

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря  
Сікорського”  
Кафедра автоматизації проектування енергетичних  
процесів і систем

# Прогнозування рівня вібрації при динамічному балансуванні обертових механізмів турбоагрегатів



Виконала  
студентка 6 курсу  
ТЕФ групи ТІ-61м  
Трикуш Н.П.  
Керівник проекту  
Сегеда І.В.

Київ - 2018

# Актуальність та існуючі програмні рішення

## Недоліки:

- ✓ балансування проводиться послідовно для кожного підшипника;
- ✓ програма розраховує значення коригувального вантажу лише для одного підшипника;
- ✓ відсутність комплексного поєднання числового та графічного методу.



## Балансувальні станки турбоагрегатів та балансувальні калькулятори

Балансировочный калькулятор в 3-х плоскостях

ООО "Кинематика" - недорогие приборы для динамической балансировки.  
Санкт-Петербург, ул. Шапана, д.32-34, оф. 509, т. 252-1919. Сайт - <http://ookin.ru>  
Прибор для балансировки в 2-х плоскостях "Балком-1" - 35000 руб.  
Прибор для балансировки в 4-х плоскостях "Балком-4" - 58000 руб.

Пуск 1 (без груза)		
Vo1, ед.	Vo2, ед.	Vo3, ед.
7,2	13,5	3,5
Fo1, град.	Fo2, град.	Fo3, град.
238	296	128

Пуск 2 (Груз в плоскости 1)		
Vo1, ед.	Vo2, ед.	Vo3, ед.
4,9	9,2	2,7
Fo1, град.	Fo2, град.	Fo3, град.
114	347	251

Пуск 3 (Груз в плоскости 2)		
Vo1, ед.	Vo2, ед.	Vo3, ед.
4,0	12,0	6,3
Fo1, град.	Fo2, град.	Fo3, град.
79	292	396

Пуск 4 (Груз в плоскости 3)		
Vo1, ед.	Vo2, ед.	Vo3, ед.
8,2	9,7	9,5
Fo1, град.	Fo2, град.	Fo3, град.
123	231	43

Результат		
M1, %	M2, %	M3, %
н.д.	н.д.	н.д.
F1, град.	F2, град.	F3, град.
н.д.	н.д.	н.д.

F8 - Очистить      F9 - Расчёт      F1 - Помощь

# Мета дослідження

**Мета:** створення комплексного програмного забезпечення для проведення динамічного балансування з можливістю підбору одного оптимального вантажу для множини опор з метою усунення прогнозованої вібрації.

**Об'єкт дослідження:** визначення вібрації обертових механізмів турбоагрегатів.

**Предмет дослідження:** програмне забезпечення розрахунку вібрації обертових механізмів з використанням методу коригуючих мас та методу амплітуд і фаз.

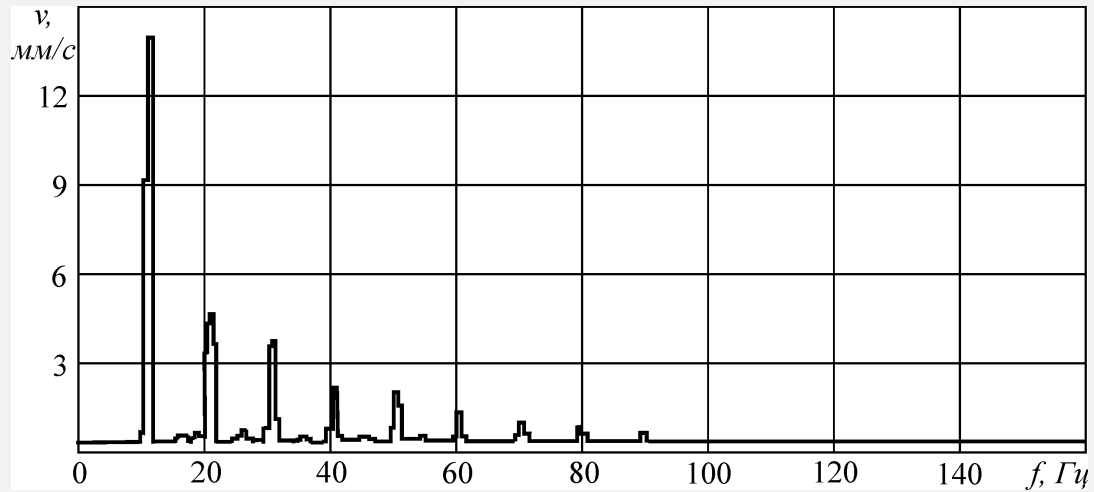
# Задачі

- ✓ розробка архітектури автоматизованої системи;
- ✓ розробка бази даних предметної області;
- ✓ проектування інтерфейсу користувача;
- ✓ розробка логічних модулів розрахунку коригуючого вантажу за даними одного та двох пусків;
- ✓ візуалізація значень розрахованих векторів на схемі ротора;

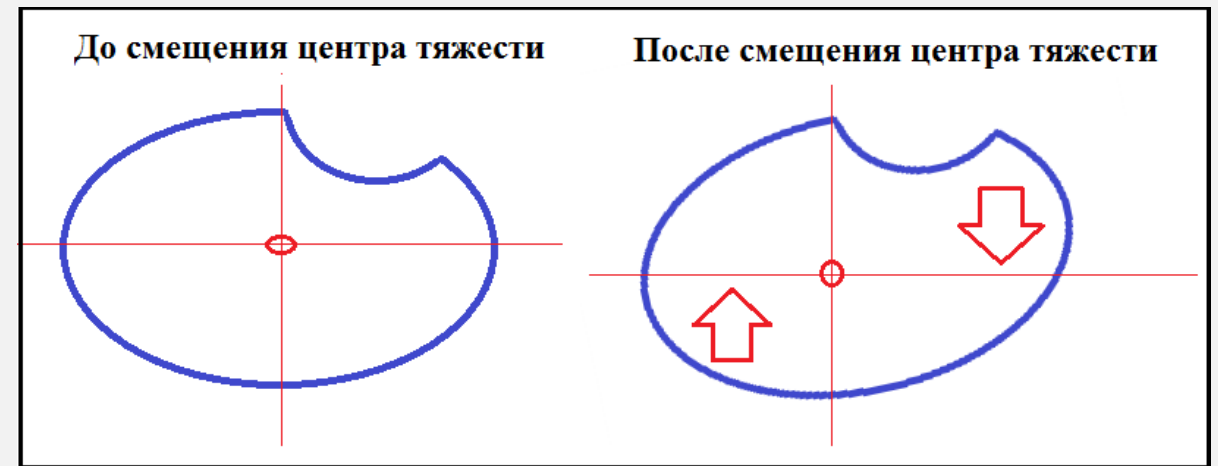
# Найбільш суттєві наукові результати магістерської дисертації

- ✓ створено комплексне програмне забезпечення для проведення балансування (поєднання числового та графічного методів);
- ✓ удосконалено метод підбору оптимального вантажу з метою зниження вібрації для множини підшипників;
- ✓ удосконалено метод визначення прогнозованої вібрації.

# Поняття вібрації та дисбалансу



Вібраційний сигнал при дисбалансі ротора



Дисбаланс - розбіжність центра маси тіла з його віссю обертання.

# Проведення балансування. Метод коригуючих мас

$A_0$  - вихідна вібрація;

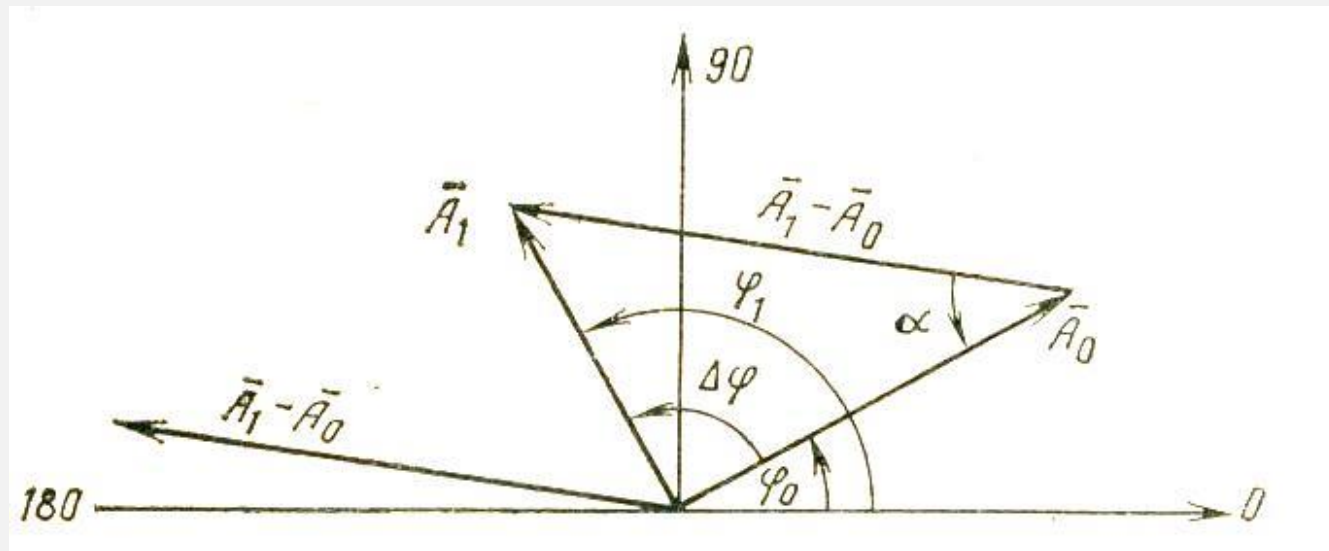
$A_1$  - вібрація після встановлення пробного тягарця ;

$(A_1 - A_0)$  - різниця векторів або вектор впливу встановленого вантажу (пробної маси);

$\varphi$  ,  $\varphi_0$  - фази вібрації;

$\Delta\varphi$  - різниця фаз;

$\alpha$  - кут довороту пробного вантажу для усунення вібрації.



Коефіцієнт динамічного впливу (КДВ):

$$a = \frac{A_1 - A_0}{P_{\text{пр}}};$$

Врівноважуючий вантаж:

$$P = - \frac{A_0}{a} = - \frac{A_0 P_{\text{пр}}}{A_1 - A_0}$$

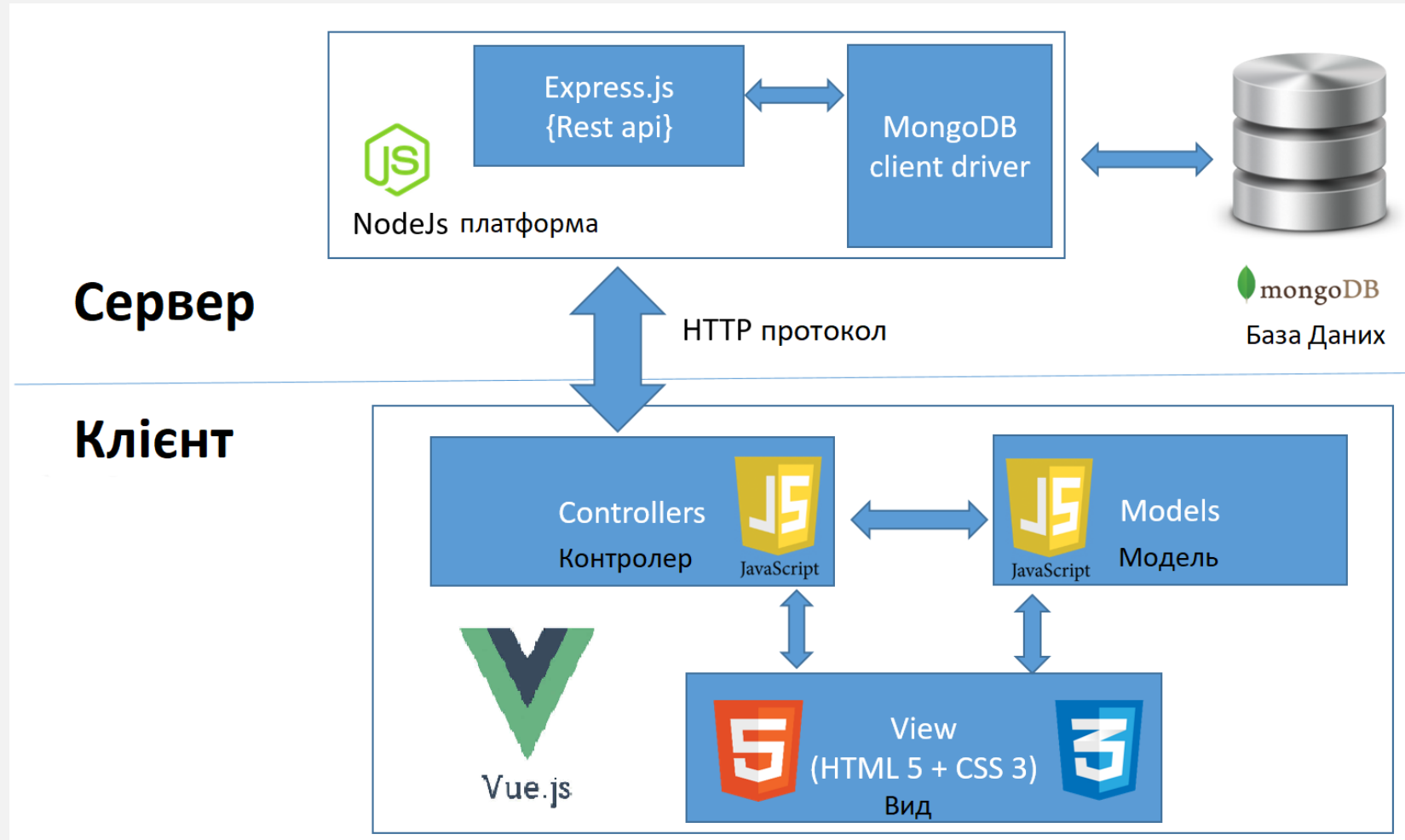
# Програмні засоби розробки

- Мова програмування – JavaScript
- Середовище розробки – IntelliJ IDEA 2017
- Робота з даними – MongoDB
- Brain.js

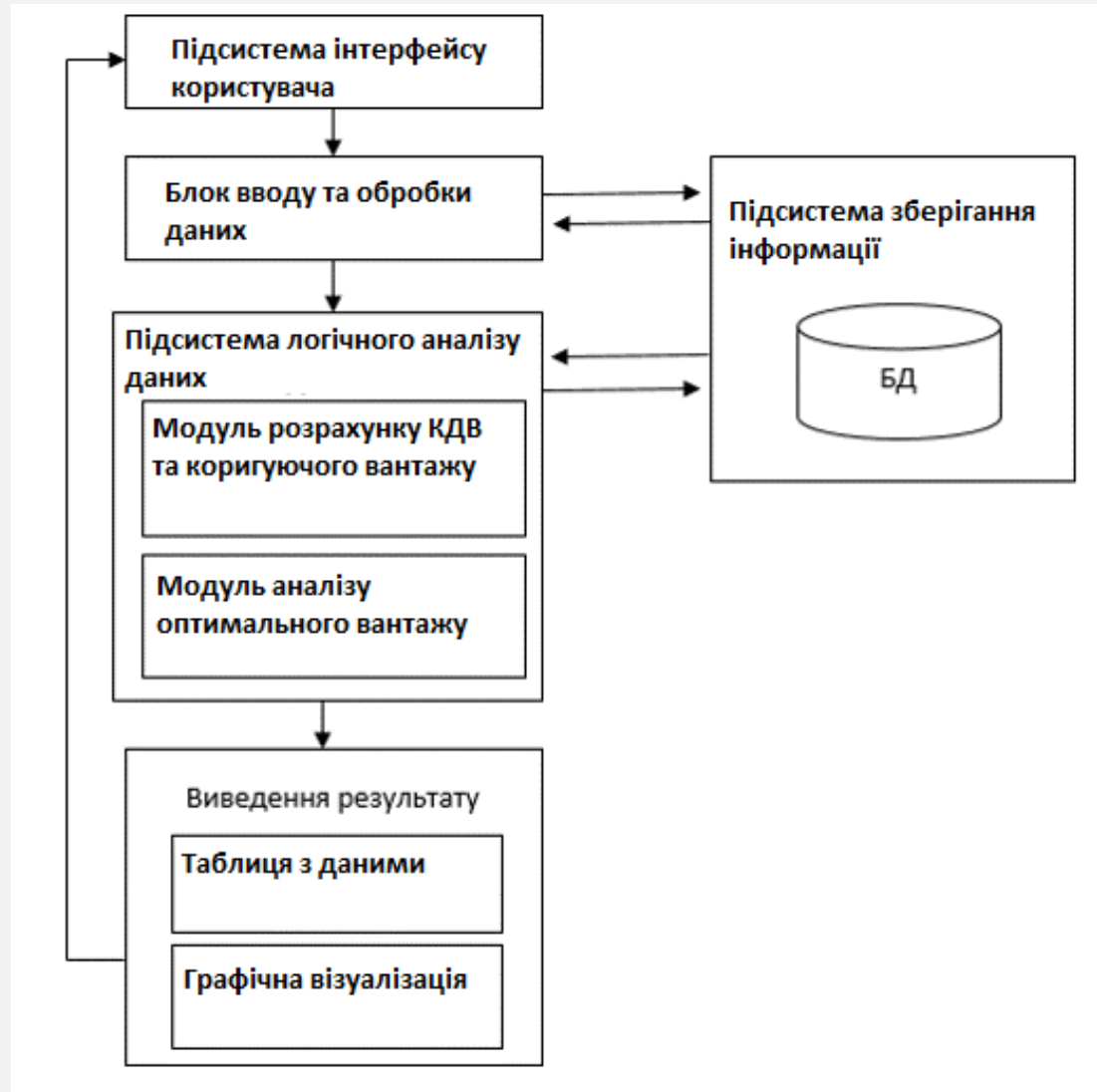




# Архітектура системи



# Модульна схема роботи системи



# Результати програми: Обчислення коефіцієнтів динамічного впливу (КДВ) за даними двох пусків

client x Natalie

localhost:8080/main

**TurbineBalancerMaster** Знайти КДВ Прогнозування Увійти

Обчислення КДВ та корегуючих вантажів (Нульовий пуск. Пробний вантаж)

Введіть значення пробного вантажу  $P_0$ :  
 $P$ :     Кут:

Введіть кількість підшипників: 2

№ підшипника	Напрямок	$A_0$	$\Phi_0$	$A_1$	$\Phi_1$	КДВ (A)	КДВ (Кут)	Корегуючий вантаж (P)	Корегуючий вантаж (Кут)
1	В	1,2	221	0,6	278	0.36	316.05	3.31	84.95
	П	0,4	234	0,2	260	0.09	337.29	4.69	76.71
	О	3,2	224	1,8	295	1.12	315.93	2.85	88.07
2	В	0,7	13	0,5	94	0.29	99.54	2.45	93.46
	П	0,9	152	0,5	192	0.22	245.13	4.11	86.87
	О	0,9	264	1	353	0.48	340.43	1.88	103.57

РОЗРАХУВАТИ    ЗБЕРЕГТИ КДВ

$P_0, A_0 \Phi_0, A_1 \Phi_1$



КДВ (A, кут),  $P_1$

# Результати програми: Обчислення залишкової вібрації за відомими значеннями КДВ для підшипникової опори

**TurbineBalancerMaster** Знайти КДВ   Прогнозування   Увійти

Обчислення балансуючих вантажів на основі КДВ. Прогнозування залишкової вібрації

Введіть кількість підшипників: 2

№ підшипника	Напрямок	$A_0$ (мкм)	$\Phi_0$	КДВ (A) (мкм)	КДВ (Кут)	Вантаж (P)	Кут P	A1 (мкм)	$\Phi_1$
1	В	1,2	221	0.29	99.54	4.20	301.46	3.46	76.61
	П	0,4	234	0.22	245.13	1.83	168.87	0.71	61.30
	О	3,2	224	0.48	340.43	6.67	63.57	4.17	81.47
2	В	0,7	13	0.36	316.05	1.93	236.95	1.90	117.38
	П	0,9	152	0.09	337.29	10.55	354.71	2.18	275.41
	О	0,9	264	0.66	17.23	1.36	66.77	1.13	126.41

РОЗРАХУВАТИ   КОРИГУВАТИ P

Для того, щоб усунути вібрацію на всіх підшипниках, потрібно встановити вантаж: 1.91   Кут: 462.69

$A_0 \Phi_0, \text{КДВ},$



$P_1, A_1, P_k$

# Коригування рівня вібрації. Вибір оптимального вантажу для множини опор

## Лінійна регресія і метод найменших квадратів

Нехай залежність між  $x$  і  $y$  має вигляд,

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x + \varepsilon,$$

Після ряду перетворень отримуємо:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [\bar{y}(x) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i]^2.$$

Необхідно, щоб функція набула найменшого значення:

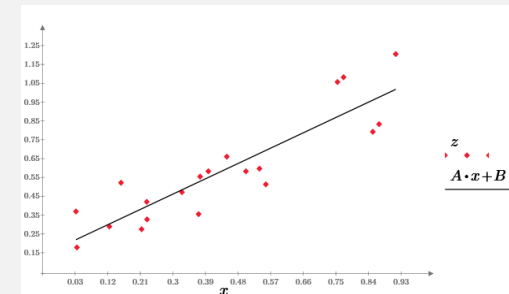
$$Q(\alpha_0, \alpha_1) = \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i]^2$$

Знаходимо часткові похідні функції  $Q$  і прирівнюємо їх до нуля:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \alpha_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i] = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial \alpha_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - \alpha_0 - \alpha_1 x_i] x_i = 0. \end{cases}$$

Шукані оцінки коефіцієнтів рівняння регресії:

$$\hat{\alpha}_0 = \frac{\overline{x^2} \cdot \bar{y} - \overline{xy} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2},$$
$$\hat{\alpha}_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}.$$



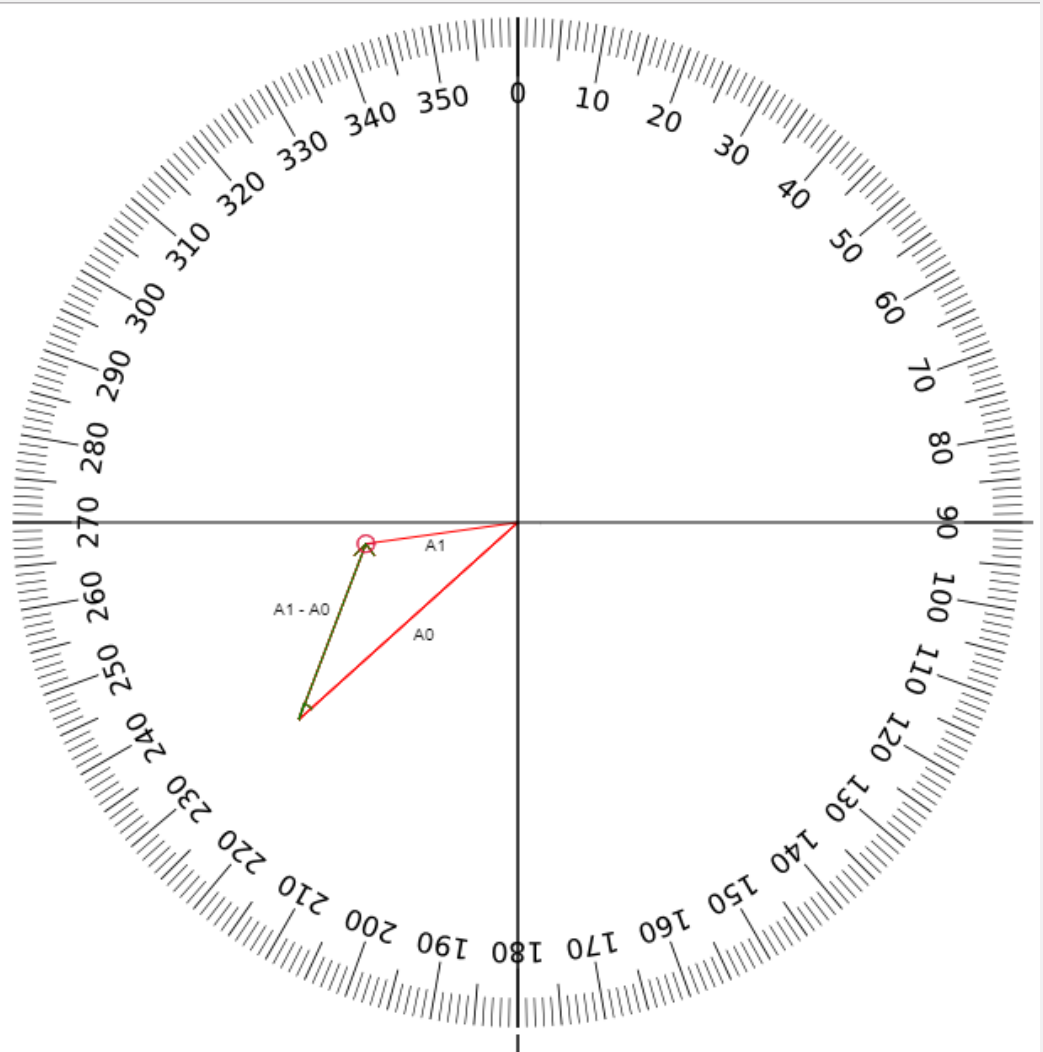
# Результати роботи програми: Прогнозування вібрації Бібліотека Brain.JS



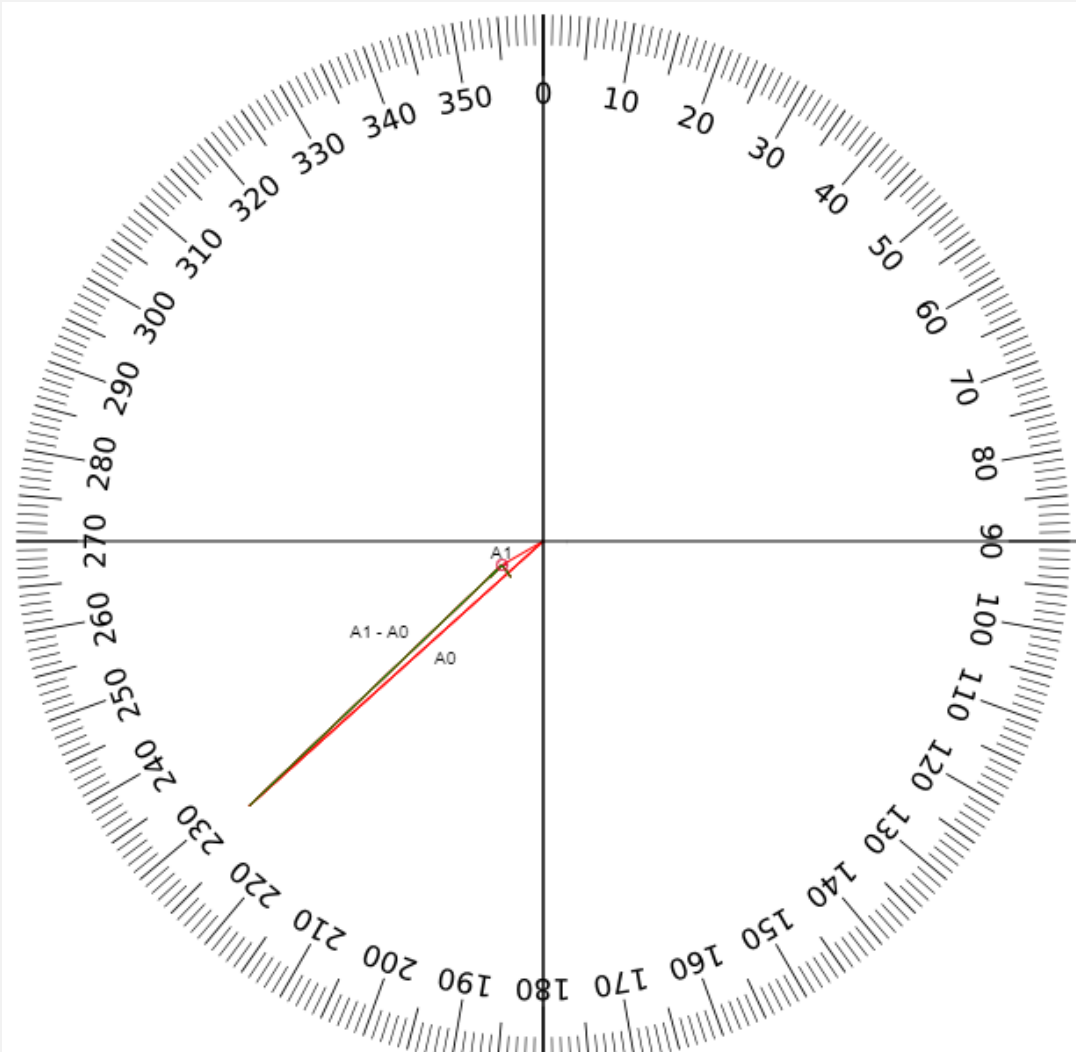
Кут Р	A1 (мкм)	φ1	Спрогнозоване A1
301.46	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">3.46</span>	76.61	4.50
168.87	0.71	61.30	0.74
63.57	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">4.17</span>	81.47	5.54
236.95	1.90	117.38	3.33
354.71	2.18	275.41	2.33
66.77	1.13	126.41	0.43



# Результати роботи програми: Візуалізація векторів вібрації на роторі турбоагрегату



Початкова вібрація



Залишкова вібрація

# ВИСНОВКИ

- ✓ Розроблено комплексну систему для проведення балансування турбоагрегату – об'єднано числовий та векторний метод аналізу рівня залишкової вібрації;
- ✓ Удосконалено алгоритм визначення одного оптимального вантажу для множини підшипникових опор за рахунок методу моделювання залежностей - лінійної регресії та прогнозування рівня залишкової вібрації за допомогою машинного навчання;