

7. Гнисько, В. И. Собственные колебания оболочек вращения, частично заполненных жидкостью [Текст] / В. И. Гнисько, Е. В. Еселева // Динамика и прочность машин. – 2006. – № 21. – С. 60–65.
8. Клитман, Е. П. Спектральная задача для оболочек с жидкостью [Текст] / Е. П. Клитман, И. Е. Клитман, В. П. Матвеевко // Прикл. механика и техн. физика. – 2005. – Т. 46, № 6. – С. 128–135.
9. Inc. Release Theory Reference [Text] / ANSYS. – 2010.
10. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
11. Schroeder, M. Finite element solution of fluid structure interaction problems [Text] / Schroeder, Marcus // Shock & vibration symposium. – San diego, 1975. – P. 1–19.
12. Гонткевич, В. С. Собственные колебания оболочек в жидкости [Текст] / В. С. Гонткевич. – Киев.: Наук. думка, 1964. – 103 с.

*Проведено оптимізацію параметрів автобаланси́рів для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора шляхом мінімізації часу настання автобалансування. Знайдено області параметрів, всередині яких час настання автобалансування не перевищує заданий час. Застосовувалася теорія багатofакторних експериментів. Експеримент проводився віртуально в комп'ютерній САПР SolidWorks з використанням модуля Cosmos Motion над створеною 3D-моделлю вентилятора і АВ*

*Ключові слова: осьовий вентилятор, автобаланси́р, оптимізація параметрів, динамічне балансування, 3D-моделювання, багатofакторний експеримент*

*Проведена оптимизация параметров автобаланси́ров для динамического уравновешивания крыльчатки осевого вентилятора путем минимизации времени наступления автобалансировки. Найденны области параметров, внутри которых время наступления автобалансировки не превышает заданное время. Применялась теория многофакторных экспериментов. Эксперимент проводился виртуально в компьютерной САПР SolidWorks с использованием модуля Cosmos Motion над созданной 3D-моделью вентилятора и АВ*

*Ключевые слова: осевой вентилятор, автобаланси́р, оптимизация параметров, динамическая балансировка, 3D-моделирование, многофакторный эксперимент*

УДК 62-752+62-755 : 621.634

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30498

# ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ АВТОБАЛАНСІРІВ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО ЗРІВНОВАЖЕННЯ КРИЛЬЧАТКИ ОСЬОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА 3D МОДЕЛЮВАННЯМ

Л. С. Олійніченко

Аспірант\*

E-mail: loga\_lubov@ukr.net

Г. Б. Філімоніхін

Доктор технічних наук, професор\*\*

E-mail: filimonikhin@yandex.ua

\*Кафедра ремонту і експлуатації машин\*\*\*

\*\*Кафедра деталей машин

та прикладної механіки\*\*\*

\*\*\*Кіровоградський національний

технічний університет

пр. Університетський, 8, м. Кіровоград,

Україна, 25006

## 1. Вступ

Основним джерелом вібрації у вентиляторах є дисбаланс обертових частин у зборі (крильчатка з валом і ротором електродвигуна) [1]. Тому його усувають до початку експлуатації вентилятора статичним чи динамічним балансуванням. Але дисбаланс крильчатки під час експлуатації постійно змінюється через налипання бруду, корозії, зношення під дією твердих абразивних частинок, деформації лопатей під час чищення тощо. Тому обертові частини вентилятора у зборі доцільно

у подальшому автоматично зрівноважувати на ходу у процесі експлуатації автобаланси́вними пристроями. Дослідження цього процесу з метою оптимізації параметрів пристроїв є актуальною задачею.

## 2. Аналіз літературних даних

Для зрівноваження на ходу, у процесі експлуатації, швидкообертових роторів знайшли застосування кульові автобаланси́ри (АВ) [2]. Кулі в них з часом самі

приходять у те положення, у якому зрівноважують ротор і далі обертаються з ним як одне ціле, поки не почне змінюватися дисбаланс, чи не з'являється збурення іншого походження.

Можливість зменшення статичного дисбалансу крильчатки осьового вентилятора на ходу одним АБ, розташованим у обтічнику крильчатки, було вивчено в роботі [3]. Але дисбаланс крильчатки має не тільки статичну, а і моментну складову, утворену неперпендикулярністю площини крильчатки осі обертання (перекосом крильчатки). В роботі [4] було запропоновано динамічно зрівноважувати обертові частини осьового вентилятора у зборі двома АБ. Для цього один АБ, як і раніше, розташовується у обтічнику крильчатки, а другий – насаджується на хвостовик вала електродвигуна. Експериментальні дослідження на спеціально створеному стенді підтвердили працездатність способу [5]. Проведення натурних експериментів з метою визначення оптимальних значень параметрів АБ це трудомістка робота, яка займає багато часу. Тому прийнято рішення замінити їх 3D-моделюванням. Для цього в роботі [6] було розроблено і протестовано 3D-модель осьового вентилятора з двома АБ для динамічного зрівноваження крильчатки.

Слід відзначити, що використання віртуального експерименту із симуляцією руху роторної машини з АБ на комп'ютері для оптимізації параметрів роторної машини, вже широко використовується при проектуванні АБ. Так, у роботі [7] досліджувався процес зрівноваження АБ ротора (диска CD/DVD привода) у одній площині корекції. Визначалися значення параметрів АБ, при яких похибка приходу куль в автобалансувальне положення найменша. Аналогічні дослідження проводилися і у роботі [8], але точність приходу куль підвищувалася оптимізацією закону розбігу ротора. Оптимізації, проведені у роботах [7] і [8] актуальні для приладів, точність і надійність роботи яких істотно погіршується із зростанням рівня вібрацій. У роботі [9] визначався вплив на залишкові вібрації ротора, що статично зрівноважується одним автобалансином, швидкості обертання ротора. Дослідження дозволяють обрати такі діапазони робочих швидкостей обертання ротора, на яких залишкові вібрації мінімальні. Така оптимізація актуальна для роторів, які можуть виконувати однаково якісно покладені на них технологічні операції на різних кутових швидкостях обертання. У роботі [10] експериментально досліджувався процес зрівноваження АБ ротора відцентрової соковижималки у одній площині корекції. Визначалися значення параметрів АБ, при яких найшвидше настає автобалансування. Така оптимізація актуальна для роторів, чий дисбаланс може раптово змінюватися. Це актуально для осьових вентиляторів, що працюють в несприятливих умовах.

### 3. Мета і задачі досліджень

Метою цієї роботи є оптимізація параметрів АБ для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора шляхом мінімізації часу настання автобалансування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі досліджень:

– побудувати для вентилятора з АБ модель “чорної скрині”, визначивши параметри, що підлягають оптимізації, межі їх зміни, функціонал якості, вигляди рівняння регресії;

– визначити коефіцієнти рівнянь регресії, та обрати модель регресії, що найточніше апроксимує функціонал якості для чого спланувати і провести багатofакторний експеримент, обробити його результати методами кореляційно - регресійного аналізу;

– визначити області оптимальних значень параметрів у середині яких функціонал якості не перевищує певного граничного значення.

### 4. Методи досліджень

Багатофакторний експеримент проводиться за методикою, запропованою у роботі [10] віртуально у комп'ютерній САПР SolidWorks із застосуванням модуля Cosmos Motion [11] та із застосуванням розробленої раніше 3D-моделі осьового вентилятора з двома АБ [6]. У якості критерію якості обрано час, за який настає автобалансування у двох площинах, у яких АБ зрівноважують обертові частини.

#### 4. 1. Будується схема “чорної скрині”.

Для побудови схеми “чорної скрині”:

- вводиться функціонал якості  $Q$ ;
- виділяються основні незалежні параметри (фактори)  $x_1, \dots, x_n$ , які мають суттєвий вплив на функціонал якості і підлягають оптимізації;
- визначаються межі їх зміни;
- робляться припущення щодо вигляду рівняння регресії.

За функціонал якості приймаємо час приходу куль в автобалансувальне положення в обох площинах корекції. Цю величину вважаємо часом настання автобалансування. В процесі віртуального експерименту отримуємо дві величини  $T_{кр}$  та  $T_{хв}$  – час настання автобалансування, відповідно у площинах крильчатки та хвостовику вала електродвигуна (де розташовані АБ). Так як повне автобалансування настає тоді, коли кулі в обох АБ приходять у автобалансувальне положення, за функціонал якості обираємо більше із двох значень  $Q = \max(T_{кр}, T_{хв})$ .

Час настання автобалансування у кожній площині визначаємо за допомогою графіків відстаней між кулями (рис. 1, а). Встановлюємо час симуляції 90 с, щоб навіть при найгірших значеннях параметрів 3D – моделі, наступало автобалансування. Задаємо час розгону двигуна вентилятора –  $t_p=3$  с. При настанні автобалансування у певній площині корекції відстань між кулями у цій площині прямує до певного сталого значення. Воно достатньо точно визначається у момент часу 90 с. Відступаючи в гору і у низ від цього значення на  $\Delta=0,05$  мм, отримуємо трубку навколо цього значення. Вважаємо, що автобалансування у розглядуваній площині настало, якщо графік цього кута зайшов у трубку і більше з неї не виходить.

Для збільшення точності визначення часу настання автобалансування і полегшення цього процесу збільшуємо масштаб графіку в околі точки входження графіка у трубку (рис. 1, б).

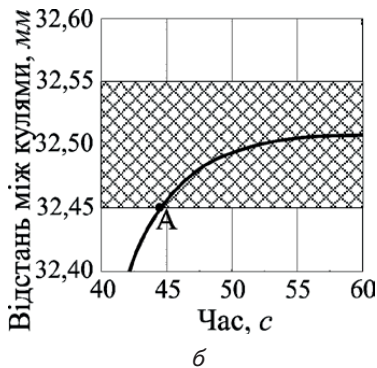
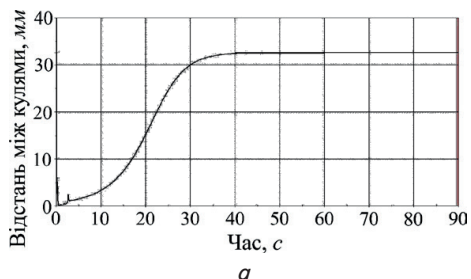


Рис. 1. Графік зміни відстані між кулями АБ в крильчатці: а – з звичайним масштабом; б – зі збільшеним масштабом

З врахуванням особливостей процесу автобалансування і обраного критерію якості, та відповідно до результатів роботи [10] обираємо рівняння регресії у неявному вигляді:

$$\phi(Q) = f(x_1, \dots, x_n), \tag{1}$$

де  $Q$  – функціонал якості;  $\phi(Q) = \ln(Q - t_p)$  – функція, що перетворює функціонал якості;  $x_1, \dots, x_n$  – безрозмірні фактори, що змінюються у інтервалі  $[-1, 1]$ ;  $f(x_1, \dots, x_n)$  – права частина рівняння регресії.

Праву частину будемо шукати у вигляді (табл. 1) звичайної лінійної залежності, лінійної залежності із складовими, що враховують ефекти взаємодії першого порядку, квадратичної та звичайної гіперболічної залежності.

Праві частини рівнянь регресії

№	Назва	Вигляд
1	лінійна	$f(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i$
2	лінійна, із складовими, що враховують ефекти взаємодії першого порядку	$f(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$
3	квадратична	$f(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i^2$
4	гіперболічна	$f(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{x_i + c_i}$

У таблиці 1:  $b_0$  – вільний член регресії;  $b_i, b_{ij}$  – коефіцієнти регресії,  $/i = 1, 4 /, /j = 1, 4, j \geq i /$ .

Отже, загальна схема “чорної скрині” зображена на рис. 2.



Рис. 2. Загальна схема “чорної скрині”

Зв'язок між функціоналом якості і факторами задає рівняння (1).

**4. 2. Визначаються коефіцієнти рівнянь регресії, та обирається модель регресії, що найточніше апроксимує функціонал якості**

Для визначення коефіцієнтів рівняння регресії планується і проводиться трьохрівневий експеримент за схемою планування Бокса-Бенкена [13]. Очевидно, що для дослідження лінійних залежностей достатньо буде розглянути дворівневий план експерименту, у якому кожний з факторів приймає два різних значення – мінімальне й максимальне. Але інші види регресії потребують проведення трьохрівневого експерименту, де кожний з факторів, окрім максимального і мінімального значень, приймає ще й нульове (середнє) значення.

Аналіз результатів експериментів (таблиць часу настання автобалансування і відповідних значень параметрів) проводиться за допомогою пакету програм для статистичного аналізу STATISTICA [12].

Оцінка різних моделей регресії проводиться за допомогою двохосновних критеріїв – Стюдента (t-критерій) і Фішера (F-критерій) [13, 14]. Серед одержаних рівнянь регресії для подальшого використання залишається те, що дозволяє найточніше апроксимувати значення функціонала якості при всіх можливих значень факторів.

**4. 3. Визначаються області оптимальних значень параметрів у середині яких функціонал якості не перевищує певного граничного значення.**

Для цього використовується та модель регресії, що найточніше апроксимує значення функціонала якості при всіх можливих значеннях факторів.

Таблиця 1

**5. Результати досліджень**

**5. 1. Побудова схеми “чорної скрині”**

Виділяємо наступні масоінерційні та геометричні параметри роторної машини, що мають істотний вплив на час настання автобалансування:

- $m_{кор}, m_{кр}, m_{аб}$  – відповідно, маса корпусу вентилятора, крильчатки та АБ (без куль);
- $\omega = \omega(t)$  – закон зміни кутової швидкості обертання ротора;
- $k_b$  – коефіцієнт жорсткості опор вентилятора;

- $b_v$  – коефіцієнт сили в'язкості опор вентилятора;
- $R$  – радіус бігової доріжки АБ;
- $m_k$  – маса однієї кулі в АБ;
- $b_k$  – коефіцієнт сили в'язкого опору для куль.

Оптимізації підлягають тільки ті параметри, зміна яких не призводить до заміни деталей натурного вентилятора чи корпусу АБ. Для спрощення вибору факторів розділяємо параметри на 3 групи.

1) Параметри, які не змінюватимуться:

- маса корпусу вентилятора і крильчатки (відповідають натурному осьовому вентилятору №4 серії ВО 06-300);

- закон зміни кутової швидкості ротора задаємо трапецевидним, при цьому час розбігу, вибігу та крейсерська швидкість вибирається близькими до серійного аналогу;

- маса корпусу АБ, радіус бігової доріжки АБ;
- величина дисбалансу (він – найбільший можливий).

2) Змінні параметри АБ:

- маса однієї кулі в АБ (однакова в обох АБ);
- коефіцієнт сили в'язкого опору для куль (одноконвий в обох АБ).

3) Змінні параметри осьового вентилятора:

- жорсткість опор;
- коефіцієнт сили в'язкості опор.

Друга і третя групи параметрів вентилятора підлягають оптимізації, бо можуть впливати на час настання автобалансування і їх зміна не призводить до заміни деталей у натурному вентиляторі.

На рис. 3 зображено схему "чорної скрині" у розмірному вигляді

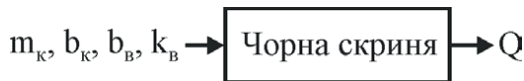


Рис. 3. Схема "чорної скрині" у розмірному вигляді

Методом проб підбираємо такі діапазони зміни значень параметрів, які досяжні для реальних машин і усередині яких настає автобалансування.

Данні для проведення експерименту наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фактори, та межі їх зміни

№ п/п	Рівень	$m_k(x_1)$ , г	$b_k(x_2)$ , Н·с/мм	$k_v(x_3)$ , Н/мм	$b_v(x_4)$ , Н·с/мм
1	Мін. (-1)	5	0,00004	29	0,005
2	Сер. (0)	8	0,00007	31,5	0,015
3	Макс. (1)	11	0,0001	34	0,025

### 5. 2. Визначення коефіцієнтів рівнянь регресії, та вибір моделі регресії, що найточніше апроксимує функціонал якості

Щоб дослідити всі залежності проводимо трьохрівневий експеримент.

Для 4-х факторів як правило проводиться  $2^4=16$  дво-хрівневих експериментів для того, щоб рівняння регресії давало інтерполяційне значення для будь-яких інших значень параметрів із розглядуваної області [13, 14].

У випадку трьохрівневого експерименту кількість експериментів визначається як  $3^4=81$ . Проведення такої кількості експериментів займає багато часу, тому розглядаємо спрощену схему планування Бокса-Бенкена [13]. Одноблокова схема для чотирьох факторів і трьох рівнів складається з 27 експериментів. Для визначення всіх коефіцієнтів рівняння регресії такої кількості експериментів достатньо. Але для того, щоб рівняння регресії були інтерполяційними, до схеми експериментів додаємо 11 ще незадіяних двохрівневих експериментів, із числа вказаних вище. Отже в результаті отримуємо табл. 3 з 38 експериментами.

Результати експериментів занесені у табл. 3.

Таблиця 3

План і результати проведення експерименту

№ експ.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$T_{кр}$	$T_{хв}$	№екс	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$T_{кр}$	$T_{хв}$
1	-	-	-	-	19,12	23,95	20	+	-	0	-	14,7	16,46
2	-	-	0	+	11,03	11,4	21	+	-	+	+	6,99	6,77
3	-	-	+	0	9,56	10,69	22	+	0	-	-	12,98	19,89
4	-	0	-	+	26,39	22,78	23	+	0	0	+	7,93	7,77
5	-	0	0	0	37,71	39,07	24	+	0	+	0	8,65	8,52
6	-	0	+	-	38,53	34,7	25	+	+	-	+	4,53	4,62
7	-	+	-	0	35,89	47,31	26	+	+	0	0	7,74	8,31
8	-	+	0	-	75,74	69,83	27	+	+	+	-	13,2	21,02
9	-	+	+	+	40,72	36,84	28	+	+	+	+	6,74	6,81
10	0	-	-	+	5,67	5,62	29	+	+	-	-	13	20,3
11	0	-	0	0	7,3	8,21	30	+	-	+	-	11,98	21,51
12	0	-	+	-	11,91	29,5	31	+	-	-	+	6,56	7,14
13	0	0	-	0	5,49	8,21	32	+	-	-	-	13,18	14,85
14	0	0	0	-	15,05	16,21	33	-	-	+	-	21,78	23,24
15	0	0	+	+	6,61	6,5	34	-	-	-	+	13,41	13,65
16	0	+	-	-	16,24	20,46	35	-	-	+	+	11,04	11,48
17	0	+	0	+	7,81	7,69	36	-	+	-	+	42,34	39,14
18	0	+	+	0	8,28	8,34	37	-	+	-	-	47,68	47,24
19	+	-	-	0	7,43	7,05	38	-	+	+	-	46,48	41,02

За допомогою пакету програм для статистичного аналізу STATISTICA [12] обробляємо отриманні результати експериментів. Знаходимо рівняння регресії у вигляді залежностей:

- лінійної

$$\phi = 2,425 - 0,631 \cdot x_1 + 0,225 \cdot x_2 - 0,027 \cdot x_3 - 0,608 \cdot x_4 ; \quad (2)$$

- лінійної із складовими, що враховують ефекти взаємодії першого порядку

$$\phi = 2,412 - 0,637 \cdot x_1 + 0,234 \cdot x_2 + 0,034 \cdot x_3 - 0,587 \cdot x_4 - 0,338 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,112 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,253 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,045 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,014 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0,043 \cdot x_3 \cdot x_4 . \quad (3)$$

- квадратичної

$$\phi = 1,895 - 0,633 \cdot x_1 + 0,238 \cdot x_2 + 0,038 \cdot x_3 - 0,583 \cdot x_4 + 0,601 \cdot x_1^2 - 0,140 \cdot x_2^2 - 0,089 \cdot x_3^2 + 0,309 \cdot x_4^2 - 2 \cdot 0,165 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot 0,060 \cdot x_1 \cdot x_3 - 2 \cdot 0,123 \cdot x_1 \cdot x_4 - 2 \cdot 0,019 \cdot x_2 \cdot x_3 + 2 \cdot 0,011 \cdot x_2 \cdot x_4 - 2 \cdot 0,018 \cdot x_3 \cdot x_4 . \quad (4)$$

– гіперболічної

$$\phi = 11,514 + 0,397 \cdot x_1 + 0,060 \cdot x_2 - 0,923 \cdot x_3 - 0,441 \cdot x_4 + \frac{1,827}{x_1 + 1,67} - \frac{0,132}{x_2 + 1,33} - \frac{120,597}{x_3 + 11,6} - \frac{0,120}{x_4 + 0,5} \quad (5)$$

Аналіз отриманих рівнянь проводимо в два етапи.

1) За допомогою критерію Стьюдента [13, 14] визначаємо статистичну значимість кожного факторного виразу. Малозначущі факторні вирази відкидаємо, отримуємо рівняння в спрощеному вигляді.

2) За допомогою критерію Фішера [13, 14] порівнюємо рівняння між собою за статистичною значимістю.

Робимо зведену табл. 4, в якій порівнюємо кількість факторних виразів в повній та спрощеній моделях регресії та значення критерію Фішера.

Таблиця 4

Порівняння моделей регресії за критерієм Фішера

№ п/п	Права частина	Кількість факторних виразів		F- критерій	
		Повна	Спрощена	Повна	Спрощена
1	лінійна	5	3	164,46	211,33
2	лінійна, із складовими, що враховують ефекти взаємодії першого порядку	11	4	108,33	218,84
3	квадратична	15	8	158,48	305,62
4	гіперболічна	9	4	123,44	274,84

Отже, найкращі показники критерію Фішера має права частина в квадратичному вигляді.

**5. 3. Визначення областей оптимальних значень параметрів, у середині яких функціонал якості не перевищує певного граничного значення.**

Використовуємо повну квадратичну модель рівняння регресії. Аналіз рівняння показує, що час настання автобалансування стає найменшим, коли фактори  $x_3 = -1, x_4 = 1$ . Це відповідає найменшій жорсткості і найбільшій в'язкості опор вентилятора. При  $x_3 = -1, x_4 = 1$  рівняння регресії (4) приймає вигляд:

$$\phi(Q) = 1,530 - 0,267 \cdot x_1 + 0,298 \cdot x_2 + 0,601 \cdot x_1^2 - 0,140 \cdot x_2^2 - 2 \cdot 0,165 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (7)$$

Фактори  $x_1, x_2$  характеризують параметри АБ.

З рівняння (7) одержуємо такі залежності між факторами  $x_2$  і  $x_1$ :

$$x_2(x_1, \phi(Q)) = 1,064 - 3,571 \times \sqrt{0,446 \cdot x_1^2 - 0,756 \cdot x_1 - 0,56 \cdot \phi(Q) + 0,946} - 1,179 \cdot x_1, \quad (8)$$

$$x_2(x_1, \phi(Q)) = 3,571 \times \sqrt{0,446 \cdot x_1^2 - 0,756 \cdot x_1 - 0,56 \cdot \phi(Q) + 0,946} - 1,179 \cdot x_1 + 1,064. \quad (9)$$

Використовуючи залежності (8, 9), будемо графіки функції  $x_2(x_1, \phi(Q))$  при сталих значеннях функціонала якості  $Q$ . Одержуємо області оптимальних значень параметрів  $x_1, x_2$  (рис. 4), усередині яких час настання автобалансування не перевищує  $Q = 6; 6,05; 6,1; 6,5; 7; 9; 13; 23; 38$  с.

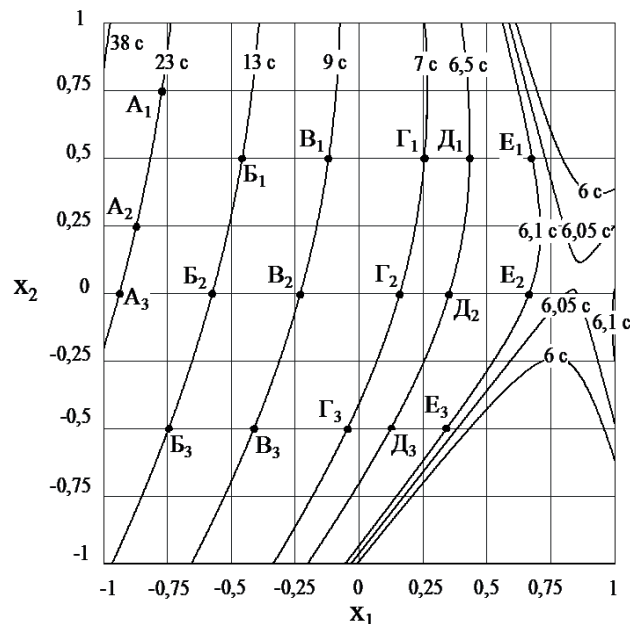


Рис. 4. Области оптимальних значень параметрів  $x_1, x_2$ ;  $A_1, B_1, B_1, G_1, D_1, E_1$  – контрольні точки на межах областей, усередині яких час настання автобалансування не перевищує  $Q = 6,1; 6,5; 7; 9; 13; 23$  с

Отримані межі областей було перевірено шляхом проведення віртуальних експериментів з використанням 3D моделі вентилятора з АБ для значень факторів  $x_1, x_2$  у контрольних точках  $A_1, A_2, A_3, \dots, E_1, E_2, E_3$ , розташованих на межах областей. Цим отримано точні значення функціоналу якості. Наближені значення було розраховано із використанням рівняння регресії. Похибка склала 7–13 %, причому чим більший час настання автобалансування тим менша похибка. Тому практичне значення мають області параметрів, побудовані для  $Q = 6,1; 6,5; 7; 9; 13; 23; 38$  с.

**6. Висновки**

Проведені за допомогою 3D моделювання дослідження з оптимізації параметрів автобалансирув для динамічного зрівноваження крильчатки осьового вентилятора дозволяють зробити наступні висновки.

1. При динамічному зрівноваженні крильчатки осьового вентилятора двома АБ доцільно оптимізувати масу кулі, коефіцієнт сили в'язкого опору, що на неї діють при русі відносно корпусу АБ, коефіцієнти жорсткості і в'язкості опор вентилятора.

2. У обраному діапазоні зміни параметрів, що оптимізуються, автобалансування найшвидше настає при найменшій жорсткості і найбільшій в'язкості опор вентилятора, а зменшення маси кулі в цілому збільшує час настання автобалансування.

3. Належним вибором параметрів АБ і опор вентиляторів можна забезпечити настання автобалансування за  $6 \div 7$  с, а без оптимізації параметрів цей час може перевищувати 75 с.

## Література

1. Зиборов, К. А. Дисбаланс как один из основных факторов влияющий на работу роторов шахтных вентиляторов главного проветривания [Текст] / К. А. Зиборов, Г. К. Ванжа, В. Н. Марьенко // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2013. – № 3. – С. 734–740. – Режим доступа: [http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/734\\_740.pdf](http://www.mmf.spbstu.ru/mese/2013/734_740.pdf).
2. Гусаров, А. А. Автобалансирующие устройства прямого действия [Текст] / А. А. Гусаров. – М.: Наука, 2002. – 119 с.
3. Яцун, В. В. Працездатність пасивних автобалансирів при зрівноваженні крильчаток осевих вентиляторів [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / В. В. Яцун. – Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2010. – 20 с.
4. Пат. 74641 UA : МПК G01M 1/32 (2006.01), F04D 29/66 (2006.01). Спосіб динамічного балансування жорсткого ротора пасивними автобалансирами [Текст] / Філімоніхін Г. Б., Гончаров В. В., Олійніченко Л. С. – заявник та патентовласник КНТУ. – № u201203307; заявл. 20.03.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21 – 5 с.
5. Філімоніхін, Г. Б. Експериментальне визначення ефективності динамічного зрівноваження кульовими автобалансирами крильчатки осевого вентилятора [Текст] / Г. Б. Філімоніхін, Л. С. Олійніченко // Український міжвідомчий н.-т. Збірник «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – 2011. – Вип. 45. – С. 496–503.
6. Філімоніхін, Г. Б. Комп'ютерна модель процесу автоматичного динамічного зрівноваження двома автобалансирами крильчатки осевого вентилятора [Текст] / Г. Б. Філімоніхін, Л. С. Олійніченко // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – 2013. – Вип. 43, Ч. I. – С. 103–108.
7. Sung, C. K. Influence of external excitations on ball positioning of an automatic balancer [Text] / C. K. Sung, T. C. Chan, C. P. Chao, C. H. Lu // Mechanism and Machine Theory, – 2013. – Vol. 69. – P. 115–126. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2013.05.009.
8. Yoshida, S. Reduction Method of Residual Balancing Error on Auto-Balancer Mechanism [Text] / S. Yoshida, T. Naka // SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration. – 2014. – Vol. 7, Issue 3. – P. 141–146. doi: 10.9746/jcmsi.7.141
9. Rodrigues, D. J. Experimental investigation of a single-plane automatic balancing mechanism for a rigid rotor [Text] / D. J. Rodrigues, A. R. Champneys, M. I. Friswell, R. E. Wilson // Journal of Sound and Vibration. – 2011. – Vol. 330, Issue 3. – P. 385–403. doi: 10.1016/j.jsv.2010.08.020.
10. Филimoniхин, Г. Б. Оптимизация параметров центробежной соковыжималки с автобалансиром минимизацией времени наступления автобалансировки [Текст] / Г. Б. Филimoniхин, В. В. Гончаров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 2, № 7 (68). – С. 28–32. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/23317/20930>
11. Chang, K.-H. Motion Simulation and Mechanism Design with COSMOSMotion 2007 [Text] / K.-H. Chang. – Schroff Development Corporation, 2008. – 142 p.
12. Халафян, А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных [Текст]: учеб. / А. А. Халафян. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
13. Ермаков, С. М. Математическая теория планирования эксперимента [Текст] / С. М. Ермаков, В. З. Бродский, А. А. Жиглявский и др.; под ред. С. М. Ермакова. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 392 с.
14. Радченко, С. Г. Методология регрессионного анализа [Текст]: монография / С. Г. Радченко. – К.: «Корнійчук», 2011. – 376 с.