

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ  
ІНСТИТУТ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

**ЗВАРИЧ Валерій Миколайович**

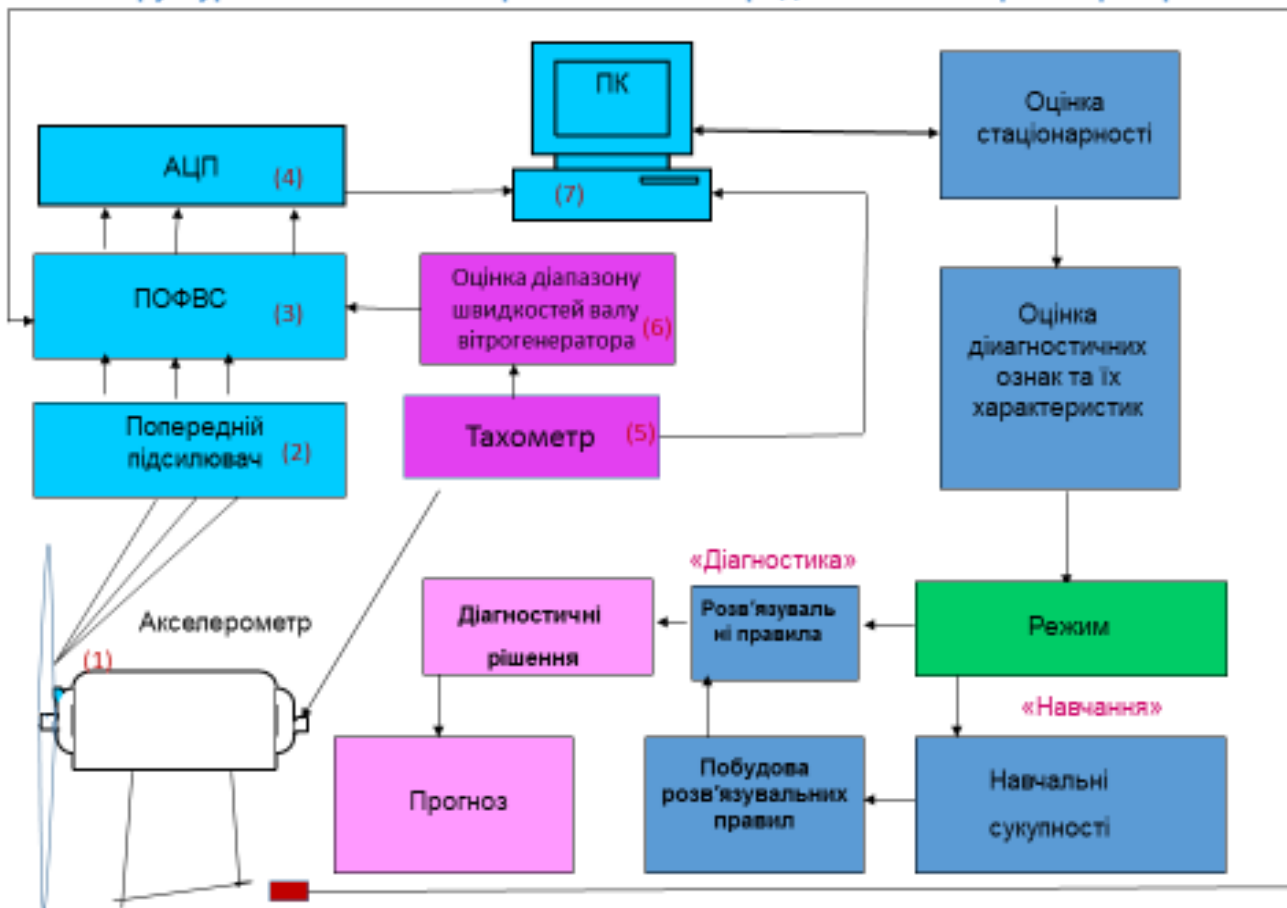
**ГИЖКО Юрій Іванович**

**ГЛАЗКОВА Олена Миколаївна**

**МИСЛОВИЧ Михайло Володимирович**

**ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ  
ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВУЗЛІВ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ЙМОВІРІСНОГО ПІДХОДУ**

Структурна схема комп'ютерної системи вібродіагностики вітрогенератора



Назва методу	V об/хв	тахометр	Переваги	Недоліки	Особливості
Метод обвідної	>600 об/хв	Не обов'язково	Достньо простий в реалізації, якщо відомі властиві частоти об'єкту діагностування	Для ефективного результату необхідна вибірка 50-100 обертів довжиною	Має сенс для вузькосмугового гаусового процесу
Спектральний аналіз	Різна	Доцільно	Достатньо добре розроблений	<i>Можна використати не для всіх режимів роботи машин та їх дефектів</i>	Широко використовується БПФ
Метод ударних імпульсів	>2000 об/хв	Доцільно	Хороші результати для високообертових машин	Не працює для низкообертових машин	Робоча частота 32 кГц
Статистичний спектральний аналіз	Різна	Не обов'язково	Використовується і для високообертових та низькообертових машин	Необхідний вибір оптимального сглажуючого вікна	Розрізнення $1/(\Delta t \times n)$ n-число відліків АКФ
Авторегресійний аналіз	>3 об/хв	Не обов'язково	Рекурентні алгоритми оцінки параметрів та порядку авторегресії	Фіксація частот квантування та фільтрації вібросигналу	P –порядок AR; P+1 число відліків АКФ

## Лінійні процеси авторегресії

$\xi_t + a_1 \xi_{t-1} + \dots + a_p \xi_{t-p} = \zeta_t \quad t \in \mathbb{Z} \quad a_1, \dots, a_p$  - параметри авторегресії;  $p$  порядок авторегресії;  
 $\zeta_t$  породжуючий процес  $\forall \varepsilon > 0, \quad P\{|\zeta_{t,n}| > \varepsilon\} < \varepsilon$  при  $n \rightarrow \infty, \quad t = 1, \dots, n.$

$$\Psi(z) = a_p + a_{p-1}z + \dots + a_1 z^p$$

$$\xi_t = \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) \zeta_{t-\tau} \quad \varphi(0) = 1; \quad \sum_{\tau=0}^{\infty} |\varphi(\tau)|^2 < \infty$$

### Ядро лінійного процесу авторегресії

$$p = 1 \quad \varphi(s) = -a_p \varphi(s-1);$$

$$p > 1 \quad \varphi(s) = -\sum_{j=1}^s a_j \varphi(s-j) \quad \text{при } s = \overline{1, p-1},$$

$$\varphi(s) = -\sum_{j=1}^p a_j \varphi(s-j) \quad \text{при } s = p, p+1, \dots$$

### Характеристична функція лінійного процесу авторегресії

$$\ln f_{\xi}(u, t) = \ln f_{\xi}(u, 1) = im_{\xi} u + \int \left\{ e^{iux} - 1 - iux \right\} \frac{dK_{\xi}(x)}{x^2},$$

$$\ln f_{\xi}(u, t) = \ln f_{\xi}(u, t) = im_{\xi} u \sum_{\tau=-\infty}^{-\infty} \varphi(\tau) + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \int \left( e^{iux\varphi(\tau)} - 1 - iux\varphi(\tau) \right) \frac{dK_{\xi}(x)}{x^2}$$

$$\ln f_{\xi}(u; t) = \ln f_{\xi}(u; 1) = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(iu)^k}{k!} \kappa_k \{ \xi_t \} \quad \kappa_k \{ \xi_t \} = \kappa_k \{ \zeta \} \sum_{\tau=0}^{\infty} \varphi(\tau) \varphi(\tau + s_1) \dots \varphi(\tau + s_{k+1})$$

$$\kappa_k \{ \xi \} \quad \kappa_k \{ \zeta \} \quad k\text{-е кумулянти процесів} \quad \xi_t \quad \zeta_t \quad s_j = t_{j+1} - t_j > 0, \quad j = \overline{1, k-1}$$

## Рівняння Юла-Уокера

$$\sum_{j=0}^p a_j r_{s-j} = 0, \quad s = 1, 2, \dots,$$

$a_j$  - параметри авторегресії;  $r_{s-j}$  - відліки автокорреляційної функції процесу авторегресії;

$p$  - порядок авторегресии.

## Алгоритм Левінсона-Дурбіна

$$a_{pp} = \frac{-\left[ r_p + \sum_{j=1}^{p-1} a_{p-1,j} r_{p-j} \right]}{\sigma_{p-1}^2}$$

$$a_{p,i} = a_{p-1,i} + a_{p,p} a_{p-1,p-i} \quad i = 1, \dots, p-1$$

$$\sigma_p^2 = \left[ 1 - (a_{p,p})^2 \right] \times \sigma_{p-1}^2$$

$$a_{1,1} = r_1 / r_0 \quad \sigma_1^2 = \left[ 1 - (a_{1,1})^2 \right] \times \sigma_{p-1}^2$$

$$r_0 = 1 \quad \sigma_0^2 = 1$$

## Критерій найменшої похибки прогнозу

$$FPE(p) = \sigma_a^2 \left( 1 + \frac{(1+p)}{n} \right)$$

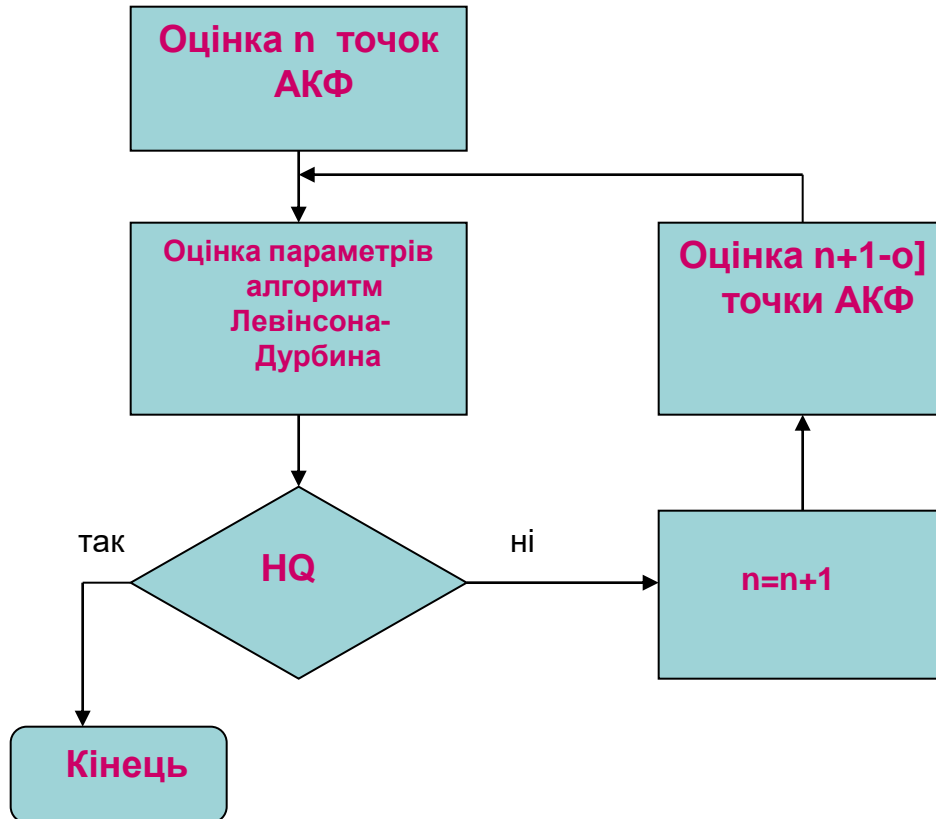
$$\sigma_a^2 = \left( \frac{n}{n - (p+1)} \right) S(p) \quad S(p) = 1 + a_1 r_1 + a_2 r_2 + \dots + a_p r_p$$

## Критерій Хеннана-Куїна

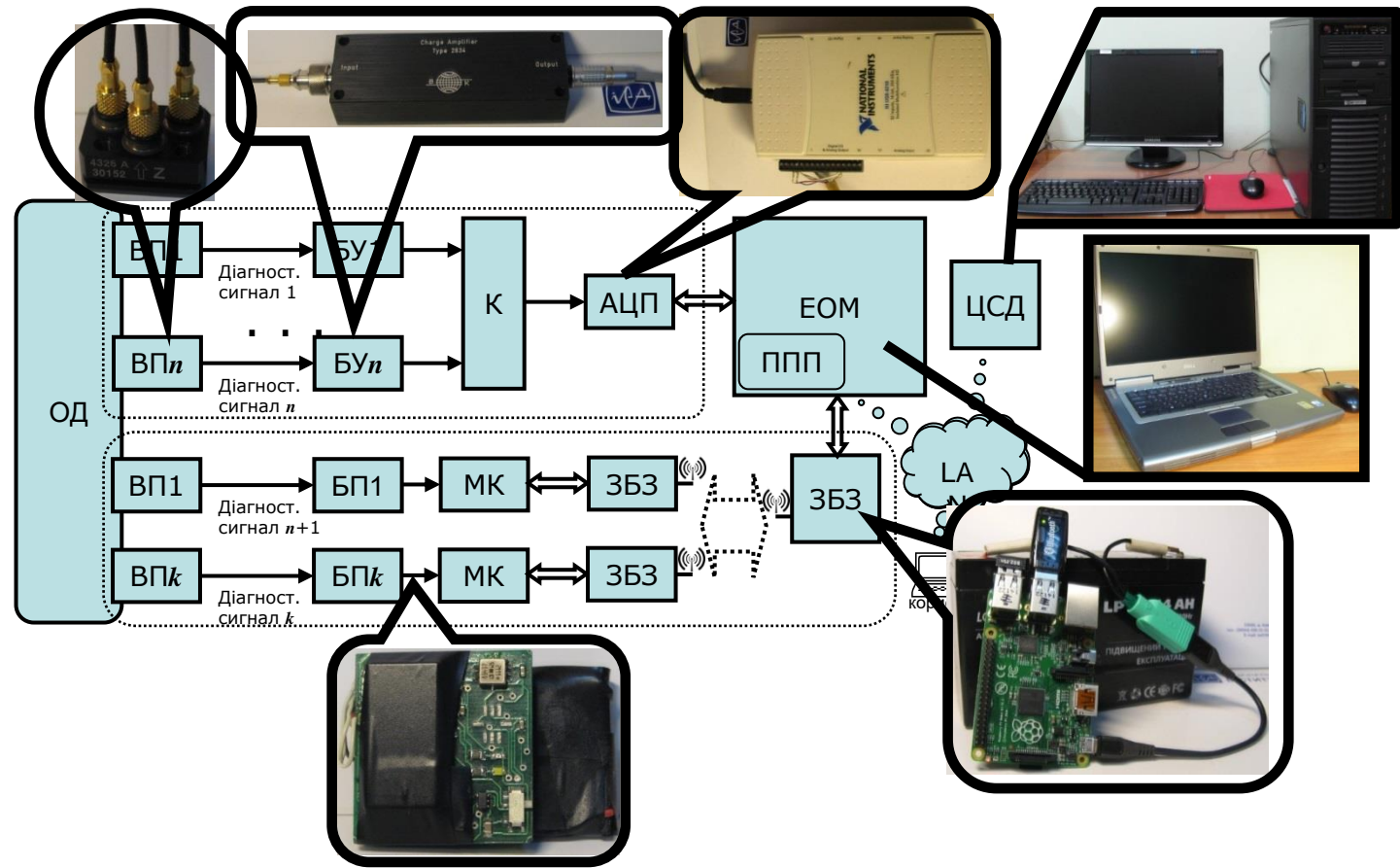
$$H_n(p) = \ln(\sigma^2(p)) + 2pc \ln(\ln(n))$$

$$\sigma_p^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^p a_k r_k$$

## Укрупнений алгоритм оцінки параметрів и порядку авторегресії



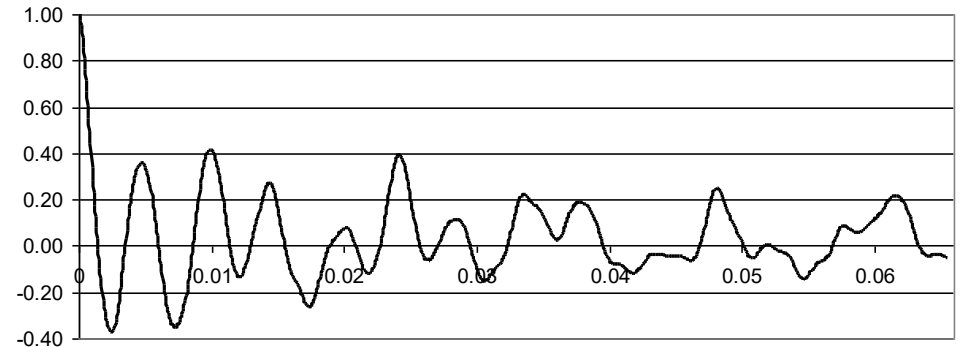
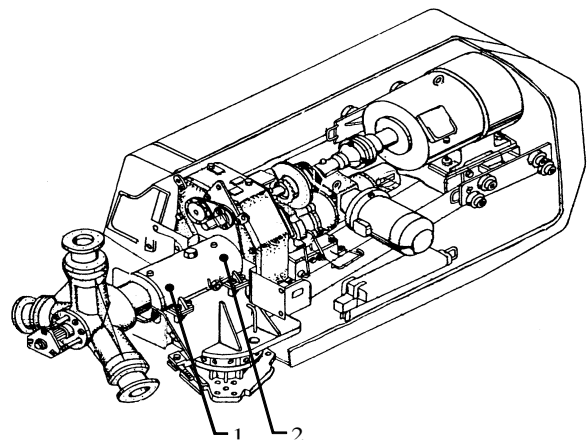
### Структура системи діагностування з реальними модулями



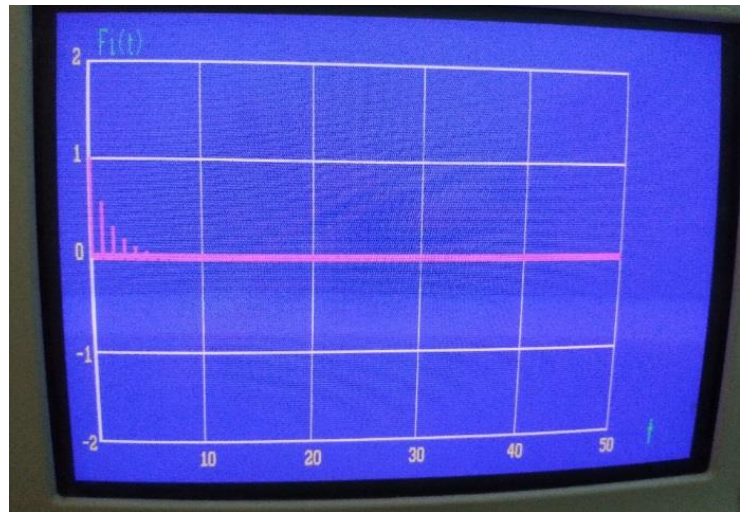
№	Позначення стандарту	Назва стандарту
	ДСТУ ISO 13373-1:2015	Моніторинг і діагностика стану машин. Моніторинг вібраційного стану. Частина 1. Загальні методики (ISO 13373-1:2002, ID)
	ДСТУ ISO 13373-2:2015	Моніторинг і діагностика стану машин. Моніторинг вібраційного стану. Частина 2. Обробляння, аналізування та представлення даних щодо вібрації (ISO 13373-2:2005, IDT)
	ДСТУ ISO 13374-1:2015	Моніторинг і діагностика стану машин. Обробляння, передавання і представлення даних. Частина 1. Загальні положення (ISO 13374-1:2003, IDT)
	ДСТУ ISO 13374-2:2015	Моніторинг і діагностика стану машин. Обробляння, передавання і представлення даних. Частина 2. Обробляння даних (ISO 13374-2:2007, IDT)
	ДСТУ ISO 13379-1:2015	Моніторинг і діагностика стану машин. Інтерпретація даних і технічна діагностика. Частина 1. Загальні настанови (ISO 13379-1:2012, IDT)

№	Позначення стандарту	Назва стандарту
	ДСТУ ISO 2954:2005	Вібрація машин зі зворотно-поступальним і обертальним рухом. Вимоги до засобів вимірювань.
	ДСТУ ГОСТ ИСО 10816-1:2007	Вібрація. Контроль стану машина наслідками вимірювань вібрації на частинах, що обертаються. Частина 1. Загальні вимоги
	ДСТУ IEC 61400-11:2006	Системи турбогенераторні вітряні. Частина 11. Методика вимірювання акустичного шуму
	ДСТУ ISO 16269-8 (ISO 16269-8:2004, IDT)-	Статистичне опрацювання даних. Частина 8. Визначення прогнозних інтервалів.
	ДСТУ ISO/TS 21749:2013	Невизначеність вимірювання в метрологічній практиці. Повторні вимірювання та ієрархічні експерименти

# Вітрогенератор USW 56-100,



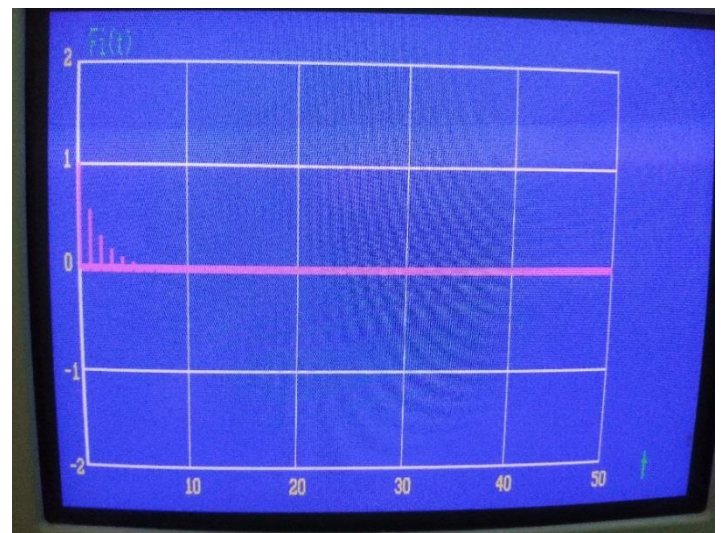
Оцінку кореляційної функції вібрацій в точці 1. (корпус головного валу)



Точка 1.

$$\xi_t + 0.55\xi_{t-1} = \zeta_t, \quad (1)$$

Критерій оцінки порядку FPE



Точка 1

$$\xi_t + 0.552\xi_{t-1} - 0.0036\xi_{t-2} = \zeta_t \quad (2)$$

Критерій оцінки порядку HQ

# Режим навчання (приведення до гаусового розподілу)

$$\Theta_m = \{\theta_{m1}, \theta_{m2}\} \quad M_m = \begin{vmatrix} \gamma_{1,1,m} & \gamma_{1,2,m} \\ \gamma_{2,1,m} & \gamma_{2,2,m} \end{vmatrix}$$

різні коваріаційні матриці  
різні матриці мат. сподівань  
діагностичних ознак

$$u_N = \ln \sqrt{\frac{|M_2|}{|M_1|}} - \frac{[(X - \Theta_1)^T M_1^{-1} (X - \Theta_1) - (X - \Theta_2)^T M_2^{-1} (X - \Theta_{21})]}{2}$$

$$B_m^T \times M_m \times B_m = A_m \quad Y_m = B_m \times X \quad W_m = B_m \times \Theta_m \quad A = \begin{bmatrix} \lambda_{1m} & 0 \\ 0 & \lambda_{2m} \end{bmatrix}$$

лінійні перетворення  
коваріаційних матриць

$$\mu_n = B_n \times \Theta_n = \begin{bmatrix} \mu_{n1} \\ \mu_{n2} \end{bmatrix} \quad W_{m(n)} = \begin{bmatrix} \mu_1 / \sqrt{\lambda_{1m}} \\ \mu_2 / \sqrt{\lambda_{2m}} \end{bmatrix}$$

нормування

$$u_{(1,2)n} = - \left[ \mathbf{W}'_{1(n)} \times \mathbf{Y}_{1(n)} - \mathbf{W}'_{2(n)} \mathbf{Y}_{2(n)} + \frac{1}{2} (\mathbf{W}'_{2(n)} \times \mathbf{W}_{2(n)} - \mathbf{W}'_{1(n)} \times \mathbf{W}_{1(n)}) \right]$$

## Планування експерименту

$$C = \frac{[M_1(u_n) + M_2(u_n)]}{2} + \frac{\sqrt{\sigma} \times (u_\alpha + u_\beta)}{2\sqrt{N}} + 2 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{поріг}$$

$$N = \frac{(u_\alpha + u_\beta)^2 \times \sigma^2}{[M_1(u_n) - M_2(u_n)]^2} \quad \text{необхідне число вимірів}$$

## Діагностика

Оцінка діагностичних ознак

$$a_1, \dots, a_p$$

Перехід до статистик

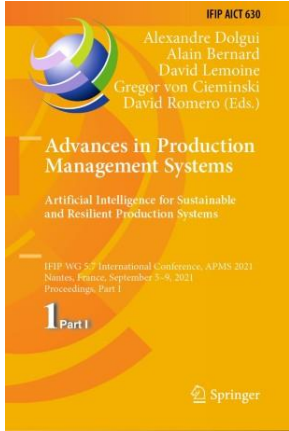
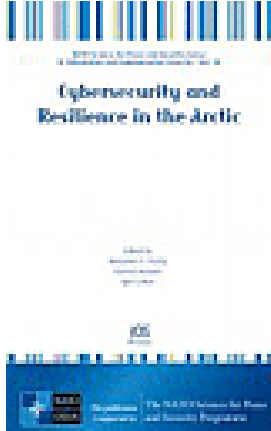
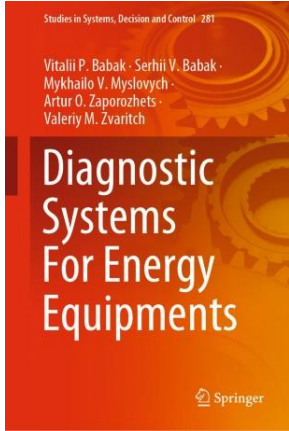
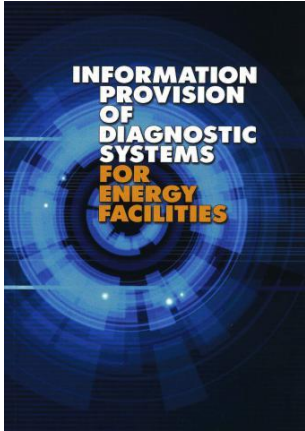
$$\tilde{y}_1 \dots \tilde{y}_6$$

Оцінка відношення правдоподібності

$$v = u_1 + u_2 + \dots + u_n$$

Рішення про технічний стан

$$v_{(1,2)_n} \geq C_{1,2}$$



**Запорожець А.О., Бабак В.П., Зварич В.М.** Система діагностування вузлів вітрогенератора. Патент на корисну модель №150044, бюл.№52, пріоритет від 29.12.2021.

Дякую  
за  
увагу!