

Буріння свердловин

УДК 622.24

АЛГОРИТМ ПОРІВНЯННЯ ЗНАЧЕНЬ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ДИНАМІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ОСЬОВОЇ СИЛИ НА ДОЛОТІ ЗА РІЗНОЇ ШИРИНИ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО ВІКНА

В. М. Мойсишин, В. В. Рис, Б. Д. Борисевич, І. М. Гураль

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-21-23; e-mail: math @ nung. edu. ua*

За результатами експериментальних досліджень зміни осьової динамічної сили на вибої свердловини встановлено, що між шириною фільтраційного вікна V_E , яке використовується під час визначення спектральної щільності, і значеннями цієї щільності, існує емпірична кореляційна залежність $\bar{K}_{V_E} = f(V_E)$, ймовірність існування якої більша за 0,98. Визначається середнє значення похибки між оцінками дисперсій експериментальних досліджень і дисперсіями, обчисленими з використанням залежності $\bar{K}_{V_E} = f(V_E)$. За середнім значенням похибки, що не перевищує 10%, вибирається інтервал значень V_E , для якого значення спектральної щільності порівнюються.

Ключові слова: *стендові експериментальні дослідження, осьова динамічна сила, випадковий процес, стаціонарність, ергодичність, автокореляційна функція, спектральна щільність, фільтраційні вікна, емпірична кореляційна залежність.*

Вступ

Руйнування гірської породи під дією осьового навантаження на шарошкове долото – основний процес буріння нафтових та газових свердловин. Шарошкове долото рухаючись нерівною поверхнею вибою свердловини здійснює вертикальні переміщення, які породжують осьову динамічну силу $F_{дин}$. Загальне осьове навантаження на долото можна подати сумою двох складових: статичної $F_{oc.cm}$ і динамічної $F_{дин}$, яка в процесі буріння може приймати як додатні так і від’ємні значення. Отже,

$$F_{oc} = F_{oc.cm} \pm F_{дин}. \quad (1)$$

Осьова динамічна сила (зокрема при розбурюванні твердих порід) може перевищувати $F_{oc.cm}$ до 3,5 разів. Величина $F_{дин}$ визначає не тільки характер динамічного руйнування породи, але й динамічні напруження у вузлах та деталях бурильної колони і, як наслідок, їх довговічність.

Процес зміни осьової динамічної сили в часі представляє собою випадкову функцію, тобто функцію, яка в результаті досліду може прийняти той чи інший конкретний вид, який не можливо наперед передбачити. Згідно [2] емпіричний закон розподілу миттєвих значень $F_{дин}$ з ймовірністю 0,95 відповідає нормальному, а сама функція є стаціонарною та ергодичною.

Основною статистичною характеристикою випадкового центрованого стаціонарного ергодичного процесу, яким є процес зміни осьової динамічної сили в часі, є автокореляційна функція, безпосередня оцінка якої для вибірки значень $F_{дин}$ об'єму N визначається за формулою

$$R_r = R_{F_{дин}}(rh) = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} F_{дин.n} \cdot F_{дин.n+r}, \quad r = 0, 1, 2, 3 \dots m, \quad (2)$$

де m – число кроків автокореляційної функції.

Величина часового зсуву, віддаль по осі t від початку відліку, становить rh , де r – номер кроку функції.

Максимальна величина часового зсуву

$$\tau = mh. \quad (3)$$

Похідною характеристикою від автокореляційної функції є спектральна щільність, яка характеризує частотний спектр випадкового процесу. Згідно [3] спектральна щільність – це розподіл потужності процесу зміни $F_{дин}$ по частотних складових спектра.

Для визначення спектральної щільності через кореляційну функцію використовується інтеграл Фур'є, який представляє собою суму гармонічних коливань з безперервним спектром.

Визначення спектральної щільності через кореляційну функцію є відомим стандартним методом, який іноді ще називають методом Блекмана і Тьюкі. Таким чином,

$$S_{F_{дин}}(f) = 4 \int_0^{\infty} R_{F_{дин}}(\tau) \cos 2\pi f\tau d\tau. \quad (4)$$

Дискретний аналог залежності (4) має вигляд

$$S_{F_{дин}}(f) = 2h \left[R_0 + 2 \sum_{r=1}^{m-1} R_{F_{дин}} \cos \left(\frac{\pi r f}{f_{зп}} \right) + R_r \cos \left(\frac{\pi f}{f_{зп}} \right) \right], \quad (5)$$

де R_0 – оцінка дійсного середнього значення квадрата значень випадкового процесу; h – крок дискретизації; R_r – оцінка автокореляційної функції для кроку r ; $f_{зп}$ – частота зрізу.

Значення R_0 і $f_{зп}$ визначають за формулами:

$$R_0 = R_{F_{\text{дан}}} (0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (F_{\text{дан},n})^2, \quad (6)$$

$$f_{\text{зр}} = \frac{1}{2h}. \quad (7)$$

Постановка задачі дослідження

Недоліком спектрального аналізу є його непараметричність, тобто відсутність можливості загальної оцінки параметрів кривої спектральної щільності. Оцінка спектральної щільності здійснюється по кожній координаті окремо [1]. Кожна координата спектральної щільності має, не залежно від довжини реалізації, тільки два степеня вільності. Обґрунтованість оцінки спектральної щільності досягається згладжуванням спектра за допомогою функцій, які називають спектральними вікнами. До найбільш поширених спектральних вікон відносять вікно Бартлета. Зрізане згладжування здійснюється за формулами

$$S_{F_{\text{дан}}}(\omega_i) = \frac{1}{2\pi} \left[R_0 + 2 \sum_{\tau=1}^m \lambda_{\tau} R_{F_{\text{дан}}}(\tau) \cos \omega_i \tau \right], \quad (8)$$

$$\lambda_{\tau} = 1 - \tau / m; 1 \leq \tau \leq m. \quad (9)$$

Дисперсія під час застосування цього вікна пропорційна виразу $\frac{2}{3} \cdot \frac{m}{N}$, число степенів вільності – $\frac{2N}{m}$. З ростом довжини реалізації збільшується N . Під час цього оцінка дисперсії падає, тобто стає обґрунтованою. Згідно формул (8) і (9) параметри спектрального вікна визначаються числом кроків автокореляційної функції m . При зменшенні m покращується точність оцінки, але погіршується розділювальна здатність (збільшується ширина пропускання фільтра), тобто під час вибору величини вікна потрібно шукати розумний компроміс. За [1] пропонується наступний алгоритм проведення спектрального аналізу:

1. Для вибірки значень випадкової величини визначити автокореляційну функцію;

2. Методом Фур'є-перетворення для вибраного типу спектрального вікна одержати графіки спектральної щільності потужності процесу зміни випадкової величини під час використання різних значень кроку автокореляційної функції. На основі аналізу одержаних графіків вибрати таке значення m , яке, на думку експериментатора, найповніше характеризує внутрішню структуру процесу зміни випадкової величини.

Такий алгоритм є недосконалим, оскільки за результатами досліджень, проведених за неоднакових умов, часто приходиться аналізувати спектральні щільності, одержані з використанням різних величин фільтраційного вікна, а цей алгоритм не дозволяє порівнювати (співставляти) значення таких щільностей.

Для порівняння значень спектральної щільності, одержаних за різних величин фільтраційного вікна, нами пропонується наступний алгоритм:

1. Для різних умов проведення експериментальних досліджень визначити автокореляційні функції і методом Фур'є-перетворення одержати графіки спектральної щільності за використання різних величин фільтраційного вікна (число значень не менше п'яти, $n \geq 5$).

2. Підібрати емпіричні кореляційні залежності $S_{f,i} = f(B_E)$, де $S_{f,i}$ – оцінка дисперсії на частоті f_i гармонічної складової спектральної щільності, B_E – ширина фільтраційного вікна.

3. За ймовірності існування емпіричних залежностей $S_{f,i} = f(B_E)$ більшої за 0,9 пропонується ввести безрозмірний коефіцієнт K_{B_E} , який враховує зменшення оцінкового значення спектральної щільності зі збільшенням величини фільтраційного вікна і визначається за відношенням $\frac{S_{f,B_E,n}}{S_{f,B_E,\min}}$, де $S_{f,B_E,\min}$ – оцінкове значення спектральної щільності, визначене за використання фільтраційного вікна з найменшою шириною ($n=1$).

4. Визначення статистичних характеристик вибірок значень K_{B_E} для всіх гармонічних складових спектра. Для скорегованих (одержаних після видалення артефактів) середніх значень вибірок визначається найкращий вид апроксимуючої залежності $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$.

5. Визначається середнє значення похибки між оцінками дисперсій експериментальних досліджень і дисперсіями, обчисленими із використанням залежності $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$. За середнім значенням похибки, що не перевищує 10%, вибирається інтервал значень B_E , для якого значення спектральної щільності порівнюються

Приклад використання запропонованого алгоритму

Під час експериментальних досліджень процесу зміни осьової динамічної сили на долоті, де змінним фактором була жорсткість компонування бурильного інструменту, яка встановлювалась на двох рівнях, було одержано 16-ть реалізацій: для реалізацій №1...8 жорсткість S складала 225 кН/м, а для реалізацій №9...16 жорсткість S дорівнювала 6000кН/м. За цими реалізаціями було обчислено спектральну щільність за різної ширини (роздільної здатності) фільтраційного вікна. Графіки спектральної щільності потужності процесу зміни осьової динамічної сили на долоті одержані для 8-ми значень числа кроків m автокореляційної функції (25; 50; 75; 100; 125; 150; 175; 200).

Роздільна здатність (ширина фільтраційного вікна) визначалась за формулою

$$B_E = \frac{1}{mh}, \text{ Гц} \quad (10)$$

де h – крок дискретизації безперервного запису осьової динамічної сили, $h=0,002$ с.

Таблиця 1. Значення числа кроків авто кореляційної функції m і ширини фільтраційного вікна B_E

m	25	50	75	100	125	150	175	200
B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5

В табл. 2 наведені значення оцінки дисперсій на частотах f_i гармонічних складових спектра потужності процесу зміни осьової динамічної сили на долоті.

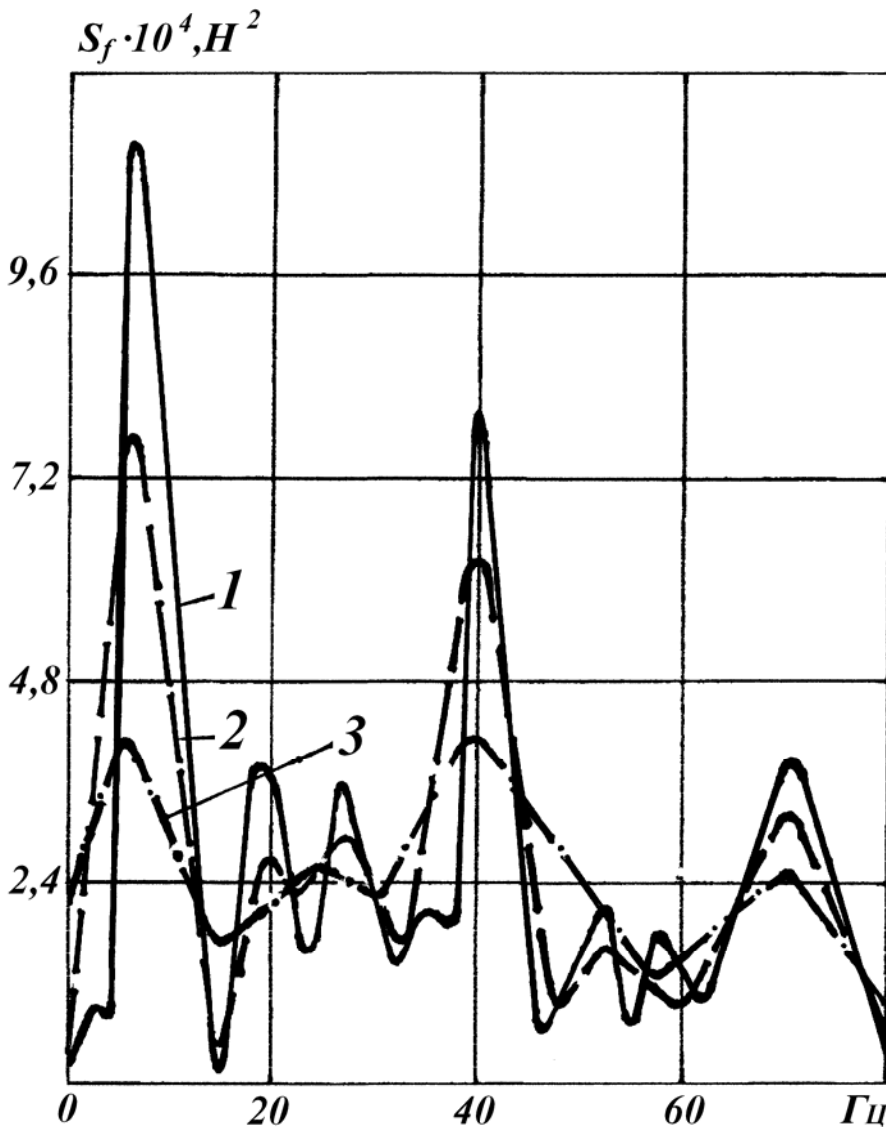
Таблиця 2. Значення спектральної щільності S_f, H^2

№р	1	2	3	4	5	6	7	8	
B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5	
$f_i,$ Гц	6,65	25832	41435	54925	69380	78895	91542	102985	104792
	20	12357	17929	22284	26138	29149	32281	35172	37821
	27	22567	27222	29751	30715	32642	34569	36978	38303
	40	30956	39990	49867	59623	67934	74679	80702	85399
	70	17947	24211	29992	33967	36617	36978	40110	42158
	92	5245	6099	6660	7227	7347	7588	7950	8432
№р	9	10	11	12	13	14	15	16	
B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5	
$f_i,$ Гц	2,22	42651	48250	52998	54584	56250	55407	60105	64802
	20	61911	91181	121534	144420	161523	162126	181518	198622
	40	12060	21801	28788	36015	42880	50469	58180	66970
	70	32281	36737	47096	56371	65886	74920	82147	87808
	88	2088	2964	3638	4336	4577	5059	5541	6143

На рис. 1 і 2 зображено спектральні щільності осьової динамічної сили, одержані за різної ширини спектрального вікна B_E (2,5; 5 і 10 Гц).

Згідно цих рисунків, незалежно від жорсткості компонування бурильного інструменту, із зменшенням величини B_E збільшується оцінкове значення спектральної щільності на гармонічних складових спектра та кількість гармонічних складових. За жорсткості 225 кН/м із зменшенням ширини вікна від 20 Гц до 2,5 Гц кількість цих складових зростає від 6 до 9, а за жорсткості 6000 кН/м – від 5 до 10.

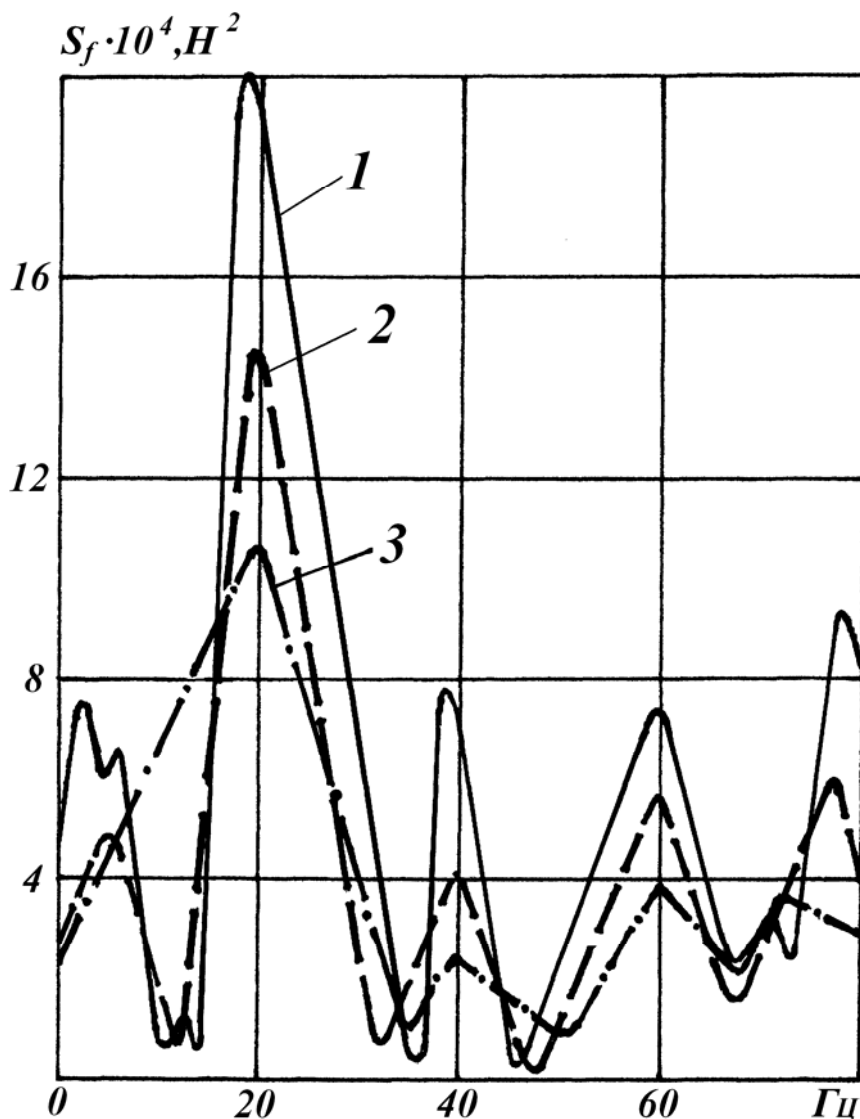
В табл. 3 наведено емпіричні кореляційні залежності $S_{f,i} = f(B_E)$ та результати перевірки умов задовільної апроксимації цими залежностями значень спектральної щільності.



1 – реалізація 8, $B_E=2,5$ Гц; 2 – реалізація 5, $B_E=5$ Гц; 3 – реалізація 2, $B_E=10$ Гц

Рис. 1. Спектральна щільність потужності процесу зміни осьової динамічної сили для компонування бурильного інструменту жорсткістю 225 кН/м

Згідно даних табл. 3 ймовірність існування емпіричних залежностей $S_{f,i} = f(B_E)$ для гармонічних складових спектра всіх 16-ти реалізацій більша за 0,98.



1 – реалізація 16, $B_E=2,5$ Гц; 2 – реалізація 12, $B_E=5$ Гц;
3 – реалізація 10, $B_E=10$ Гц

Рис. 2. Спектральна щільність потужності процесу зміни осевої динамічної сили для компонування бурильного інструменту жорсткістю 6000 кН/м

Далі за відношенням $\frac{S_{f.B_E.n}}{S_{f.B_E.min}}$ знаходимо безрозмірний коефіцієнт

K_{B_E} , де $S_{f.B_E.min}$ – оцінкове значення спектральної щільності, визначене за використання фільтраційного вікна з найменшою шириною ($n=1$).

Наприклад, згідно табл. 2 для 7-мої реалізації та частоти 6,65 Гц оцінкове значення спектральної щільності – 102985 H^2 . Ширина фільт-

раційного вікна для цього значення становить 2,86 Гц, для нашого прикладу $n=2$. Оцінкове значення спектральної щільності на цій частоті для найменшої ширини рівне $104792 H^2$. Для вікна $B_E=2,86$ Гц значення безрозмірного коефіцієнта $K_{B_E.7.2} = \frac{S_{f.B_E.1}}{S_{f.B_E.min}} = \frac{102985}{104792} = 0,9828$.

Таблиця 3. Результати підбору залежностей $S_{f,i} = f(B_E)$ та перевірка умов задовільної апроксимації ними значень спектральної щільності

№ реал.	f_i , Гц	Емпіричні залежності	Вибіркове значення коефіцієнта кореляції	Перевірка умови $\sigma_0 < 0, I\bar{S}_{f,i}$
1...8	6,65	$S_{f.1} = 20781,2 \cdot B_E^{-0,6959486}$	-0,8856 P>0,99	2383<7122
	20	$S_{f.2} = 61735,82 \cdot B_E^{-0,53698}$	-0,8990 P>0,99	94<2664
	27	$S_{f.3} = 46916,4 \cdot B_E^{-0,2443095}$	-0,9115 P>0,99	665<3159
	40	$S_{f.4} = 135793,6 \cdot B_E^{-0,5089647}$	-0,8801 P>0,99	1359<6114
	70	$S_{f.5} = 62671,97 \cdot B_E^{-0,4085451}$	-0,9415 P>0,999	1076<3275
	92	$S_{f.6} = 10065,31 \cdot B_E^{-0,2175874}$	-0,9274 P>0,999	1114<707
9...16	2,22	$S_{f.1} = 72685,02 \cdot B_E^{-0,1779481}$	-0,8977 P>0,99	1759<5791
	20	$S_{f.2} = 333898,6 \cdot B_E^{-0,5545269}$	-0,9181 P>0,99	5963<14035
	40	$S_{f.3} = 134782,6 \cdot B_E^{-0,8057328}$	-0,8491 P>0,98	1196<3965
	70	$S_{f.4} = 135577,4 \cdot B_E^{-0,5183398}$	-0,8294 P>0,98	3395<6041
	88	$S_{f.5} = 9495,453 \cdot B_E^{-0,5055979}$	-0,8965 P>0,998	104<429
Прим.: P – ймовірність кореляційного зв'язку між значеннями $S_{f,i}$ і B_E				

Значення безрозмірного коефіцієнта K_{B_E} , обчислені для всіх 16-ти реалізацій, наведені в табл. 4.

В табл. 5 наведені статистичні характеристики вибірок значень безрозмірного коефіцієнта K_{B_E} , згруповані за шириною фільтраційного вікна. Виділені значення в табл. 4 – артефакти, вони відбраковуються.

Графік одержаної залежності зображено на рис. 3.

Таблиця 4. Значення безрозмірного коефіцієнта K_{B_E} для всіх гармонічних складових спектральної щільності 16-ти реалізацій

№.реал.	8	7	6	5	4	3	2	1
n	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_i, \text{Гц}$ $B_{E,i}, \text{Гц}$	2,5	2,86	3,33	4	5	6,67	10	20
6,65	1	0,9828	0,8736	0,7529	0,6621	0,5241	0,3954	0,2465
20	1	0,9300	0,8535	0,7707	0,6911	0,5892	0,4740	0,3267
27	1	0,9654	0,9025	0,8522	0,8019	0,7767	0,7107	0,5892
40	1	0,9450	0,8745	0,7955	0,6982	0,5839	0,4693	0,3625
70	1	0,9514	0,8771	0,8686	0,8057	0,7114	0,5743	0,4257
92	1	0,9428	0,8999	0,8713	0,8571	0,7898	0,7233	0,622
№.реал.	16	15	14	13	12	11	10	9
n	1	2	3	4	5	6	7	8
$f_i, \text{Гц}$ $B_{E,i}, \text{Гц}$	2,5	2,86	3,33	4	5	6,67	10	20
2,22	1	0,9275	0,8550	0,8680	0,8423	0,8178	0,7464	0,6582
20	1	0,9139	0,8162	0,8132	0,7271	0,6119	0,4591	0,3117
40	1	0,8687	0,7536	0,6403	0,5378	0,4299	0,3255	0,180
70	1	0,9355	0,8532	0,7503	0,6420	0,5364	0,4184	0,3676
88	1	0,9020	0,8235	0,7451	0,7058	0,5922	0,4825	0,3399

Таблиця 5. Статистичні характеристики вибірок значень безрозмірного коефіцієнта K_{B_E}

$B_{E,i}, \text{Гц}$	\bar{K}_{B_E}	D	σ	$t_{кр}$	Δ	Скоригований об'єм	\hat{K}_{B_E}	\hat{D}	$\hat{\sigma}$
2,86	0,9332	0,001	0,031	1,372 $\beta=0,8$	$\pm 0,4442$	$\hat{n} = 9$	0,943	0,0004	0,0193
3,33	0,853	0,0018	0,0427	1,372	$\pm 0,6119$	$\hat{n} = 10$	0,8629	0,0008	0,0286
4	0,7935	0,0051	0,0714	1,372	$\pm 0,1023$	$\hat{n} = 10$	0,8088	0,0028	0,0528
5	0,7246	0,0092	0,0958	1,372	$\pm 0,1373$	$\hat{n} = 10$	0,7433	0,0059	0,077
6,67	0,633	0,0154	0,1243	1,372	$\pm 0,1781$	$\hat{n} = 9$	0,6351	0,0099	0,0994
10	0,5252	0,0204	0,1429	1,372	$\pm 0,2048$	$\hat{n} = 10$	0,5032	0,0168	0,1297
20	0,4027	0,0244	0,1561	1,372	$\pm 0,2237$	$\hat{n} = 10$	0,3772	0,0191	0,1381

Співставлення оцінкових значень спектральної щільності, одержаних за різних значень ширини спектрального вікна, з використанням залежності $\bar{K}_{B_E} = 1,552 \cdot B_E^{-0,4753708}$, здійснюється наступним чином:

1. Для кожної гармонічної складової щільності та ширини вікна, яка є більшою за $B_{E,\min}$, за залежністю $\bar{K}_{B_E} = 1,552 \cdot B_E^{-0,4753708}$ обчислюється значення \bar{K}_{B_E} ;

2. Скореговане оцінкове значення спектральної щільності для цієї ширини фільтраційного вікна обчислюється за формулою –

$$S_{f.i.ck} = \frac{S_{f.i}}{\bar{K}_{B_E}}.$$

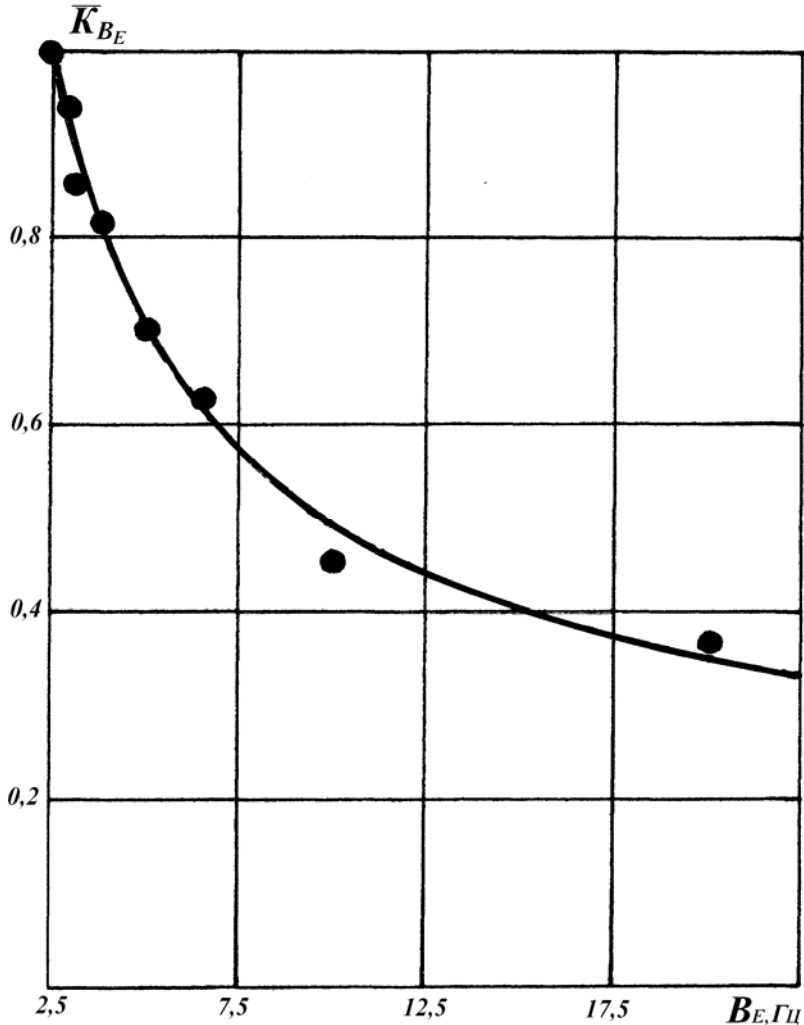


Рис. 3. Залежність $\bar{K}_{B_E} = 1,552 \cdot B_E^{-0,4753708}$

Наприклад, згідно даних табл. 2 для 7-мої реалізації та частоти гармонічної складової 6,65 Гц оцінкове значення спектральної щільності – 102985 Н². Ширина фільтраційного вікна для цього значення становить 2,86 Гц. Для цього вікна $\bar{K}_{B_E} = 1,552 \cdot B_E^{-0,4753708} = 1,552 \cdot 2,86^{-0,4753708} = 0,9418$. Скореговане оцінкове значення спектральної щільності –

$$S_{f.i.ck} = \frac{S_{f.i}}{\bar{K}_{B_E}} = \frac{102985}{0,9418} = 109349 \text{ Н}^2.$$

Таблиця 6. Значення спектральної щільності $S_{f,i}$, скорегованої спектральної щільності $S_{f,i.ck}$ та відновної похибки ВП%

$f_i, \Gamma\text{ц}$	№р	1	2	3	4	5	6	7	8
	B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5
6,65	$S_{f,i}$	25832	41435	54925	69380	78895	91542	102985	104792
	$S_{f,i.ck}$	69141	79771	87226	96075	98256	104492	109249	-
	ВП%	-34,0	-23,9	-16,8	-8,3	-6,2	-0,3	4,2	0
20	$S_{f,i}$	12357	17929	22284	26138	29149	32281	35172	37821
	$S_{f,i.ck}$	33074	34517	35389	36195	36302	36848	37350	-
	ВП%	-12,5	-8,7	-6,4	-4,3	-4,0	-2,6	-1,2	0
27	$S_{f,i}$	22567	27222	29751	30715	32642	34569	36978	38303
	$S_{f,i.ck}$	60402	52408	47247	42533	40652	39459	39264	-
	ВП%	57,7	36,8	23,4	11,0	6,1	3,0	2,5	0
40	$S_{f,i}$	30956	39990	49867	59623	67934	74679	80702	85399
	$S_{f,i.ck}$	82856	76989	79193	82564	84605	85244	85691	-
	ВП%	-3,0	-9,8	-7,3	-3,3	-0,9	-0,2	0,3	0
70	$S_{f,i}$	17947	24211	29992	33967	36617	36978	40110	42158
	$S_{f,i.ck}$	48036	46611	47630	47037	45603	42201	42590	-
	ВП%	13,9	10,6	13	11,6	8,2	0,1	1,0	0
92	$S_{f,i}$	5245	6099	6660	7227	7347	7588	7950	8432
	$S_{f,i.ck}$	14039	11742	10577	10008	9150	8661	8441	-
	ВП%	66,5	39,2	25,4	18,7	8,5	2,7	0,1	0
$f_i, \Gamma\text{ц}$	№р	9	10	11	12	13	14	15	16
	B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5
2,22	$S_{f,i}$	42651	48250	52998	54584	56250	55407	60105	64802
	$S_{f,i.ck}$	114159	92892	84165	75586	70054	63245	63821	-
	ВП%	76,2	43,3	30	16,6	8,1	-2,4	-1,5	0
	$S_{f,i}$	61911	91181	121534	144420	161523	162126	181518	198622
	$S_{f,i.ck}$	165710	175543	193006	199989	201161	185061	192740	-
	ВП%	-16,6	-11,6	-2,8	0,6	1,3	-6,8	-3,0	0
	$S_{f,i}$	12060	21801	28788	36015	42880	50469	58180	66970
	$S_{f,i.ck}$	32280	41972	45718	49873	53403	57609	61777	-
	ВП%	-51,8	-37,3	-31,7	-25,5	-20,2	-14	-7,8	0
	$S_{f,i}$	32281	36737	47096	56371	65886	74920	82147	87808
	$S_{f,i.ck}$	86403	70727	74792	78061	82055	85519	87225	-
	ВП%	-1,2	-19,4	-14,8	-11,1	-6,6	-2,6	-0,7	0
	$S_{f,i}$	2088	2964	3638	4336	4577	5059	5541	6143
	$S_{f,i.ck}$	5589	5706	5777	6004	5700	5775	5884	-
	ВП%	-9,0	-7,1	-6,0	-2,3	-7,2	-6,0	-4,2	0

Відносна похибка по відношенню до оцінкового значення щільності, одержаного для мінімальної ширини вікна, визначається за формулою – $ВП\% = \frac{S_{f.Bmin} - S_{f.i.ек}}{S_{f.Bmin}} \cdot 100 = \frac{104792 - 109249}{104792} \cdot 100 = 4,2\%$.

В табл. 6 наведено оцінкові спектральні щільності $S_{f.i}$, скориговані оцінкові значення спектральної щільності $S_{f.i.ек}$ та відносні похибки ВП% по відношенню до оцінкового значення щільності, одержаного для мінімальної ширини фільтраційного вікна, а в табл. 7 середні значення відносної похибки для різних значень ширини фільтраційного вікна.

Таблиця 7. Середні значення відносної похибки

B_E	20	10	6,67	5	4	3,33	2,86	2,5
Середні ВП%	31,1	22,5	16	10,1	7,0	3,7	2,4	0

Згідно даних табл. 7 задовільним є порівняння оцінкових значень спектральної щільності за умови $B_{E,max} = 2B_{E,min}$. В цьому випадку середнє значення відносної похибки не перевищує 10%.

Висновки

1. Під час проведення спектрального аналізу, з метою одержання обґрунтованих оцінкових значень спектральної щільності, згладжують спектр за допомогою функцій, які називаються спектральними вікнами. Дисперсія під час застосування вікон, наприклад вікна Бартлета, пропорційна виразу $\frac{2}{3} \cdot \frac{m}{N}$, число ступенів вільності складає $\frac{2N}{m}$. З ростом довжини реалізації збільшується об'єм вибірки N . При цьому дисперсія оцінки падає, тобто оцінка стає обґрунтованою.

Параметри спектрального вікна визначаються числом кроків автокореляційної функції m . При зменшенні m покращується точність оцінки, але погіршується розділювальна здатність (збільшується ширина пропускання фільтра). Для порівняння значень спектральної щільності, одержаних за різних величин фільтраційного вікна, авторами запропонований алгоритм, який базується на емпіричних кореляційних залежностях $S_{f.i} = f(B_E)$ і $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$.

2. За результатами експериментальних досліджень процесу зміни осьової динамічної сили на долоті було встановлено, що залежності $S_{f.i} = f(B_E)$ і $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$ – це степеневі функції, ймовірність існування яких більша за 0,98. Залежність $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$ має вигляд: $\bar{K}_{B_E} = 1,552 \cdot B_E^{-0,4753708}$.

3. За середнім значенням похибки між оцінками дисперсій експериментальних досліджень і дисперсіями, обчисленими із використанням залежності $\bar{K}_{B_E} = f(B_E)$ автори пропонують порівнювати оцінкові значення спектральних щільностей в інтервалі величин спектральних вікон, які відповідають умові $B_{E.\max} = 2B_{E.\min}$. Під час виконання цієї умови середнє значення відносної похибки не буде перевищувати 10%.

Література

1. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В.Налимов. – М.: Наука, 1974. – 208 с.
2. Мойсишин В.М. Статистичний аналіз результатів стендових експериментальних досліджень зміни осьової сили при бурінні долотом Ш-93С / В.М.Мойсишин, О.М.Лисканич, А.І.Масьовський // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2015. – №1(29) – С. 232-249.
3. Стійкість і коливання бурильної колони / В.М.Мойсишин, Б.Д.Борисевич, Ю.Л.Гаврилів, С.А.Зінченко. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2013. – 590 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 25.01.2016 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Векериком В.І.,
д.т.н., професором Куцяком Я.В. (м. Київ)*

ALGORITHM OF COMPARISON OF SPECTRAL CLOSENESS VALUES OF AXIAL DYNAMIC FORCE ON A BIT AT A DIFFERENT WIDTH OF FILTRATION WINDOW

V. M. Moisyshyn, V. V. Rys, B. D. Borysevych, I. M. Gural

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, m. Ivano-Frankivsk, Carpathian str., 15;
ph. +380 (3422) 72-71-31; e-mail: math@nung.edu.ua*

As a result of experimental researches of change of axial dynamic force on mining holes are set, that between the width of filtration window which is used during determination of spectral closeness, and values of this closeness, there is empiric correlation dependence probability of existence of which is anymore after 0,98. The mean value of error between estimations of dispersions of experimental researches and dispersions calculated with the use of dependence is determined. According to the mean value of error whatever exceeds 10%, the interval of values VE gets out, for what value of spectral closeness are compared.

Key words: *stand experimental researches, axial dynamic force, random process, stationary, ergodicity, autocorrelation function, spectral closeness, filtration windows, empirical correlation.*