

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ ВІТРОЕНЕРГОУСТАНОВКАМИ

**Вступ.** У зв'язку зі світовими тенденціями розвитку відновлювальної енергетики в Україні все більше приділяють увагу вітроенергетиці, яка останнім часом розвивається у напрямку розробок вітроенергоустановок (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання (ВВО). Такі ВЕУ мають цілу низку переваг порівняно з традиційними ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, а саме: робота на малих та середніх швидкостях вітру, відсутність пристроїв орієнтації за напрямком вітру, спрощена механічна трансмісія, а також можливість розміщення ВЕУ поблизу споживача завдяки покращеним екологічним показникам. До складу ВЕУ з ВВО входять: вітроротор (ВР), синхронний генератор з постійними магнітами (СППМ), акумуляторна батарея (АБ), система автоматичного керування (САК) усім комплексом.

**Аналіз останніх досліджень.** Оскільки ВЕУ з ВВО орієнтовані на роботу з малими і середніми швидкостями вітру та забезпечують електричною енергією автономних споживачів, тому до САК ставляться підвищені вимоги з точки зору максимальної енергетичної ефективності: робота ВЕУ в точці максимального відбору потужності (ТМВП) вітру при різних швидкостях вітру  $V$ , відбір електричної потужності від синхронного генератора з максимальною енергетичною ефективністю, контроль заряду-розряду АБ. Нами було досліджено різноманітні САК ВЕУ з ВВО, в яких основним керуючим елементом є силові напівпровідникові перетворювачі (СНПП) – активний випрямляч напруги або DC-DC перетворювач [1,2]. Основною задачею таких САК є робота ВЕУ в ТМВП вітру та забезпечення заряду АБ на малих швидкостях вітру.

Для випробувань різноманітних САК ВЕУ з ВВО доцільно проводити експерименти не в натурних умовах, а на імітаційному стенді ВЕУ, який фізично моделює роботу ВР при дії вітрів різної змінної швидкості. Це дозволить за короткий час відпрацювати усі можливі робочі та аварійні режими, що можуть виникати під час роботи ВЕУ в реальних умовах.

**Метою роботи** є розроблення експериментального стенда, який імітує роботу реальної ВЕУ з ВВО для випробування різноманітних САК, що розробляються для реальних ВЕУ.

**Матеріали досліджень.** Для проведення повноцінних випробувань потрібно забезпечити момент та потужність, яку може створити ВР реальної ВЕУ при різних швидкостях вітру  $V$ .

Момент механічного рушія  $M_0$  для одномасової механічної системи визначається рівнянням балансу моментів:

$$M_d = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1)$$

де  $M_c$  – статичний момент опору на валу механічного рушія, Нм;  $J$  – сумарний момент інерції,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $\frac{d\omega}{dt}$  – кутове прискорення валу механічного рушія.

Для відтворення реальних умов роботи ВЕУ експериментальний стенд під час випробувань повинен забезпечити в будь-який момент часу дотримання наступних умов:

$$\begin{cases} M_G^{BP}(t) = M_G^{CT}(t) \\ \alpha^{BP}(t) = \alpha^{CT}(t) \end{cases}, \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

де  $M_G^{BP}(t)$ ,  $M_G^{CT}(t)$  – моменти навантаження реального ВР та стендового імітатора ВР (ІВР), які створюються електричним навантаженням СППМ;  $\alpha^{BP}(t)$ ,  $\alpha^{CT}(t)$  – кут повороту валу реального ВР та ІВР;  $T$  – час проведення одного циклу випробувань, с; верхній індекс в позначеннях відображає технічний пристрій: ВР – вітроротор реальної ВЕУ, СТ – експериментальний стенд.

Виходячи з (1) і (2), отримуємо рівняння руху електромеханічних систем реальної ВЕУ  $M^{BP}$  та стенда  $M^{CT}$ :

$$M^{BP}(t) = M_c^{BP}(t) + J^{BP} \frac{d\omega}{dt} + M_G^{BP}(t), \quad (3)$$

$$M^{IBP}(t) = M_c^{CT}(t) + J^{CT} \frac{d\omega}{dt} + M_G^{CT}(t), \quad (4)$$

де  $M_c^{BP}(t)$ ,  $M_c^{CT}(t)$  – моменти статичного опору реальної ВЕУ та стенда, які створюються в наслідок сухого і в'язкого тертя в опорах;  $J^{BP}$ ,  $J^{CT}$  – моменти інерції реальної ВЕУ та стенда;  $\omega$  – швидкість обертання валу ІВР ВЕУ, яка відповідно до (2) рівна швидкості обертання валу ВР реальної ВЕУ;  $M^{IBP}$  – момент, що створює ІВР.

Для забезпечення виконання умов (2) та імітування роботи реального ВР виразимо з (3) та підставимо в (4)  $M_G^{BP}(t)$  в результаті чого отримуємо

$$M^{IBP}(t) = M^{BP}(t) - (J^{BP} - J^{CT}) \frac{d\omega}{dt} - (M_c^{BP} - M_c^{CT}). \quad (5)$$

Момент реального ВР можна представити відомим виразом [3]:

$$M^{BP} = 0,5 \rho A r V^2 \frac{Cp(\lambda)}{\lambda}, \quad (6)$$

де  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $A$  – площа омивання ВР,  $\text{м}^2$ ;  $r$  – радіус лопаті,  $\text{м}$ ;  $Cp(\lambda)$  – коефіцієнт потужності ВР;  $\lambda$  – швидкохідність ВР,  $\lambda = \omega r / V$ .

Підставляючи в (5) рівняння (6), отримуємо остаточний вираз для моменту IBP, який забезпечує роботу експериментального стенда, ідентичну роботі реальної ВЕУ:

$$M^{IBP}(t) = 0,5 \rho A r V^2 \frac{Cp(\lambda)}{\lambda} - (J^{BP} - J^{CT}) \frac{d\omega}{dt} - (M_c^{BP} - M_c^{CT}). \quad (7)$$

Розроблений експериментальний стенд автономної ВЕУ (рис. 1) складається: з IBP реальної ВЕУ, реалізованого двигуном постійного струму М з незалежним збудженням; СГПМ реальної ВЕУ; інкрементальною давача кута положення ротора IBP ІД; системи керування (СК IBP), реалізованої на персональному комп'ютері ПК разом з мікроконтролером МК та широтно імпульсним перетворювачем (ШП). Для регулювання навантаження СГПМ у стенді використовується СНПП, який керується САК ВЕУ і навантажений на АБ і/або активні опори  $R_n$ , що імітують автономних споживачів електричної енергії. САК ВЕУ працює тільки з вихідними параметрами СГПМ (напруга та струм статора) та формує керуючі сигнали для СНПП, забезпечуючи можливість працювати експериментальному стенду в ТМВП вітру та заряджати АБ вже на малих  $V$ .

Функціональна схема системи керування IBP представлена на рис. 2. Вхідні дані  $V$  та  $\omega$  для обчислення  $M^{IBP}$  ПК отримує через карту АЦП ADA-1292. Використовуючи мову програмування TURBO PASCAL за (7) ПК розраховує завдання  $M^{IBP}$ , яке через паралельний порт поступає на вхід пропорційно-інтегруючого регулятора струму ПІ-РС запрограмованого в МК ATMEGA 853516PU. Функціональні можливості МК дозволили одночасно з ПІ-РС в МК реалізувати широтно імпульсну модуляцію (ШІМ) та визначати  $\omega$  з дискретних сигналів, котрі поступають з ІД.

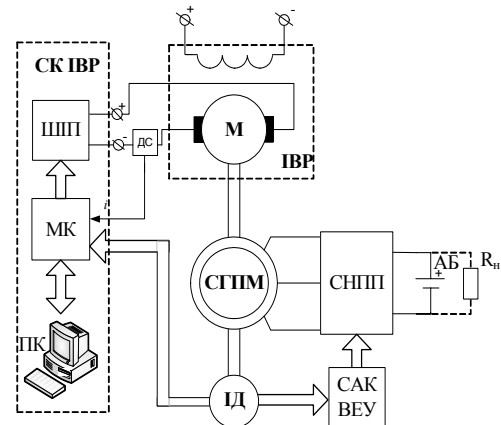


Рис. 1. Функціональна схема експериментального стенда ВЕУ з ВВО

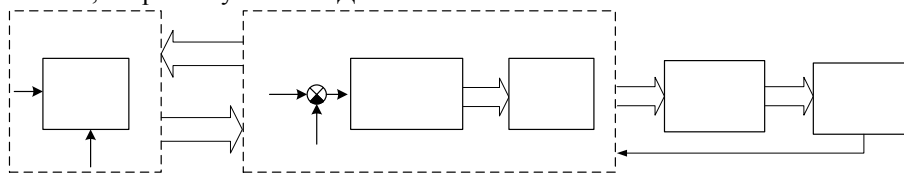


Рис. 2 Функціональна схема системи керування IBP

У ПК передбачена можливість налаштувати параметри IBP під будь-який реальний ВР; змінювати значення  $V$  як в програмному, так і ручному режимі; реєструвати поточні значення вихідних координат реального ВР ( $\omega$ ,  $M_{BR}$  в залежності від  $V$  та характеру навантаження СГПМ) та електричні змінні на виході СГПМ.

**Висновки.** Виведено рівняння (7), що забезпечує моделювання механічної характеристики ВР реальної ВЕУ електромеханічним IBP з врахуванням реального моменту інерції ВЕУ в статичних та динамічних режимах.

Розроблений експериментальний стенд для випробовування САК реальних ВЕУ дає можливість відпрацювати усі передбачені робочі режими за короткий час з імітуванням роботи реального ВР автономної ВЕУ з вертикальною або горизонтальною віссю обертання з можливістю гнучкого налаштування та реєстрації механічних координат ВР і електричних СГПМ під час випробувань.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щур І.З. Багатофункціональне керування активним випрямлячем в локальній вітроенергетичній системі з вертикальною віссю обертання / І.З.Щур, О.Р.Турленко // Вестн. Национ. ун-та «Харьк. политехн. ин-т»: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – Вып. 30. – Харьков, 2008. – С. 418-420.
2. Shchur I.Z. A control system based on the DC-DC converter for stand-alone vertical-axis wind turbines / I.Z. Shchur, O.R. Turlenko/ Uniwersytet technologiczno-przyrodniczy im. Jana I Jędrzeja Śniadeckish w Bydgoszczy. Zeszyty naukowe. Elektrotechnika. — 2010 (у друці).
3. Ezzeldin S. Abdin Control design and dynamical performance analysis of a wind turbine-induction generation unit / Ezzeldin S. Abdin, Wilson Xu. // IEEE Transaction on energy conversion. – 2000 Vol. 15, no.1 – P. 91 – 96