ОПФ (Окно Ханна)	13,075	13,419	11,69	12,798	13,143
	ОПФ (Окно Флэттоп)	13,468	13,463	13,454	13,466	13,68
	Анализатор	13,459	13,523	13,474	13,694	13,737
5	БПФ	5,72	4,666	6,249	6,469	5,561
	ОПФ (Окно Ханна)	5,968	5,523	5,797	6,132	5,731
	ОПФ (Окно Флэттоп)	6,142	6,14	6,142	6,141	6,146
	Анализатор	6,15	6,228	6,213	6,465	6,487
6	БПФ	4,603	5,668	5,95	4,169	5,076
	ОПФ (Окно Ханна)	5,434	5,831	5,95	5,212	5,493
	ОПФ (Окно Флэттоп)	6	5,992	5,991	5,987	6,73
	Анализатор	5,995	6,069	6,06	6,309	6,331
7	БПФ	5,278	4,982	5,576	5,017	5,743
	ОПФ (Окно Ханна)	5,476	5,347	5,54	5,323	5,512
	ОПФ (Окно Флэттоп)	5,607	5,607	5,606	5,607	3,207
	Анализатор	5,599	5,647	5,612	5,826	5,879
8	БПФ	4,728	3,925	3,932	4,599	3,001
	ОПФ (Окно Ханна)	4,737	4,399	4,41	4,61	4,121
	ОПФ (Окно Флэттоп)	4,738	4,738	4,738	4,738	5,941
	Анализатор	4,736	4,785	4,755	4,968	5,057
9	БПФ	3,172	4,134	4,242	2,92	4,377
	ОПФ (Окно Ханна)	3,808	4,197	3,761	3,701	4,239
	ОПФ (Окно Флэттоп)	4,247	4,248	4,246	4,245	0,863
	Анализатор	4,242	4,261	4,239	4,323	4,38
10	БПФ	1,457	1,337	1,778	2,125	1,753
	ОПФ (Окно Ханна)	1,771	1,712	1,911	1,973	1,87
	ОПФ (Окно Флэттоп)	1,975	1,979	1,981	1,98	4,295
	Анализатор	1,973	2,009	1,971	2,144	2,23

Примечание: полужирным шрифтом отмечены ячейки, где относительная погрешность измерения превысила 10%.

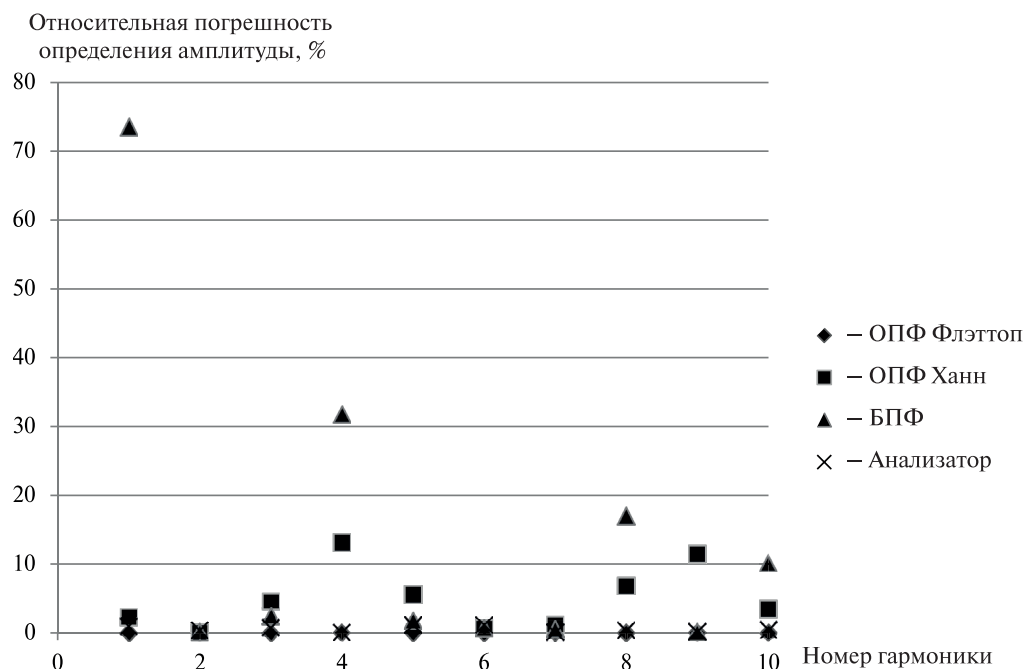


Рис. 3. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи равном 5 с
 Fig. 3. Relative error in determining the amplitudes at a recording time of 5 s

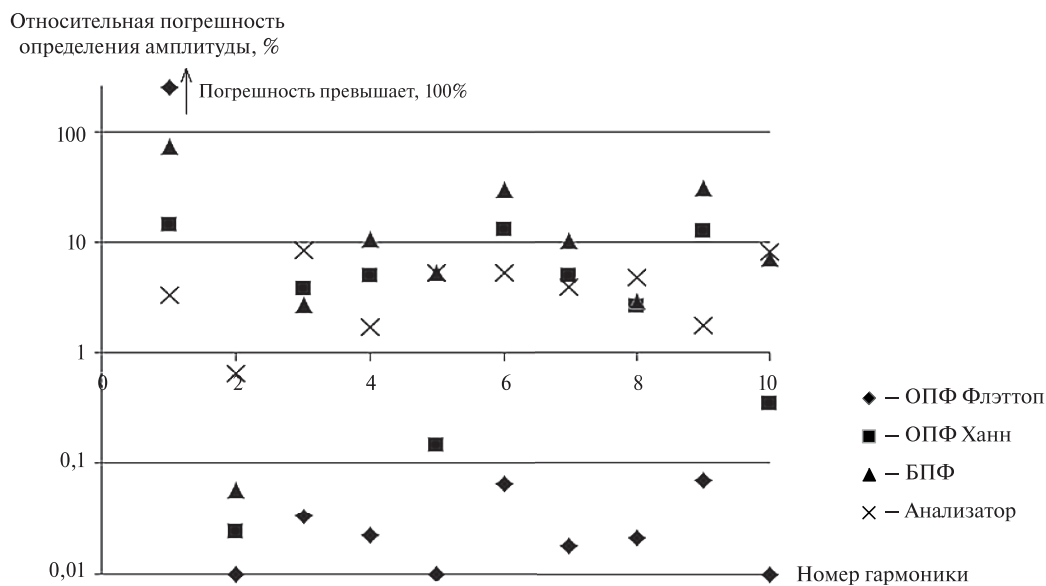


Рис. 4. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи 3 с (график в логарифмическом масштабе)
 Fig. 4. Relative error in determining the amplitudes at a recording time of 3 s (logarithmic scale)

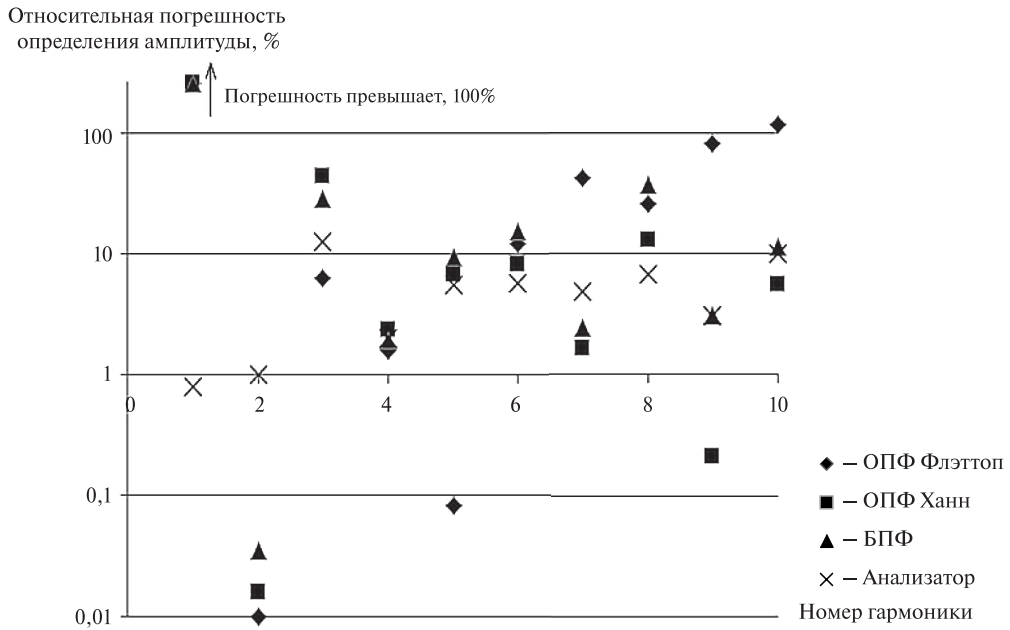


Рис. 5. Относительная погрешность определения амплитуд при времени записи равном 2 с (график в логарифмическом масштабе)
 Fig. 5. Relative error in determining the amplitudes at a recording time of 2 s (logarithmic scale)

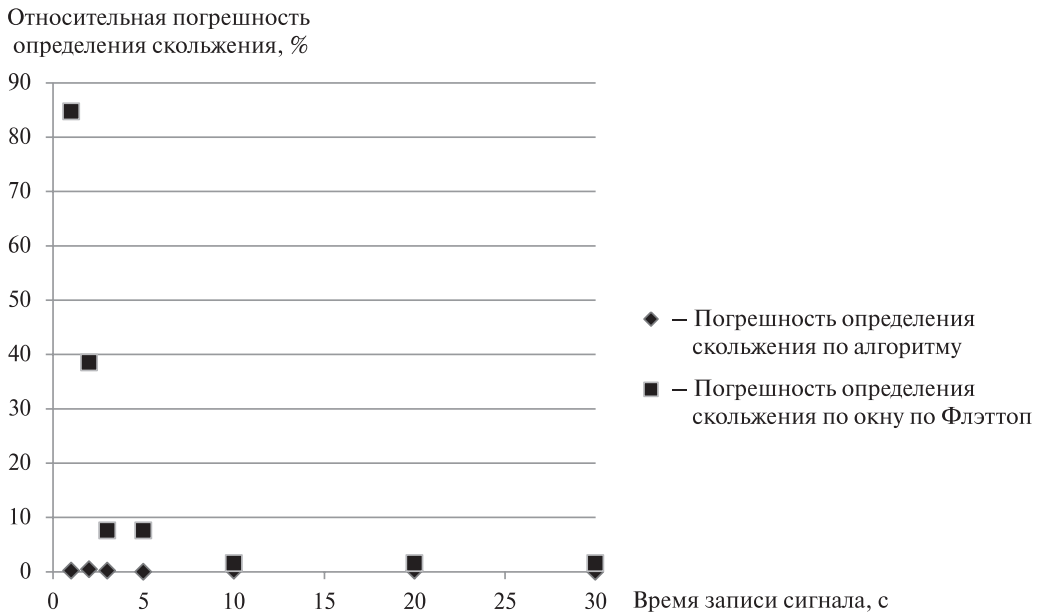


Рис. 6. Относительная погрешность определения скольжения
 Fig. 6. Relative error of slip determination

Таблица 3

Результаты определения скольжения с помощью окна Флэттоп и разработанного анализатора спектра

Table 3

Results of the slip determination using the Flat top window and the developed spectrum analyzer

Точное значение скольжения	Время записи сигнала	Значение скольжения, определённое двумя способами	
		Анализатор	ОПФ (Флэттоп)
0,02165	30	0,02165	0,022
	20	0,0217	0,022
	10	0,0216	0,022
	5	0,02165	0,02
	3	0,0216	0,02
	2	0,02155	0,03
	1	0,0216	0,04

Обсуждение результатов

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Как видно из рис. 2, 3 и табл. 2, при использовании в чистом виде БПФ и ОПФ с окнами высокого разрешения (на примере окна Ханна) погрешности измерения даже при достаточно большом времени записи сигнала (5–30 сек.) уже имеют неприемлемые значения, в то время как разработанный анализатор, а также ОПФ с окнами низкого разрешения (Флэттоп) определяют соответствующие гармоники с высокой точностью (погрешность не превышает нескольких процентов).

При малых значениях времени записи сигнала (2–3 сек.) даже с помощью окна Флэттоп становится невозможным точное определение амплитуд некоторых гармоник (рис. 4, 5). Одна из них — гармоника 1 (табл. 1), которая расположена близко к основной гармонике сети (гармоника 2 в табл. 1); здесь ширина главного лепестка в амплитудно-частотной характеристике окна Флэттоп имеет слишком большую величину (в 5 раз превышает ширину главного лепестка прямоугольного окна). Кроме того, анализатор на базе окна Флэттоп неверно определяет амплитуды гармоник ФОР высокого порядка (гармоники 7–10 на рис. 5). Как будет показано далее, причина этому — неверное определение скольжения, от которого зависят значения частот гармоник ФОР. При этом разработанный анализатор определяет все амплитуды гармоник ФОР с достаточно высокой точностью (погрешность не превышает 15%).

Результаты расчёта скольжения, представленные на рис. 6 и в табл. 3, показывают, что использование окна Флэттоп приводит к большим погрешностям определения скольжения даже при времени записи 5 сек., а при времени записи 1 и 2 сек. значение скольжения получалось завышенным почти в 2 раза. При этом разработанный алгоритм определяет скольжение практически без погрешности вплоть до времени записи сигнала 1 сек.

Было произведено тестирование разработанного анализатора спектра сигналом внешнего магнитного поля, который регистрировался датчиком Холла, установленным на корпусе электродвигателя. Результаты тестов как в отношении определения амплитуд гармоник ФОР, так и в отношении определения скольжения также показали более высокую (по сравнению с анализаторами, основанными на БПФ и ОПФ) эффективность применения разработанного анализатора спектра в области малых значений времени записи сигнала (1–5 сек.).

Заключение

Ведется активная разработка методов функционального контроля состояния узлов асинхронных электродвигателей, основанных на спектральном анализе сигналов. Традиционные методы спектрального анализа, основанные на БПФ или ОПФ, уже не устраивают разработчиков способов контроля электродвигателей, так как не могут обеспечить нужную точность и стабильность результатов, особенно

при уменьшении времени регистрации сигналов. Разработанный анализатор спектра на базе АВЗС успешно решает эту задачу, обеспечивая более высокую точность определения амплитуд и частот гармонических составляющих спек-

тра сигнала по сравнению с обычными БПФ и ОПФ. Еще одно его преимущество — высокая стабильность результатов, которая сохраняется даже при уменьшении времени регистрации сигнала вплоть до одной секунды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Дьяконов В.П.** Современные цифровые анализаторы спектра // Компоненты и технологии. 2010. № 5. С. 185–195.
- [2] Tektronix. Основы анализа спектра в реальном масштабе времени [Электр. ресурс]. URL: http://alfa-instr.ru/files/37U_17249_2.pdf. Дата обращения: 18.05.2017.
- [3] **Шауэрман А.А., Попов Н.В., Борисов А.А.** Разработка цифрового анализатора сигналов на базе ПЛИС FPGA // Международная конференция-семинар по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM'2009: Сборник трудов. 2009. С. 141.
- [4] **Коровкин Н.В., Грицутенко С.С.** О применимости быстрого преобразования Фурье для гармонического анализа несинусоидальных токов и напряжений // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 2. С. 72–86.
- [5] **Коровкин Н.В., Грицутенко С.С.** Эффективный алгоритм измерения параметров длинных линий для реализации на сигнальном процессоре // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 2. С. 87–100.
- [6] **Deery J.** The 'Real' History of Real-Time Spectrum Analyzers // Sound and vibration, January 2007, 40th anniversary issue. P. 54–59.
- [7] **Yahya A., Sidek A., Mohamad-Saleh J.** Design and Develop Wireless System Using Frequency Hopping Spread Spectrum // Engineering Letters, (Advance online publication: 4 November 2006). [Электр. ресурс] URL: http://www.engineeringletters.com/issues_v13/issue_3/EL_13_3_6.pdf (дата обращения: 18.05.2017).
- [8] **Claeys T., Vanoost D., Peuteman J., Vandebosch G.A. E., Pisssoort D.** Removing the spectral leakage in time-domain based near-field scanning measurements // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2015. Vol. 57. Issue 6. P. 1329–1337.
- [9] **Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines // The Institution of Engineering and Technology. 2008. 543 p.
- [10] **Thakur A., Wadhvani Dr. S., Wadhvani Dr. A.K.** Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis // International Journal of Computer Science and Information Technology Research. 2015. Vol. 3, Issue 3. P. 309–313.
- [11] **Ненао Н., Demian C., Capolino G.-A.** A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux senso // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. Vol. 39, Issue 5. P. 1272–1279.
- [12] **Gagdon B.C., Hopgood D.J.** Faltering pulse can reveal ailing motor // Elect. Rev. (Gr. Brit.). 1975. P. 37–38.
- [13] **Скоробогатов А.А.** Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. 2006. № 2. С. 75–78.
- [14] **Chen, Z. Shi Pu, Vagapov Y.** Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations // International Journal of Computer Applications. 2013. Vol. 69. № 14. P. 36–43.
- [15] **Pezzani C., Donolo P., Bossio G., Donolo M.** [et al] Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50. Iss. 2. P. 1373–1384.
- [16] **Kalaskar, C.S. Chaitali S., Vitthal J.** Gond Motor Current Signature Analysis to Detect the Fault in Induction Motor // Int. Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4, Iss. 6. P. 58–61.
- [17] **Liu D., Lu D.** Off-the-grid compressive sensing for broken-rotor-bar fault detection in squirrel-cage induction motors [Электр. ресурс] // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, Iss. 21. P. 1451–1456. URL: <http://www.merl.com/publications/docs/TR2015-096.pdf> (дата обращения: 18.05.2017).
- [18] **Новоселов Е.М. [и др]** Разработка метода автокоррекции времени записи при спектральном анализе сигналов // Вестник ИГЭУ. 2013. № 5. С. 29–37.
- [19] **Новоселов Е.М. [и др]** Экспериментальное доказательство оптимизации процесса спектрального анализа сигнала с применением алгоритма автокоррекции времени записи // Вестник ИГЭУ. 2014. № 1. С. 40–44.
- [20] **Новоселов Е.М. [и др]** Оценка достоверности определения скольжения асинхронных электродвигателей по гармоникам эксцентриситета ротора // Вестник ИГЭУ. 2015. № 3. С. 44–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НАЗАРЫЧЕВ Александр Николаевич — доктор технических наук ректор Петербургского энергетического института повышения квалификации.
E-mail: rector@peipk.spb.ru

НОВОСЁЛОВ Евгений М. — ассистент Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: captain.udgin@gmail.com

СТРАХОВ Александр Сергеевич — аспирант Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: sstrakhov57@mail.ru

СКОРОБОГАТОВ Андрей Александрович — кандидат технических наук доцент Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина.

E-mail: aaskor.20@yandex.ru

КОРОВКИН Николай Владимирович — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

REFERENCES

- [1] **Dyakonov V.P.** Sovremennyye tsifrovyye analiza-tory spectra. *Komponenty i tekhnologii*. 2010. № 5. S. 185–195. (rus.)
- [2] Tektronix. Osnovy analiza spektra v realnom masshtabe vremeni. [elektr. resurs] URL: http://alfa-instr.ru/files/37U_17249_2.pdf (data obrashcheniya: 18.05.2017). (rus.)
- [3] **Shaurman A.A., Popov N.V., Borisov A.A.** Raz-rabotka tsifrovogo analizatora signalov na baze PLIS FPGA. *Mezhdunarodnaya konferentsiya-seminar po mikro/nanotekhnologiyam i elektronnyim priboram EDM'2009: sbornik trudov*. 2009. S. 141. (rus.)
- [4] **Korovkin N.V., Gritsutenko S.S.** O primenimosti bystrogo pre-obrazovaniya Furye dlya garmonicheskogo analiza nesinusoidalnykh tokov i napryazheniy. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2017. № 2. S. 72–86. (rus.)
- [5] **Korovkin N.V., Gritsutenko S.S.** Effektivnyy algoritm izmere-niya parametrov dlinnykh liniy dlya realizatsii na signalnom protsessore. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2017. № 2. S. 87–100. (rus.)
- [6] **Deery J.** The ‘Real’ History of Real-Time Spectrum Analyzers. *Sound and vibration*. January 2007, 40th anniversary issue. P. 54–59.
- [7] **Yahya A., Sidek A., Mohamad-Saleh J.** Design and Develop Wireless System Using Frequency Hopping Spread Spectrum. *Engineering Letters*. (Advance online publication: 4 November 2006). [elektr. resurs] URL: http://www.engineeringletters.com/issues_v13/issue_3/EL_13_3_6.pdf (data obrashcheniya: 18.05.2017).
- [8] **Claeys T., Vanoost D., Peuteman J., Vandebosch G.A.E., Pissoor D.** Removing the spectral leakage in time-domain based near-field scanning measurements. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2015. Vol. 57. Issue 6. P. 1329–1337.
- [9] **Peter Tavner, Li Ran, Jim Penman, Howard Sedding.** Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines. *The Institution of Engineering and Technology*, 2008. 543 p.
- [10] **Thakur A., Wadhvani Dr. S., Wadhvani Dr. A.K.** Motor Current Signature Analysis as a Tool for Induction Machine Fault Diagnosis. *International Journal of Computer Science and Information Technology Research*. 2015. Vol. 3, Issue 3. P. 309–313.
- [11] **Henaio H., Demian C., Capolino G.-A.** A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux senso. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003. Vol. 39. Issue 5. P. 1272–1279.
- [12] **Gagdon B.C., Hopgood D.J.** Faltering pulse can reveal ailing motor. *Elect. Rev. (Gr. Brit.)*. 1975. P. 37–38.
- [13] **Skorobogatov A.A.** Analiz spektra magnitnogo polya v zazore asinkhronnogo dvigatelya pri povrezhdenii obmotki rotora. *Vestnik IGEU*. 2006. № 2. S. 75–78. (rus.)
- [14] **Chen, Z. Shi Pu, Vagapov Y.** Wavelet Transform based Broken Rotor-bar Fault detection and Diagnosis Performance Evaluations. *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol. 69. № 14. P. 36–43.
- [15] **Pezzani C., Donolo P., Bossio G., Donolo M.** [et al] Detecting Broken Rotor Bars With Zero-Setting Protection. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014. Vol. 50. Issue 2. P. 1373–1384.
- [16] **Kalaskar, C.S. Chaitali S., Vitthal J.** Gond Motor Current Signature Analysis to Detect the Fault in Induction Motor. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 4. Issue 6. P. 58–61.
- [17] **Liu D., Lu D.** Off-the-grid compressive sensing for broken-rotor-bar fault detection in squirrel-cage induction motors. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48. Issue 21. pp. 1451–1456. [Elektr. resurs] URL: <http://www.merl.com/publications/docs/TR2015-096.pdf> (data obrashcheniya: 18.05.2017).
- [18] **Novoselov Ye.M. [i dr]** Razrabotka metoda avtokorrektsii vremeni zapisi pri spektralnom analize signalov. *Vestnik IGEU*. 2013. № 5. S. 29–37. (rus.)
- [19] **Novoselov Ye.M. [i dr]** Eksperimentalnoye dokazatelstvo optimizatsii protsessa spektralnogo analiza signala s primeneniym algoritma avtokorrektsii vremeni zapisi. *Vestnik IGEU*. 2014. № 1. S. 40–44. (rus.)
- [20] **Novoselov Ye.M. [i dr]** Otsenka dostovernosti opredeleniya skolzheniya asinkhronnykh elektrodvigateley po garmonikam ekstsentsiteta rotora. *Vestnik IGEU*. 2015. № 3. S. 44–51. (rus.)

AUTHORS

NAZARYCHEV Aleksandr N. — *Federal state educational establishment St. Petersburg power engineering institute for advanced studies.*

E-mail: rector@peipk.spb.ru

NOVOSELOV Evgenii M. — *Ivanovo state power engineering university.*

E-mail: captain.udgin@gmail.com

STRAKHOV Aleksandr S. — *Ivanovo state power engineering university.*

E-mail: sstrakhov57@mail.ru

SKOROBOGATOV Andrei A. — *Ivanovo state power engineering university.*

E-mail: aaskor.20@yandex.ru

KOROVKIN Nikolai V. — *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 26 июня 2017 г.