

УДК 622.831.322

А.В. Шадрин, Ю.А. Бирева

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ТОЧНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ

В соответствии с требованиями действующих нормативных документов в последние годы в России разрабатываются и внедряются десятки многофункциональных систем безопасности угольных шахт [1]. В их числе и системы геодинамического контроля, предназначенные для прогноза газодинамических явлений: горных ударов, внезапных выбросов угля и газа и им подобных явлений. Работа таких систем стала возможной благодаря достижениям информационных технологий, позволяющих реализовывать сложные алгоритмы обработки информации при малом потреблении мощности, что позволяет создавать оборудование в искрозащищенном исполнении.

Среди систем автоматизированного прогноза внезапных выбросов угля и газа наибольшее применение находят акустические, в частности, основанные на анализе акустической эмиссии горного массива (сейсмоакустический метод) и анализе спектрального состава шумов действующего горного оборудования (спектрально-акустический метод) [2].

Качество цифровой обработки сигнала зависит от параметров преобразования аналогового сигнала, снимаемого с датчика, в цифровую форму. К ним относят частоту дискретизации и длину экспериментальных выборок (блоков, на которые разбивается измеряемый сигнал), с которыми проводится быстрое преобразование Фурье (БПФ) для определения спектрального состава сигнала.

В соответствии с теоремой отсчетов В.А. Котельникова для корректного оцифровывания сигнала частота дискретизации аналогового сигнала должна превышать верхнее значение частоты спектра преобразуемого сигнала не менее чем в два раза [3]. Во всех известных многофункциональных системах безопасности угольных шахт это правило используется и в технических характеристиках частота дискретизации обязательно указывается.

Другой параметр - длина экспериментальных выборок, - определяет разрешение по частоте Δf в соответствии с выражением [3]:

$$\Delta f = \frac{f_o}{N}, \quad (1)$$

где f_o - частота дискретизации, а N – длина выборки. Несмотря на то, что этот параметр существенно влияет на точность определения спектрального состава сигнала, в технических характеристиках известных многофункциональных систем безопасности угольных шахт он не приводится, как малозначащий. Покажем, что от выбора

длины выборки существенно зависит точность определения показателя выбросоопасности, определенного спектрально-акустическим методом.

Показатель выбросоопасности при спектрально-акустическом прогнозе определяется отношением высокочастотной и низкочастотной частей спектра шумов работающего вблизи контролируемой зоны массива горного оборудования [4]. Из практики применения этого метода известно, что область низких частот целесообразно определить в пределах 10-300 Гц, а область высоких частот - в пределах 600-2000 Гц [4].

Определим зависимость погрешности определения этого показателя от длины экспериментальной выборки.

Решение будем проводить с помощью пакета прикладных программ MATLAB, который позволяет симулировать необходимые гармоники, провести быстрое преобразование Фурье, определить спектр сигнала (амплитуды имеющихся гармоник) и выполнить другие необходимые математические операции. При этом погрешностью определении показателя выбросоопасности за счет ошибки, вносимой системой MATLAB при симулировании гармоник, с помощью которых моделируется сигнал шумов работающего оборудования, будем пренебрегать.

Полоса рабочих частот большинства используемых для приема акустических сигналов электродинамических преобразователей находится в диапазоне 10 Гц – 2 кГц. Поэтому частоту дискретизации в соответствии с теоремой отсчетов В.А. Котельникова достаточно взять равной 4 кГц.

Для решения поставленной задачи будем моделировать источник акустических шумов шестью гармониками: по три гармоники, равномерно распределенных в низкочастотной и высокочастотной частях спектра. Моделируемые низкие частоты выберем равными 15, 173 и 287 Гц; а высокие частоты равными 653, 1313 и 1987 Гц. Для простоты решения задачи установим амплитуды всех моделируемых гармоник равными 1 В.

Показатель выбросоопасности определим как отношение норм сигнала высокочастотной и низкочастотной частей спектра:

$$K = \frac{\sqrt{\sum_i A_{vi}^2}}{\sqrt{\sum_j A_{nj}^2}}, \quad (2)$$

где A_{vi} и A_{nj} - амплитуда i -ой высокочастотной и j -ой низкочастотной гармоники.

Тогда в соответствии с условиями задачи ко-

коэффициент выбросоопасности до оцифровывания

$$K_\delta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^3 A_{\delta i}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^3 A_{\eta j}^2}} = 1 , \quad (3)$$

Предположим, что акустический сигнал, состоящий из различных комбинаций из указанных гармоник, поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), работающего с частотой дискретизации $f_\delta = 4$ кГц. Сигналы с выхода АЦП формируются в блоки длиной N , которые далее поступают в микропроцессор, где с помощью операции БПФ находится спектр сигнала, т.е. амплитуды гармоник.

Известно, что действительное БПФ реализуется с помощью комплексного дискретного преобразования Фурье, и для него количество гармоник равно $N/2+1$, расположенных от «нулевой» до максимальной $f_{max} = 0,5f_\delta$ (в нашем случае $f_{max} = 2$ кГц) с равным шагом Δf , определенным по формуле (1) [3].

Если ДПФ искажает спектр входного сигнала, то помимо гармоник, поступающих на вход АЦП, в результате БПФ мы получим дополнительные гармоники, количество которых и их амплитуды зависят от длины выборки. Проведем расчет спектра сигнала для значений $N = 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048$ и 4096 отсчетов. Затем определим показатель выбросоопасности после БПФ (с учетом дополнительно появившихся гармоник):

$$K_n = \frac{\sqrt{\sum_{i=n}^{i_{max}} A_{\delta i}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{j_{max}} A_{\eta j}^2}}, \quad (4)$$

где в нашем случае: $i_{nmin} = 1$; $i_{nmax} = 300/\Delta f$; $i_{bmin} = 600/\Delta f$; $i_{bmax} = 2000/\Delta f$.

Относительную погрешность определения показателя выбросоопасности ΔK определим по формуле:

$$\Delta K = \frac{|K_\delta - K_n|}{K_\delta} \cdot 100\%,$$

В соответствии с изложенной методикой сначала исследовали зависимость относительной по-

грешность определения показателя выбросоопасности от места расположения моделируемых частот в выбранных областях низких и высоких частот сигналов шумов. Для этого рассчитали ΔK для трех пар частот, состоящих из одной низкочастотной и одной высокочастотной гармоник, взятых соответственно в начале, в середине и в конце низкочастотной и высокочастотной областей сигналов шумов. Данные сведены в табл. 1.

Из неё видно, что относительная погрешность определения показателя выбросоопасности ΔK с ростом длины выборки N снижается. При этом для обеспечения относительной погрешности не выше 5% достаточно выбрать $N \geq 128$ отсчетов. Поэтому дальнейшие исследования проводили для $N \geq 128$ отсчетов.

Из табл. 1 видно также, что относительная погрешность определения ΔK незначительно зависит от места положения гармоник в исследуемой спектральной области шумов.

Исследовали также влияние ширины спектра входного сигнала на относительную погрешность определения ΔK при различных длинах выборки N . Для этого низкочастотную и высокочастотную части входного сигнала, подлежащих оцифровыванию, формировали соответственно по одной, по две и по три гармоники. Основной вывод из данных, представленных в табл. 2, заключается в том, что для длин выборки $N \geq 128$ относительная погрешность определения ΔK для сигналов различной ширины спектра хотя и несколько зависит от спектрального состава, не превышает 5%.

Наличие высокочастотных помех в спектре входного сигнала, частота которых в рассматриваемой задаче превышает 2 кГц, может повлиять на результаты оцифровывания сигнала (эффект наложения спектра [3]). Исключение этого эффекта возможно двумя путями.

Первый путь заключается в установке перед АЦП так называемого антиэлайзингового фильтра, который подавляет помехи. Однако его конструкция достаточно сложна, требует высокой точности подбора номиналов входящих конденса-

Таблица 1. Относительная погрешность определения показателя выбросоопасности ΔK в зависимости от длины выборки N для трех вариантов комплектования входного сигнала, составленного из пары низкочастотной f_h и высокочастотной f_b гармоник, взятых соответственно в начале, в середине и в конце низкочастотной и высокочастотной областей сигналов шумов

N	Δf , Гц	$i_{nmax} = 300/\Delta f$	$i_{bmin} = 600/\Delta f$	$i_{bmax} = 2000/\Delta f$	$\Delta K, \%$		
					$f_{h1}=15, f_{b1}=653$	$f_{h2}=173, f_{b2}=1313$	$f_{h3}=287, f_{b3}=1987$
32	123,0	2	5	16	10,03	9,99	10,01
64	62,5	5	10	32	9,34	8,99	9,16
128	31,25	10	19	64	4,98	3,99	3,99
256	15,625	19	38	128	2,87	2,68	2,46
512	7,8125	38	77	256	1,14	1,42	1,31
1024	3,9063	77	154	512	0,06	0,31	0,06
2048	1,9531	154	307	1024	0,03	0,16	0,02
4096	0,9766	308	615	2048	0	0	0

Таблица 2. Относительная погрешность определения показателя выбросоопасности ΔK в зависимости от длины выборки N для трех вариантов ширины спектра входного сигнала (содержащего по одной, по две и по три гармоники соответственно в низкочастотной и высокочастотной областях моделируемого сигнала)

N	Δf , Гц	ΔK , %		
		$f_{\text{h}1}=15, f_{\text{b}1}=653$	$f_{\text{h}1}=15, f_{\text{h}2}=173, f_{\text{b}1}=653, f_{\text{b}2}=1313$	$f_{\text{h}1}=15, f_{\text{h}2}=173, f_{\text{h}3}=287, f_{\text{b}1}=653, f_{\text{b}2}=1313, f_{\text{b}3}=1987$
128	31,25	4,98	4,03	4,64
256	15,625	2,87	2,68	3,52
512	7,8125	1,14	2,55	1,61
1024	3,9063	0,06	0,32	0,49
2048	1,9531	0,03	0,16	0,2
4096	0,9766	0	0,01	0,01

Таблица 3. Относительная погрешность определения показателя выбросоопасности ΔK в зависимости от длины выборки N для двух значений частоты дискретизации f_δ

	f_δ/N	128	256	512	1024	2048	4096
ΔK	$f_\delta=4$ кГц	4,64	3,52	1,61	0,49	0,2	0,01
	$f_\delta=8$ кГц	4,99	3,43	1,53	0,85	0,43	0,01

торов и резисторов [5]. Поэтому данный путь часто бывает нежелательным, особенно при разработке переносных приборов, к которым предъявляются жесткие требования по массе, габаритам и потребляемой мощности.

Второй путь состоит в выборе частоты дискретизации входного сигнала не менее чем в два раза превышающей максимальную частоту в спектре помехи. Этот путь не требует включения в конструкцию прибора дополнительных электронных устройств и поэтому более предпочтителен, нежели первый путь. Однако увеличение частоты дискретизации ведет к снижению разрешения оцифровывания по частоте в соответствии с (1).

Для исследования влияния увеличения частоты дискретизации на относительную погрешность определения показателя выбросоопасности, определенного спектрально-акустическим методом, провели сравнение значений ΔK для двух значений частоты дискретизации в 2 и 4 кГц при одинак-

ковом спектральном составе входного сигнала, содержащем все 6 вышеуказанных гармоник. Данные приведены в табл. 3, где видно, что увеличение частоты дискретизации при прочих равных условиях не привело к существенному изменению относительной погрешности определения ΔK . Таким образом, для обеспечения необходимой относительной погрешности определения показателя выбросоопасности спектрально-акустическим методом при повышении частоты дискретизации нет необходимости увеличивать длины выборок оцифрованных сигналов.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что для обеспечения приемлемой погрешности в определении показателя выбросоопасности алгоритмами, основанными на цифровой обработке экспериментальных данных, необходимо наряду с обоснованием частоты дискретизации обосновывать и длину экспериментальных выборок оцифрованного сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2013. – 295 с.
- Шадрин А.В. Автоматизированный мониторинг противовыбросовых мероприятий при разработке угольных пластов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.20 / Александр Васильевич Шадрин; Кузбасский гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2004. – 356 с.
- Смит, Стивен. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников– М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
- Мирер С.В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов / С.В.Мирер, О.И. Хмара, А.В. Шадрин. - Кемерово: Кузбассвузиздат, 1999. - 92 с.
- Шадрин А.В. Применение антиэлайзинговых фильтров в горной геофизике / А.В. Шадрин, Ю.А. Бирева // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной пром-ти. 2014. – №1. – С.152-157.

Авторы статьи

Шадрин Александр Васильевич, докт техн. наук начальник центра науч- ных программ и анализа (КемГУ, г. Кемерово) Email: ashadr1951@mail.ru	Бирева Юлия Алексеевна магистрант КемГУ E-mail: julia@bireva@mail.com
---	--