

$-5,5'(-22')$.

Залежно від допустимого рівня похибок на підставі кривих рис. 4, рис. 5 можуть бути визначені допустимі значення неідентичності елементів високовольтного плеча подільника.

При співставленні максимальних змін АЧХ і ФЧХ, виражених у відносних одиницях, виявляється, що вплив неідентичності елементів смістості високовольтного плеча в 1,7...1,8 рази є більшим значимим для амплітудних характеристик подільника, ніж для фазових.

Розглянуті нестабільності характеристик подільника, викликані складом його структурних елементів, дозволяють пояснити відомі практичні дані [4] про збільшений рівень похибок, а саме, високовольтних широкосмугових подільників напруги, що містять, як правило, значну кількість високовольтних конденсаторів з допуском за смістністю $\pm 15... 20\%$ і більше.

Можливість значної додаткової похибки (до 1...2% і більше) в області перехідних частот від нуля до десятків та сотень кілогерц повинна враховуватись як при розробці та дослідженні нових конструкцій високовольтних подільників напруги, так і при проведенні вимірювань (в тому числі, якості електроенергії) в високовольтних електричних мережах.

1. Болотин И.Б., Эйдель Л.З. Измерения при испытании аппаратов в режимах короткого замыкания. — Л.: Энергоатомиздат. — 1988. — 200 с.

2. Бржезицкий В.О., Стогий Б.С. Методичні вказівки до вивчення дисципліни "Вимірювання високих напруг та великих струмів" для студентів спеціальності 7.090604 "Техніка та електрофізика високих напруг". — К.: КПІ. 1994. — 32 с.

3. Бржезицкий В.А., Иерусалимов М.Е., Проценко А.Р. О частотной зависимости характеристик емкости-омического делителя напряжения // Техн.электродинамика. — 1987. — № 1. — С. 3—7.

4. Гуров С.А., Владимиров Г.А., Злобин О.А. Состояние исследований и разработки средств измерения сверхвысоких напряжений 1—4 МВ. — М.: Информэлектро. 1975. — 80 с.

5. Иерусалимов М.Е., Бржезицкий В.А., Проценко А.Р. и др. Выравнивание распределения напряженности электрического поля в рабочем объеме изоляционной конструкции с помощью электродов // Изв. ВУЗов. Энергетика. — 1988. — № 7. — С. 3—7.

6. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: в 2-х томах. — Л.: Энергоатомиздат. 1981. — 536 с.

7. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения. — Л.: Энергоатомиздат. 1983. — 264 с.

8. ГОСТ 13109-97 "Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения".

Надійшла 12.01.2007

УДК 621.548:621.311.245

П.П.Пекур (Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

Режимні обмеження на параметри роботи вітроелектричних установок під навантаженням

Визначено область зміни відносного аеродинамічного моменту ротора вітроелектричних установок (ВЕУ) з асинхронними та синхронними генераторами, яка відповідає генераторному режиму роботи і в межах якої не виникає перенавантаження електричних машин, обумовлених пульсаціями швидкості вітру. Отримано аналітичні вирази для меж робочої області на аеродинамічних характеристиках. Встановлено діапазони робочих швидкостей вітру та проаналізовано вплив параметрів ВЕУ на величину цих діапазонів.

Определена область изменения относительного аэродинамического момента ротора ветроэлектрических установок (ВЭУ) с асинхронными и синхронными генераторами, которая соответствует генераторному режиму работы и в пределах которой не возникает перегрузок электрических машин, обусловленных пульсациями скорости ветра. Получены аналитические выражения для границ рабочей области на аэродинамических характеристиках. Установлены диапазоны рабочих скоростей ветра и проанализировано влияние параметров ВЭУ на величину этих диапазонов.

Вітроелектрична установка (ВЕУ) є джерелом електричної енергії, поточна потужність якої ви-

значається величиною та змінами швидкості вітру у часі. Непередбачуваність вітру поєднується з ве-

© Пекур П.П., 2007

ликим діапазоном зміни його швидкостей. Ця особливість посилюється кубічною залежністю потужності повітряного потоку від швидкості вітру [6]. Експериментальні [1] та розрахункові дослідження енергетичних характеристик ВЕУ за стохастичного моделювання динаміки повітряного потоку [4] показують, що при початкових робочих швидкостях вітру генераторний режим роботи електричної машини ВЕУ чергується з її роботою в режимі двигуна. Із збільшенням середньої швидкості вітру його пориви, що можуть у 1,5...2 рази перевищувати середні значення [2], все частіше викликають перенавантаження генератора. Для забезпечення умов надійної і ефективної роботи обладнання ВЕУ необхідно не допускати роботу електричних машин у режимі двигуна та обмежувати тривалість і величину навантажень генераторів допустимими для них значеннями. Цього можна досягти на етапі проектування ВЕУ шляхом раціонального вибору технічних параметрів електромеханічної системи та системи керування ВЕУ. Це є однією з найбільш складних задач, що вирішиться при проектуванні ВЕУ. Коректне її вирішення не можливе без знання впливу параметрів обладнання ВЕУ на межі робочої області.

У статті основна увага приділена визначенню областей допустимих значень відносного аеродинамічного моменту ротора ВЕУ та швидкостей вітру, які відповідають генераторному режиму роботи і в межах яких не виникає перевантажень електричних машин, обумовлених пульсаціями швидкості вітру, а також кількісній оцінці меж цих областей. В подальшому генераторний режим роботи без перевантаження будемо називати нормальним.

Для кожного конкретного типу електричної машини встановлено максимальні допустимі значення моменту, струму та потужності, які вони можуть споживати з електричної мережі або генерувати в неї. Так генератори змінного струму з номінальною потужністю до 1200 МВА включно повинні витримувати струм, що дорівнює 1,5-кратному номінальному струму протягом 30 с [5, 7]. При розрахунках електромеханічної системи та системи керування ВЕУ необхідно забезпечувати режими, при яких фактичні значення параметрів режиму не перевищують допустимих значень.

Величиною, що визначає область допустимих режимів роботи ВЕУ, є генерована потужність. Потужність, що фактично генерується в електричну мережу, не повинна тривалий час перевищувати номінальну потужність генератора. Враховуючи, що у генераторному режимі роботи швидкість обертання вала синхронного генератора (а отже і ротора ВЕУ) є постійною, а асинхронного — зазнає незначних змін [3], то потужність генераторів буде обумовлена моментом ротора ВЕУ. Допустимий діапазон зміни відносного аеродинамічного моменту ротора визначається обмеженнями у формі нерівностей

$$\inf \bar{M}_p(z) \leq \bar{M}_p(z | \varphi_{\perp}) \leq \sup \bar{M}_p(z), \quad (1)$$

де $\inf \bar{M}_p(z)$ і $\sup \bar{M}_p(z)$ — нижня та верхня межі робочої області на аеродинамічних характеристиках ротора ВЕУ; z — швидкохідність ротора ВЕУ; φ_{\perp} — кут повороту лопатей, відносно площини обертання; $\bar{M}_p(z | \varphi_{\perp})$ — відносний аеродинамічний момент ротора ВЕУ за вказаного кута повороту лопатей.

Межі робочої області на аеродинамічних характеристиках можна визначити з умов рівноваги моментів, прикладених до ротора ВЕУ. Для ВЕУ з асинхронним генератором рівність моментів у розгорнутому вигляді запишеться наступним чином [3]:

$$0,5\pi \rho R^3 v^2 \bar{M}_p(z | \varphi_{\perp}) = \frac{(1+a_{\text{н}}) P_{\text{н}}}{\omega_{\text{po}}^2 s_{\text{н}} (1-s_{\text{н}})} \times \\ \times (\omega_{\text{po}} - \omega_p) + M_{\text{сн}}, \quad z = \omega_p R/v, \quad (2)$$

де ρ — щільність повітря; R — радіус ротора ВЕУ; v — поточне значення швидкості вітру; $a_{\text{н}}$ — коефіцієнт, що враховує збільшення моменту опору від втрат, обумовлених навантаженням ВЕУ; $P_{\text{н}}$ — номінальна активна електрична потужність на виводах генератора; $\omega_{\text{po}}, \omega_p$ — синхронна та поточна кутові швидкості обертання ротора ВЕУ; $s_{\text{н}}$ — номінальне ковзання генератора ($s_{\text{н}} < 0$); $M_{\text{сн}}$ — момент сил опору в трансмісії та генераторі на холостому ходу.

Момент опору від повних втрат енергії в трансмісії та генераторі розділений на постійний та змінний. Постійний момент опору $M_{\text{сн}}$ обумовлений втратами холостого ходу (механічними, магнітними, вентиляційними, додатковими і т.п.), a змінний момент опору, обумовлений втратами, що залежать від навантаження, тобто втратами в трансмісії та в обмотках генератора при протіканні по них струму навантаження. В (2) змінний момент опору враховується коефіцієнтом $a_{\text{н}}$. Числове значення $a_{\text{н}}$ відповідає відносному значенню змінних втрат при номінальному навантаженні по відношенню до номінальної активної потужності генератора $P_{\text{н}}$.

Рівність (2) дозволяє визначити відносний аеродинамічний момент $\bar{M}_p(z | \varphi_{\perp})$, що відповідає нормальному генераторному режиму роботи. Для визначення меж робочої області розглянемо дві крайні точки генераторного режиму роботи асинхронної машини — холостий хід та номінальний режим.

За холостого ходу асинхронна машина не генерує потужності і вал машини обертається з синхронною швидкістю $\omega_p = \omega_{\text{po}}$. Тому, незалежно від кута повороту лопатей, нижня межа робочої області $\inf \bar{M}_p(z)$ визначається множиною точок, координати яких відповідають швидкохідності та віднос-

ному моменту ротора, що забезпечують при синхронній швидкості обертання вала генератора компенсацію моменту опору в трансмісії та асинхронному генераторі на холостому ході. У відповідності з (2) крива $\inf \bar{M}_p(z)$ задається аналітично системою параметричних рівнянь

$$\begin{aligned} \inf \bar{M}_p(z) = \bar{M}_p(z | \varphi_{\text{л}}) &= 2M_{\text{сн}} / \pi \rho R^3 v^2, \\ z &= \omega_0 R / k_M v. \end{aligned} \quad (3)$$

де ω_0 — синхронна кутова швидкість обертання вала генератора; k_M — передавальне число мультиплікатора.

Перше рівняння в (3) визначає числове значення відносного аеродинамічного моменту, що забезпечує компенсацію моменту опору, а друге — швидкість ротора, при якій цей аеродинамічний момент повинен розвиватися.

В (3) параметром є швидкість вітру v , а решта величин для конкретної ВЕУ є постійними. Так як друге рівняння в (3) має обернену функцію

$$v = \omega_0 R / k_M z, \quad (4)$$

то, виключивши параметр v з першого рівняння (3), можна отримати вираз безпосередньої залежності $\inf \bar{M}_p$ від z

$$\inf \bar{M}_p(z) = A z^2, \quad (5)$$

де $A = 2M_{\text{сн}} k_M^2 / \pi \rho R^5 \omega_0^2$.

Верхню межу робочої області $\sup \bar{M}_p(z)$ визначимо по номінальному режиму роботи синхронної машини. Координати точок верхньої межі повинні забезпечувати при номінальній швидкості обертання вала генератора номінальну потужність електричної машини та компенсацію всіх втрат. Параметричне задання цієї кривої має вигляд

$$\begin{aligned} \sup \bar{M}_p(z) = \bar{M}_p(z | \varphi_{\text{л}}) &= 2 (\pi \rho R^3 v^2)^{-1} \times \\ &\times \left[\frac{(1+a_{\text{н}}) P_{\text{н}} k_M}{\omega_0 (1-s_{\text{н}})} + M_{\text{сн}} \right], \\ z &= \frac{\omega_{\text{н}} R}{k_M v} = \frac{\omega_0 (1-s_{\text{н}}) R}{k_M v}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\omega_{\text{н}}$ — номінальна кутова швидкість обертання вала генератора.

Виключивши аналогічно (3) параметр v

$$v = \omega_0 (1-s_{\text{н}}) R / k_M z \quad (7)$$

з першого рівняння (6), отримаємо безпосередню

залежність $\sup \bar{M}_p$ від z

$$\sup \bar{M}_p(z) = B \cdot z^2, \quad (8)$$

$$\text{де } B = \frac{2k_M^2}{\pi \rho R^5 \omega_0^2 (1-s_{\text{н}})^2} \left[\frac{(1+a_{\text{н}}) P_{\text{н}} k_M}{\omega_0 (1-s_{\text{н}})} + M_{\text{сн}} \right].$$

При використанні як генератора синхронної машини, ковзання в якій відсутнє, тобто $s_{\text{н}} = 0$, верхня межа робочої області визначається рівнянням

$$\sup \bar{M}_p(z) = \frac{2k_M^2}{\pi \rho R^5 \omega_0^2} \left[\frac{(1+a_{\text{н}}) P_{\text{н}} k_M}{\omega_0} + M_{\text{сн}} \right] z^2. \quad (9)$$

Рівняння (5), (8) та (9) є рівняннями парабол з вершиною в початку координат. Характер кривих залежить від геометричних розмірів ротора, параметрів генератора та трансмісії. За постійного радіуса ротора ВЕУ визначальними для області допустимих режимів є номінальна потужність генератора і передавальне число мультиплікатора. На рис. 1 наведені залежності $\inf \bar{M}_p$ та $\sup \bar{M}_p$ при різних значеннях $P_{\text{н}}$ і k_M , а також аеродинамічні характеристики ротора при різних $\varphi_{\text{л}}$. Використання потужнішого генератора пропорційно розширює допустимий діапазон зміни відносного аеродинамічного моменту. Збільшення передавального числа мультиплікатора за того ж значення синхронної кутової швидкості обертання вала генератора приводить до зменшення кутової швидкості обертання ротора ВЕУ, що, в свою чергу, вимагає більшого відносного аеродинамічного моменту для передачі тієї ж потужності.

У відповідності з рис. 1 для ВЕУ можливі три режими роботи.

Область $\bar{M}_p(z | \varphi_{\text{л}}) \leq \inf \bar{M}_p(z)$ відповідає режиму, при якому момент, що розвивається ротором ВЕУ, менше моменту опору в трансмісії та генераторі і електрична машина працює в режимі двигуна, покриваючи різницю між моментом опору і моментом ротора. Причому, кутова швидкість обертання вала генератора стає менше синхронної і машина споживає електричну енергію з мережі.

Область $\inf \bar{M}_p(z) \leq \bar{M}_p(z | \varphi_{\text{л}}) \leq \sup \bar{M}_p(z)$ відповідає генераторному режиму, при якому момент ротора ВЕУ покриває всі втрати в трансмісії та генераторі і віддає в мережу потужність $0 \leq P \leq P_{\text{н}}$. Кутова швидкість вала генератора перевищує синхронну і змінюється в межах $\omega_0 \leq \omega \leq \omega_{\text{н}}$.

Область $\bar{M}_p(z | \varphi_{\text{л}}) \leq \sup \bar{M}_p(z)$ теж відповідає генераторному режиму. У цій області момент ротора ВЕУ перевищує сумарний момент опору та номінальний момент генератора. Кутова швидкість вала генератора перевищує номінальну і електрична машина працює з перевантаженням.

В залежності від зміни у часі швидкості вітру

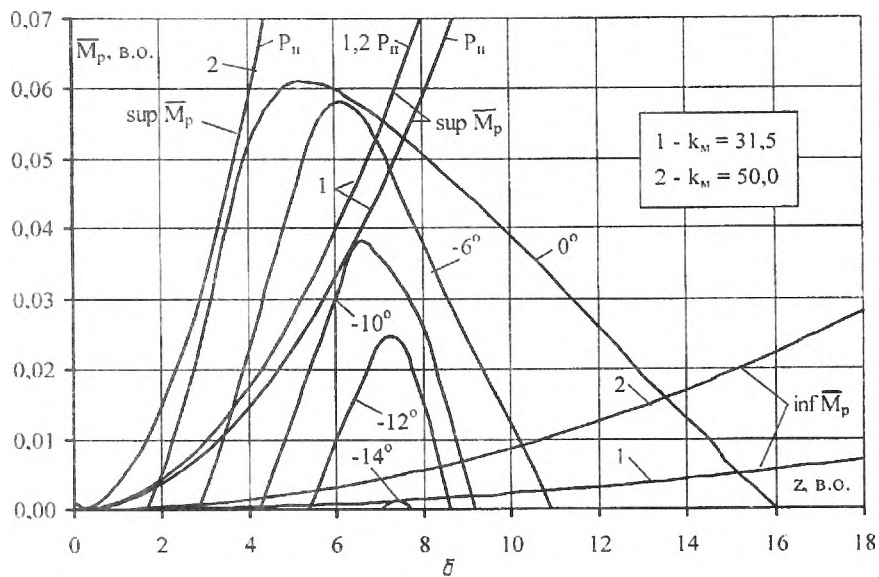
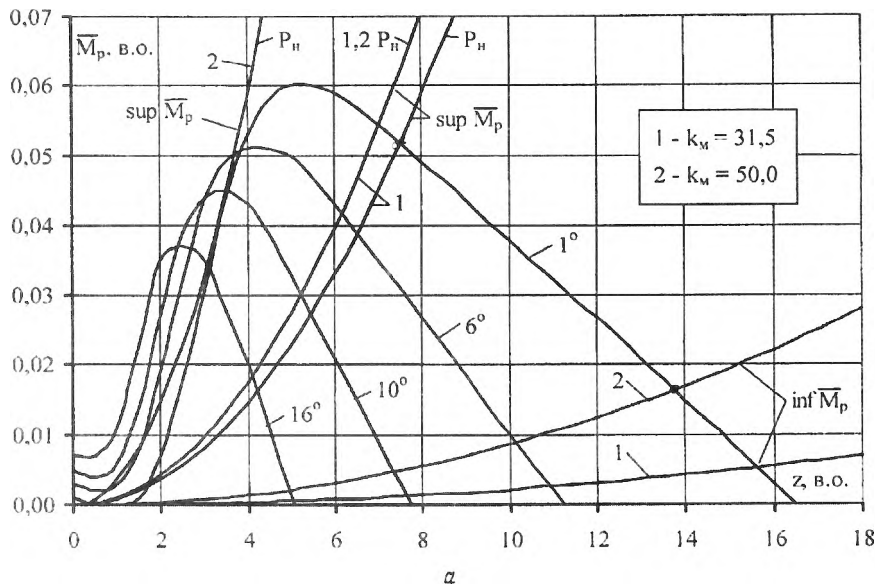


Рис. 1

буде змінюватись момент ротора ВЕУ. Через обмеженість допустимих значень моменту (у відповідності з $\inf \bar{M}_p(z)$, $\sup \bar{M}_p(z)$) будуть обмеженими і допустимі значення швидкості вітру. На множині можливих значень швидкості вітру можна виділити діапазони робочих швидкостей вітру, що відповідають нормальному генераторному режиму роботи ВЕУ. Межі цих діапазонів визначаються через швидкохідності, що відповідають точкам перетину аеродинамічних характеристик ротора $\bar{M}_p(z|\varphi_{л})$ з $\inf \bar{M}_p(z)$ та $\sup \bar{M}_p(z)$.

У загальному випадку координати (абсциси) точок перетину $z_{\inf}(\varphi_{л})$ і $z_{\sup}(\varphi_{л})$ знаходяться числовими методами з рівностей

$$Sp[\bar{M}_p(z_{\inf}|\varphi_{л})] = \inf \bar{M}_p(z_{\inf}), \quad (10)$$

$$Sp[\bar{M}_p(z_{\sup}|\varphi_{л})] = \sup \bar{M}_p(z_{\sup}), \quad (11)$$

де $Sp[\bar{M}_p(z|\varphi_{л})]$ — кубічний сплайн відносної аеродинамічної характеристики моменту ротора ВЕУ за вказаного кута повороту лопатей $\varphi_{л}$; $z_{\inf}(\varphi_{л})$, $z_{\sup}(\varphi_{л})$ — значення швидкохідностей, при яких аеродинамічна характеристика перетинає відповідно нижню та верхню межі робочої області.

Мінімальну та максимальну робочу швидкість вітру розраховують по (4) або (7). Вибір формули залежить від положення аеродинамічних характеристик ВЕУ відносно допустимої області. Кількісний аналіз режимів роботи та їх характеристик виконаємо з використанням параметрів ВЕУ-220 номінальною потужністю 220 кВт. Трилопатевий ротор установки має діаметр 32 м і вісь ротора знаходиться на висоті 30 м над поверхнею землі. Передавальне число мультиплікатора складає 31,5. Як генератори використовуються дві асинхронні машини з короткозамкнутою обмоткою ротора типу АГВ280М4ОМ2 (з-д "Південелектромаш", м. Нова

Каховка) номінальною активною потужністю 110 кВт кожів і напругою 0,38 кВ. Синхронна частота обертання ротора генератора складас 1500 об/хв, а номінальне ковзання — 1,5% ($s_H = -0,015$).

В залежності від кута повороту лопатей та передавального числа мультиплікатора аеродинамічні характеристики ВЕУ можуть знаходитись в межах допустимої області або виходити за них (рис. 1). За антифлюгерного напрямку зміни кута повороту лопатей при $k_M = 31,5$, $\varphi_{\perp} < -14^{\circ}$ аеродинамічні характеристики розміщуються нижче $\inf \bar{M}_p(z)$ і ВЕУ на цих кутах за будь-якої швидкості вітру не може працювати в генераторному режимі. При $\varphi_{\perp} = -14^{\circ}$ аеродинамічна характеристика є дотичною до $\inf \bar{M}_p(z)$. Кут в -14° є мінімальним кутом повороту лопатей, починаючи з якого можливий генераторний режим роботи ВЕУ (точка А на рис. 2).

Для генерування потужності необхідно збільшувати φ_{\perp} . При $\varphi_{\perp} > -14^{\circ}$ частина аеродинамічної характеристики ВЕУ розміщується в межах допустимої області, що дозволяє генерувати активну потужність. Робочий діапазон обмежений двома точками перетину аеродинамічної характеристики з $\inf \bar{M}_p(z)$. Координати точок перетину $z_{\inf m}(\varphi_{\perp})$ і $z_{\inf M}(\varphi_{\perp})$ знаходяться за рівністю (10). Більшому значенню швидкості $z_{\inf m}(\varphi_{\perp})$ відповідає мінімальна робоча швидкість вітру $\inf v_p(\varphi_{\perp})$, а меншому $z_{\inf M}(\varphi_{\perp})$ — максимальна $\sup v_p(\varphi_{\perp})$. Межі діапазону робочих швидкостей вітру визначаються по (4)

$$\inf v_p(\varphi_{\perp}) = \frac{\omega_0 R}{k_M z_{\inf M}(\varphi_{\perp})} < v_p(\varphi_{\perp}) < \frac{\omega_0 R}{k_M z_{\inf m}(\varphi_{\perp})} = \sup v_p(\varphi_{\perp}),$$

де $v_p(\varphi_{\perp})$ — робоча швидкість вітру за вказаного кута повороту лопатей.

При $\varphi_{\perp} = -10^{\circ}$ і $z \approx 6,5$ аеродинамічна характеристика є дотичною до $\sup \bar{M}_p(z)$. У цій точці (точка В на рис. 2) ВЕУ генерує номінальну потужність. Подальше збільшення φ_{\perp} приводить до того, що за певних значень швидкості $\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp}) > \sup \bar{M}_p(z)$. Таким чином, за $\varphi_{\perp} > -10^{\circ}$ з діапазону робочих швидкостей вітру необхідно вилучити швидкості вітру, які призводять до перевантаження генератора. Діапазон "перевантаження" обмежується точками перетину аеродинамічної характеристики з $\sup \bar{M}_p(z)$. Координати точок перетину $z_{\inf m}(\varphi_{\perp})$ і $z_{\inf M}(\varphi_{\perp})$ знаходяться за рівністю (11). Межі діапазону "перевантаження" визначаються по (7)

$$\frac{\omega_0 (1-s_H) R}{k_M z_{\sup M}(\varphi_{\perp})} \leq v(\varphi_{\perp}) \leq \frac{\omega_0 (1-s_H) R}{k_M z_{\sup m}(\varphi_{\perp})}.$$

У цьому випадку генераторні режими роботи ВЕУ без перевантаження можливі тільки в діапазонах

$$\begin{aligned} \inf v_p(\varphi_{\perp}) &= \frac{\omega_0 R}{k_M z_{\inf M}(\varphi_{\perp})} \leq v_p(\varphi_{\perp}) \leq \\ &\leq \frac{\omega_0 (1-s_H) R}{k_M z_{\sup M}(\varphi_{\perp})} = \sup v_p(\varphi_{\perp}), \\ \inf v_p(\varphi_{\perp}) &= \frac{\omega_0 (1-s_H) R}{k_M z_{\sup m}(\varphi_{\perp})} \leq v_p(\varphi_{\perp}) \leq \\ &\leq \frac{\omega_0 R}{k_M z_{\inf m}(\varphi_{\perp})} = \sup v_p(\varphi_{\perp}). \end{aligned}$$

За флюгерного напрямку зміни кута повороту лопатей при $k_M = 31,5$ нормальна робота ВЕУ можлива тільки на лінійних ділянках аеродинамічних характеристик (рис. 1, а)

$$\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp}) = d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})z/dz + b_{\perp}(\varphi_{\perp}), \quad (12)$$

де $b_{\perp}(\varphi_{\perp})$ — числовий коефіцієнт, що залежить від кута повороту лопатей та конструктивних параметрів ротора.

На лінійній ділянці аеродинамічної характеристики для конкретного φ_{\perp} можна отримати аналітичні вирази для меж діапазону робочих швидкостей вітру. Прирівняємо апроксимаційний вираз аеродинамічної характеристики на лінійній ділянці (12) і рівняння (5) та (8)

$$A \cdot z_{\inf}^2(\varphi_{\perp}) - z_{\inf}(\varphi_{\perp}) \cdot d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})/dz - b_{\perp}(\varphi_{\perp}) = 0, \quad (13)$$

$$B \cdot z_{\sup}^2(\varphi_{\perp}) - z_{\sup}(\varphi_{\perp}) \cdot d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})/dz - b_{\perp}(\varphi_{\perp}) = 0. \quad (14)$$

Отримані квадратні рівняння вирішимо відносно $z_{\inf}(\varphi_{\perp})$ та $z_{\sup}(\varphi_{\perp})$

$$z_{\inf}(\varphi_{\perp}) = \frac{1}{2A} \left\{ \frac{d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})}{dz} + \left[\left(\frac{d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})}{dz} \right)^2 + 4Ab_{\perp}(\varphi_{\perp}) \right]^{0.5} \right\}, \quad (15)$$

$$z_{\sup}(\varphi_{\perp}) = \frac{1}{2B} \left\{ \frac{d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})}{dz} + \left[\left(\frac{d\bar{M}_p(z|\varphi_{\perp})}{dz} \right)^2 + 4Bb_{\perp}(\varphi_{\perp}) \right]^{0.5} \right\}. \quad (16)$$

З рівнянь (4) та (7) отримуюмо значення мінімальної та максимальної робочої швидкості вітру за даного кута повороту лопатей

$$\inf v_p(\varphi_{\perp}) = \omega_0 R / k_M z_{\inf}(\varphi_{\perp}). \quad (17)$$

$$\sup v_p(\varphi_{\perp}) = \frac{\omega_0 R (1 - s_{II})}{k_M} \frac{1}{z_{\sup}(\varphi_{\perp})}. \quad (18)$$

Залежність діапазону робочих швидкостей вітру ВЕУ-220 кута повороту лопатей наведена на рис. 2.

Дані на рис. 2, а показують, що генераторний режим ВЕУ при $k_M = 31,5$ можливий починаючи зі швидкості вітру 5,3 м/с на кутах $\varphi_{\perp} = 0^{\circ} \dots 1^{\circ}$. На менших швидкостях вітру установка не генерує електричної енергії. Максимальна робоча швидкість вітру на цих кутах складе 10,6 м/с. Вітри більші за 10,6 м/с викликають перевантаження ге-

нератора. Відхилення кута повороту лопатей від $\varphi_{\perp} = 0^{\circ} \dots 1^{\circ}$ як за флюгерного, так і антифлюгерного напрямків призводить до зміщення меж робочого діапазону в бік більших швидкостей вітру. Так при $\varphi_{\perp} = 10^{\circ}$ нормальний генераторний режим можливий при $10,4 \text{ м/с} \leq v_p(10^{\circ}) \leq 15,0 \text{ м/с}$. Максимальний діапазон робочих швидкостей вітру має місце при $\varphi_{\perp} = -10^{\circ}$ і обмежений швидкостями вітру $8,7 \text{ м/с} \leq v_p(-10^{\circ}) \leq 19,0 \text{ м/с}$.

Збільшення передавального числа мультиплікатора до $k_M = 50$ дозволяє генерувати активну енергію в ширшому діапазоні швидкостей вітру (рис. 2, б). На оптимальних кутах ($\varphi_{\perp} = 0^{\circ} \dots 1^{\circ}$) ВЕУ генерує потужність в діапазоні $3,5 \text{ м/с} \leq v_p(0^{\circ} \dots 1^{\circ}) \leq 30,0 \text{ м/с}$. При цьому аеродинамічна характеристика не перевищує $\sup \bar{M}_p(z)$, проходячи при великих швидкостях вітру близько від неї (рис.

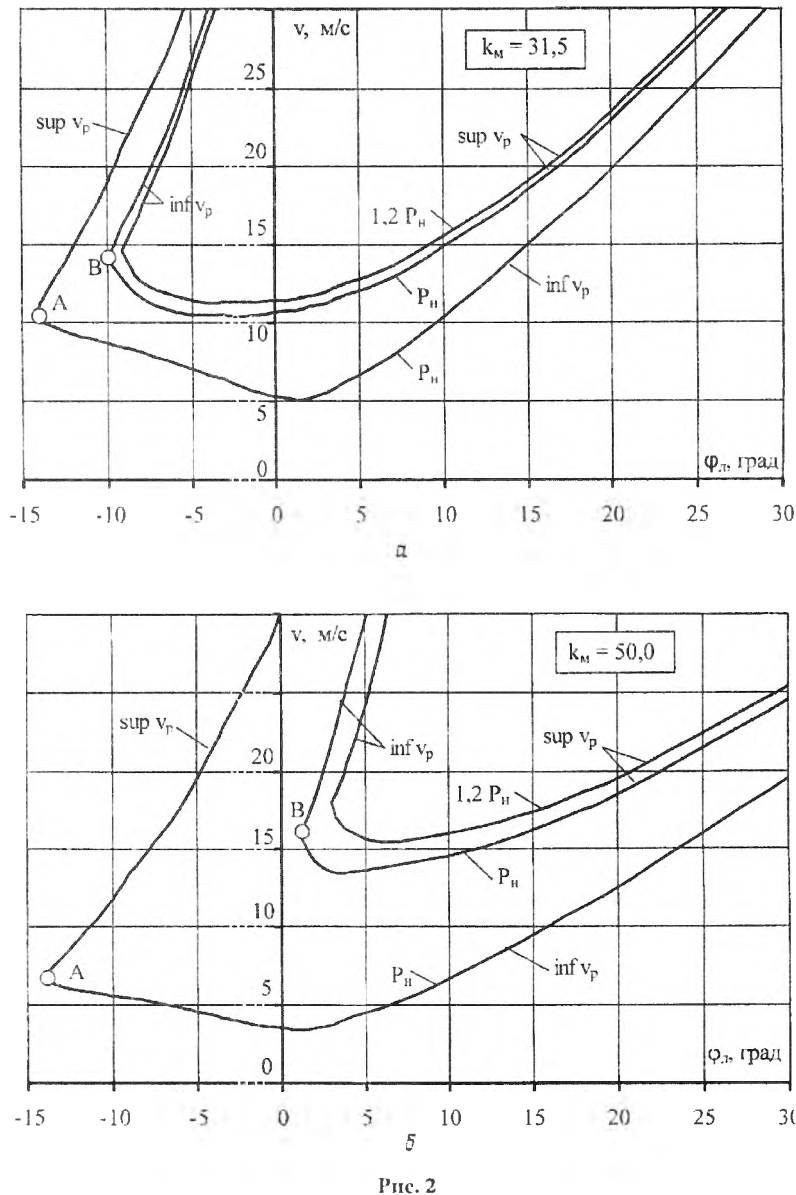


Рис. 2

1). Це означає, що на великих вітрах потужність ВЕУ не перевищує номінальну. Таким чином, при $k_M=50$, $\varphi_L=0^0 \dots 1^0$ відбувається аеродинамічна стабілізація потужності і робота ВЕУ не потребує зміни оптимальних кутів у межах всього діапазону робочих швидкостей вітру.

Висновки. 1. Область зміни відносного аеродинамічного моменту ротора ВЕУ з асинхронними та синхронними генераторами, яка відповідає генераторному режиму роботи і в межах якої не виникає перевантаження електричних машин, обмежується двома параболою $\inf \bar{M}_p(z)$ та $\sup \bar{M}_p(z)$. Характер кривих залежить від геометричних розмірів ротора, параметрів генератора та трансмісії. Раціональний вибір передавального числа мультиплікатора та номінальної потужності генератора може забезпечити на великих вітрах аеродинамічну стабілізацію потужності ВЕУ. Це виключає необхідність регулювання кута повороту лопатей у межах всього діапазону швидкостей вітру.

2. Ширина та положення діапазону робочих швидкостей вітру залежить від кута повороту лопатей. Відхилення кута від оптимального як за флюгерного, так і антифлюгерного напрямків викликає зміщення меж робочого діапазону у бік більших швидкостей вітру. Максимальний діапазон робочих швидкостей вітру має місце за кута повороту лопатей, при якому аеродинамічна характеристика ротора є дотичною до верхньої межі $\sup \bar{M}_p(z)$.

3. За антифлюгерного напрямку зміни кута повороту лопатей існує граничний кут, менше яко-

го ВЕУ не може працювати в генераторному режимі за будь-яких швидкостей вітру. Наявність та величина граничного кута визначається характером залежності аеродинамічних характеристик ротора ВЕУ від кута повороту лопатей.

1. Брыль А.А., Валенко В.И., Денисенко О.Г. и др. Экспериментальное определение энергетических характеристик ветроэлектрической установки с вертолетными лопастями // Об.: Преобразование и стабилизация параметров электроэнергии. — Киев: Наук.думка, 1990. — С. 110—114.

2. Бызова Н.Л., Волковицкая З.И., Мазурин Н.Ф. и др. Статистические характеристики скорости ветра применительно к ветровым нагрузкам / Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1983. — 52 с.

3. Васцько П.Ф., Пекур П.П. Електромеханічна стала часу вітроелектричних установок з асинхронними генераторами в навантажувальних режимах роботи // Відновлювана енергетика. — 2006. — № 2. — С. 49—55.

4. Пекур П.П. Стохастичне моделювання динаміки повітряного потоку в приземному шарі атмосфери за довільної функції розподілу швидкості вітру // Відновлювана енергетика. — 2005. — № 3-4. — С. 29—33.

5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под общ. ред. И.П.Копытова и Б.К.Клюкова. — Т. 1. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 456 с.

6. Фатеев Е.М. Ветродвиатели и ветроустановки. — М.: Сельхозиздат, 1957. — 536 с.

7. ГОСТ 28173-89 Э. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и рабочие характеристики. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 72 с.

Надійшла 20.02.2007

УДК 681.5:666.3/.7

О.С.Бенга, докт.техн.наук, Т.В.Бабенко, канд.техн.наук (НУ, Дніпропетровськ)

Система підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності для об'єктів технологічного комплексу

Наведено результати теоретичних і практичних досліджень щодо синтезу інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень на нейромережевому базисі для вирішення задач керування технологічними процесами керамічної промисловості.

Приведены результаты теоретических и практических исследований по синтезу интеллектуальных систем поддержки принятия решений на нейросетевом базисе для управления объектами керамической промышленности.

Одним з перспективних напрямків досліджень, що дозволяє суттєво підвищити ефективність виробничих процесів, є створення комплексних

систем автоматизованого керування технологічними процесами з інтегрованими інтелектуальними системами підтримки прийняття рішень

© Бенга О.С., Бабенко Т.В., 2007