

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”  
**СТОХАСТИЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
 ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ**

*Описано методику оптимізації стохастичної системи для вітроустановок з урахуванням збурень вітропотоків. Математична модель вітропотоків базується на припущенні про стаціонарність процесу. Використання методики дозволяє здійснити оптимізацію параметрів САК для електромеханічних систем вітроенергетики.*

*Приведена методика оптимизации стохастической системы для ветроустановок с учетом возмущений ветропотока. Математическая модель ветропотока базируется на предположении о стационарности процесса. Использование приведенной методики позволяет реализовать оптимизацию параметров САК для электромеханических систем ветроэнергетики.*

*In the article described the method of optimization of the stochastic automatic control system of windmills taking into account indignations of wind. The mathematical model of wind is based on supposition about the stationary of process. The use of the resulted method allows optimization of parameters of automatic control system for the electro mechanics systems of wind branch.*

Ефективність та надійність функціонування вітроустановки в значній мірі залежить від налаштування системи керування (САК), задачею якої є регулювання положення кута лопатів в залежності від швидкості вітропотоків, кутової швидкості вітроколеса та навантаження вітроустановки з метою підтримання кутової швидкості валу електричного генератора на постійному заданому рівні. Це забезпечує, спільно з системами регулювання збудження генератора, отримання якісної електроенергії та надійну роботу установок.

Існуючі САК детермінованої дії не враховують в повній мірі стохастичного характеру збурень зі сторони вітропотоків та навантаження, або враховують ці фактори опосередковано шляхом підвищення швидкодії сервоприводу лопатей, що негативно позначається на вартості та надійності вітроустановки в цілому.

Врахування імовірнісних характеристик вітропотоків при дослідженні динаміки САК вітроелектричної установки (ВЕУ) дозволить оптимізувати її роботу в умовах дії вітропотоків, характерного для даного регіону, знизивши витрати на виготовлення сервоприводу та регулятора.

Математичний опис вітропотоків на часовому інтервалі, порівняному до еквівалентної сталої вітроколеса може бути представлений у вигляді випадкової стаціонарної функції

$$V(t) = \tilde{m}_v + \dot{v}(t), \quad (1)$$

де:  $\tilde{m}_v$  - математичне очікування системи;  $\dot{v}(t)$  - центроване значення збурень процесу. Функція збурень в нормованому вигляді може бути записана:

$$\rho^*(\tau) = (1 + \text{abs}(\tau) D^*) e^{-0.4 \text{abs}(\tau)}, \quad (2)$$

де:  $\tau$  - кореляційний інтервал;  $D^*$  - дисперсія процесу.

Для передаточної функції САК [1]:

$$W(p) = \frac{k_\phi k_\omega k_v / \delta_\phi k_{pc} (T_{k1}p + 1)(T_{k2}p + 1)}{(T_{k3}p + 1)(T'p^2 + T_\xi p + 1)(T_d p + 1)(T_v p + 1)} \quad (3)$$

де:  $k_\phi, k_\omega, k_v, \delta_\phi, k_{pc}$  - коефіцієнти

системи;  $T_{k1}, T_{k2}, T_{k3}, T', T_\xi, T_d, T_v$  - постійні часу сервоприводу та регулятора.

Похибку САК можна записати у вигляді:

$$X = x_{vd} + x_0 + x_\delta. \quad (4)$$

Для синтезу оптимального закону керування повинна бути вирішена задача мінімізації квадратичного функціоналу:

$$F = \{\overline{\omega(t)} - \omega_3(t)\}^2 = \min, \quad (5)$$

де  $\omega(t)$ ,  $\omega_3(t)$  - поточне та задане значення вихідної координати. З урахуванням (1),(2),(4) похибку можемо представити у вигляді:

$$\begin{cases} \bar{X} = \bar{x}_v + x_d, \\ \dot{X} = \dot{x}_v, \end{cases} \quad (6)$$

де:  $\bar{X}$ ,  $\bar{x}_v$  - математичне очікування,  $\dot{X}$ ,  $\dot{x}_v$  - центроване значення.

Для середніх значень швидкості вітропотоків та випадкової складової (1) можуть бути записані в детермінованому вигляді та однозначно представлені у вигляді коефіцієнтів похибки. Однак така процедура синтезу не враховує стохастичної складової САК.

Адекватний опис центрованого випадкового процесу (1),(2) можливий за допомогою фільтру Калмана-Бьюсі:

$$\dot{X} = Bx + C_\xi, \quad (7)$$

де:  $\dot{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ;  $B = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_f^2} & -\frac{2}{T_f} \end{bmatrix}$ ;  $C = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{A} \end{bmatrix}$  - матриці

досліджуваного процесу та „білого” шуму. Тоді передаточна функція формувача:

$$W_f(p) = \frac{\sqrt{A}}{(T_f p + 1)(T_{f1} p + 1)}, \quad (8)$$

де:  $\sqrt{A}$  - коефіцієнт передачі формувача, а  $T_f$   $T_{f1}$  - постійні часу фільтру.

Після підстановки (8), (9) в вираз для передаточної функції системи (3) та відповідних перетворень, центроване значення передаточної функції по збуренню матиме вигляд:

$$W_{vx}(p) = \frac{k_{\Sigma x} g(\omega)}{h(\omega)}, \quad (9)$$

де:  $k_{\Sigma x}$  - результуючий коефіцієнт підсилення системи;

$g(\omega)$ ,  $h(\omega)$  - центруючі поліноми,

$$h(\omega) = a_0 \omega^f + a_1 \omega^{(f-1)} + \dots + a_f$$

$$g(\omega) = b_0 \omega^c + b_1 \omega^{(c-1)} + \dots + b_c,$$

b, a, c, f - коефіцієнти системи.

Заміна  $p \rightarrow j\omega$  та перетворення (10) дає спектральну щільність похибки регулювання САК по збуренню вітропотoku для реального процесу, яка може бути представлена :

$$S_{vx}^* = \left| \frac{k_{\Sigma x} g(j\omega)}{h(\omega)} \right|^2 S_v(\omega), \quad (10)$$

де:  $S_v^*(\omega) = \frac{h/\pi}{h^2 + \omega^2}$  - спектральна щільність збурень.

Для реального процесу  $h \approx 0,121$ .

Таким чином, спектральна щільність процесу на виході САК з урахуванням конкретних параметрів ВЕУ та вітропотoku може бути адекватно описана виразом (11). Тоді дисперсія в області істотних частот дорівнює:

$$D_{vx} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{h k_{\Sigma x}^2 g'(\omega)}{\pi h'(\omega) h'(-\omega)} d\omega, \quad (11)$$

де істотними є частоти, для яких виконується умова

$D_{vxi} > 0$ ;  $g'(\omega)$ ,  $h'(\omega)$  - поліноми, аналогічно (10) з урахуванням  $b'_0 = 0$ .

З точки зору оцінки якості перехідного процесу стохастичної САК ВЕУ, враховуючи (4), (6) та конкретну структуру системи, функціонал якості (5) може бути представлений:

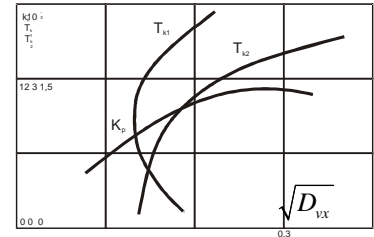
$$F = (x_v + \bar{X}_0 + \bar{X}_s) + \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \xi^2(t) dt} = \min \quad (12)$$

де:  $\xi^2(t)$  - реалізація випадкової похибки по збуренню вітропотoku. При цьому слід враховувати обмеження

на координати. Для знаходження варіацій оптимальних параметрів системи необхідно знайти, наприклад методом лінійного програмування, першу часткову похідну функціоналу (13). Для конкретної системи ВЕУ

параметрами  $T_{k1} = 7,0c$ ,  $T_{k2} = 1,35c$ ,  $k_p = 1,2 \cdot 10^{-3}$ , підставивши в вирази (1) – (13) можемо оцінити величину стохастичної похибки на рівні  $\leq 12\%$  (див. рис.), що менше в порівнянні з похибкою детермінованої САК (до 20 %) [2], крім того стохастична похибка більш близька до математичного очікування, ніж в детермінованій системі.

На рисунку показані залежності  $T_{k1}$ ,  $T_{k2}$  та  $k_p$ , де видно, що вони носять екстремальний характер. Оптимальні значення знаходяться в області



0,15...0,18  $\sqrt{D_{vx}}$ , однак для  $T_{k1}$  оптимальне значення знаходиться в області 0,12  $\sqrt{D_{vx}}$ .

Отже, приведену в статті методику розрахунку оптимальної стохастичної САК ВЕУ можна рекомендувати для впровадження в автономних вітроустановках, що дозволить зменшити середнє значення похибки регулювання та спростить регулятор. Для ВЕУ з більш жорсткими вимогами до точності та швидкодії регулятора САК слід настроювати на максимальну швидкість у відповідності з конкретними даними вітропотoku.

#### Список використаної літератури

1. А.с. 1539388 МК F03D 7/04. Система регулювання углової шкороности ветроагрегата / Н.Г.Попович, Н.Н.Бондаренко // Открытия. Изобретения. – № 4. – С. 75.
2. Бондаренко Н.Н. Система автоматического регулювання углової шкороности ветроколеса ветроагрегата // Вестн. Киевск. политехн. ин-та. – 1991. – № 28. – С. 26-27.

Отримано 21.06.06



Попович Микола Гаврилович, д-р техн. наук, зав. каф. АЕМС-ЕП НТУУ „КПІ”, 03056, м. Київ-56.пр-кт Перемоги, 37. тел. (044)241-86-56.



Бондаренко Микола Михайлович, канд. техн. наук, доцент каф. АЕМС-ЕП НТУУ „КПІ”, 03056, м. Київ-56.пр-кт Перемоги 37. Тел.(044)241-86-56.