

УДК 621.548:621.311.24

П.П.Пекур, канд.техн.наук (Національний технічний університет України "КПІ", Київ)

Імовірнісні характеристики потужності вітроелектричної установки

Розроблено стохастичну модель потужності ВЕУ, що дозволяє за імовірнісними характеристиками швидкості вітру визначити імовірнісні характеристики потужності ВЕУ. Модель враховує неоднозначність та немонотонність функціональної залежності потужності ВЕУ від швидкості вітру. Імовірнісні характеристики потужності дозволяють встановити режим роботи електричної машини та його тривалість.

Ключові слова: вітроелектрична установка, імовірнісні характеристики, стохастична модель, потужність, швидкість вітру.

Разработана стохастическая модель мощности ВЭУ, которая позволяет по вероятностным характеристикам скорости ветра определить вероятностные характеристики мощности ВЭУ. Модель учитывает неоднозначность и немонотонность функциональной зависимости мощности ВЭУ от скорости ветра. Вероятностные характеристики мощности позволяют установить режим работы электрической машины и его продолжительность.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, вероятностные характеристики, стохастическая модель, мощность, скорость ветра.

Розвиток вітроенергетики в останні десятиліття спрямований на всебічне та ефективно використання вітру як енергетичного ресурсу. Технічне удосконалення вітроелектричних установок (ВЕУ) і підвищення ефективності їх використання вимагає на етапі проектування достатньо повного врахування реальних умов роботи. Експериментальні дослідження ВЕУ показали, що значні зміни механічних та електричних навантажень на елементи конструкції є об'єктивними факторами їх роботи, які повинні враховуватись при створенні сучасних машин. Одним із резервів підвищення ресурсу ВЕУ за одночасного зниження матеріалоемності установок є підвищення обґрунтованості розрахункових навантажень електромеханічної системи з урахуванням їх змін.

Процес електромеханічного перетворення енергії повітряного потоку завжди супроводжується неминучими втратами частини цієї енергії у самому генераторі. Енергія втрат виділяється у вигляді тепла. Втрати і характер їх розподілу в об'ємі машини формують її температурне поле. Збільшення швидкості вітру і його пориви приводять до збільшення потужності ВЕУ, що генерується в електричну мережу. Це, в свою чергу, викликає збільшення втрат і підвищення температури генератора. Оскільки матеріали, що вико-

ристовуються при виготовленні електричних машин, мають визначену стійкість до нагрівання, то за будь-яких режимів роботи генератора температура його частин не повинна перевищувати деякого гранично допустимого значення. Нагрів електричної машини звичайно обмежується допустимою температурою ізоляційних матеріалів. У даний час в електричних машинах використовуються ізоляційні матеріали класів нагрівостійкості Е, В і F, які зберігають свої робочі властивості при температурах до 120-155°C [1, 2]. Додатковий перегрів при перевантаженнях генератора приводить до прискореного старіння ізоляції і скорочує строк її служби.

Викладені міркування визначають важливе обмеження, що накладається на процес електромеханічного перетворення енергії вітру: це обмеження щодо нагріву генератора ВЕУ. Щоб уникнути підвищення температури вище допустимої, при всіх швидкостях вітру потужність не повинна тривалий час бути вище номінальної. Виконання цього обмеження покладено на систему керування ВЕУ і забезпечується зміною кута повороту лопатей ротора.

Нагрів частин електричної машини та допустиме перевантаження можуть бути визначені розрахунковим шляхом при проектуванні ВЕУ

або експериментально при випробуваннях [2]. Нагрів генератора визначається режимом його роботи і залежить від співвідношення тривалості періодів роботи з повним і частковим навантаженням, від частоти, величини і тривалості перевантаження. Адекватний математичний опис електричного навантаження та теплового стану машини може бути виконаний лише методами математичної статистики та теорії випадкових функцій. На стадії проектування імовірнісний підхід видається єдиним можливим для оцінки величини електричного навантаження, а також для вирішення режимних і оптимізаційних задач. На даний час відсутні теоретичні дослідження, що дозволяли б обґрунтовано вибирати параметри електромеханічної системи ВЕУ з урахуванням імовірнісного характеру її навантаження, а тим більше інженерні рекомендації з цих питань.

У даній статті розроблено стохастичну модель потужності ВЕУ, що дозволяє за імовірнісними характеристиками швидкості вітру визначити імовірнісні характеристики потужності ВЕУ. Імовірнісні характеристики потужності дозволяють встановити режим роботи електричної машини та його тривалість.

Коректне визначення імовірнісних характеристик вихідних параметрів (обертів, моменту, потужності, струму і т.п.) ВЕУ можливе методом статистичних випробувань [3]. Обертальний рух ротора ВЕУ в навантажувальному режимі роботи описується рівнянням [4]:

$$J \frac{d\omega_p}{dt} = 0,5\pi\rho R^3 v(t)^2 \bar{M}_p [z(t)|\varphi_L] - \frac{(1+a_n)P_n}{\omega_{po}^2 s_n (1-s_n)} (\omega_{po} - \omega_p) - M_{cn}, \quad (1)$$

$$\varphi_L = \text{const},$$

де J – сумарний момент інерції, приведений до вала ротора ВЕУ, кг·м²; ω_p, ω_{po} – поточна та синхронна кутові швидкості обертання ротора ВЕУ, с⁻¹; ρ – питома густина повітря, кг/м³; R – радіус ротора ВЕУ, м; $v(t)$ – поточне значення швидкості вітру, м/с; $\bar{M}_p [z(t)|\varphi_L]$ – відносна аеродинамічна характеристика обертального моменту

ротора за фіксованого значення кута повороту лопатей; $z(t)$ – поточне значення швидкохідності ротора, в.о.; φ_L – кут повороту лопатей ротора ВЕУ відносно площини обертання, град.; a_n – коефіцієнт, що враховує збільшення моменту опору від втрат, обумовлених навантаженням ВЕУ, в.о.; P_n – номінальна потужність генератора, Вт; s_n – номінальне ковзання генератора, в.о.; M_{cn} – момент сил опору в трансмісії та генераторі на холостому ходу, Н·м.

Результатом числового розв'язку рівняння (1) є залежність кутової швидкості обертання ротора від часу $\omega_p(t)$, що в свою чергу визначає ковзання асинхронної машини:

$$s(t) = \frac{\omega_{po} - \omega_p(t)}{\omega_{po}}.$$

Часові зміни ковзання дозволяють визначити часові зміни струму, моменту та потужності генератора. У відповідності з Г-подібною схемою заміщення асинхронної машини [5], маємо:

$$I_2''(t) = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1' + \frac{r_2''}{s(t)}\right)^2 + (x_1' + x_2'')^2}};$$

$$M_z(t) = \frac{3 I_2''(t)^2 r_2''}{\omega_{po} s(t)} = \frac{P_{em}(t)}{\omega_{po}};$$

$$P_{em}(t) = 3 I_2''(t)^2 \frac{r_2''}{s(t)};$$

де I_2'' – струм у роторному колі, приведений до обмотки статора генератора, А; U_1 – напруга на затискачах генератора, В; r_1', x_1' – активний та індуктивний опір розсіяння обмотки статора, Ом; r_2'', x_2'' – активний та індуктивний опір розсіяння обмотки ротора, приведені до статорної обмотки, Ом; $M_z(t)$ – поточне значення електромагнітного моменту, приведеного до вала ротора ВЕУ, Н·м; $P_{em}(t)$ – поточне значення електромагнітної потужності, Вт.

Від'ємний знак $P_{em}(t)$ та $M_z(t)$ вказує на те, що механічна потужність ротора ВЕУ перетворюється в електричну і віддається в розподільну мережу. Генерована потужність менше електромагнітної на величину електричних втрат у статорі (втрати в міді статора) $P_m(t)$:

$$P_z(t) = P_{em}(t) - P_m(t) \cdot \text{sign } s(t) =$$

$$= 3I_2''(t)^2 \left[\frac{r_2''}{s(t)} - r_1' \cdot \text{sign } s(t) \right],$$

$$\text{sign } s(t) = \begin{cases} -1 & \text{при } s(t) \geq 0, \\ 1 & \text{при } s(t) < 0, \end{cases}$$

де $\text{sign } s(t)$ – сигнальна функція.

Статистична обробка необхідної кількості реалізацій $I_2''(t)$, $M_z(t)$, $P_z(t)$ дозволяє отримати їх імовірнісні характеристики.

На етапі проектування ВЕУ з асинхронними генераторами можна отримати наближені оцінки імовірнісних характеристик, якщо знехтувати незначними змінами кутової швидкості обертання ротора ВЕУ [4] і вважати, що зміни потужності генератора обумовлені лише змінами моменту ротора ВЕУ за сталого значення $\omega_p = \omega_{pn} = \text{const}$. У цьому випадку можна знехтувати похідною в часі в (1) і момент генератора, що відповідає генерованій потужності ВЕУ, визначити з рівності:

$$M_z(t | \omega_{pn}) = \frac{1}{1 + a_n} \{ M_p[v(t), \omega_{pn}, \varphi_l] - M_{cn} \} =$$

$$= \frac{1}{1 + a_n} \{ 0,5\pi\rho R^3 v(t)^2 \bar{M}_p[z(t) | \varphi_l] - M_{cn} \}, \quad (2)$$

а величину генерованої потужності із співвідношення:

$$P_z(t | \omega_{pn}) = M_z(t | \omega_{pn}) \cdot \omega_{pn} =$$

$$= \frac{\omega_{pn}}{1 + a_n} \{ 0,5\pi\rho R^3 v(t)^2 \bar{M}_p[z(t) | \varphi_l] - M_{cn} \}. \quad (3)$$

В (2) та (3) втрати холостого ходу враховуються постійним моментом опору M_{cn} . Змінні втрати в трансмісії та обмотках генератора, що залежать від навантаження ВЕУ, враховуються коефіцієнтом a_n [4].

За приклад, залежність P_z від швидкості вітру за сталого значення ω_{pn} і фіксованих значень φ_l для ВЕУ-220 наведено на рис. 1.

Вказані залежності є неперервними, неоднозначними і немонотонними функціями. Тобто,

одному значенню потужності P_{zv} може відповідати декілька значень швидкості вітру (v_{p1} , v_{p2} на рис. 2б). Кількість значень v_{pi} визначається кількістю монотонних ділянок функції $P_z = f(v)$, які перетинає пряма $P_{zv} = \text{const}$.

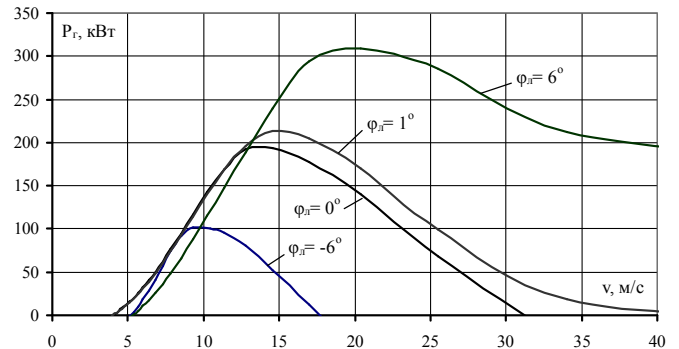
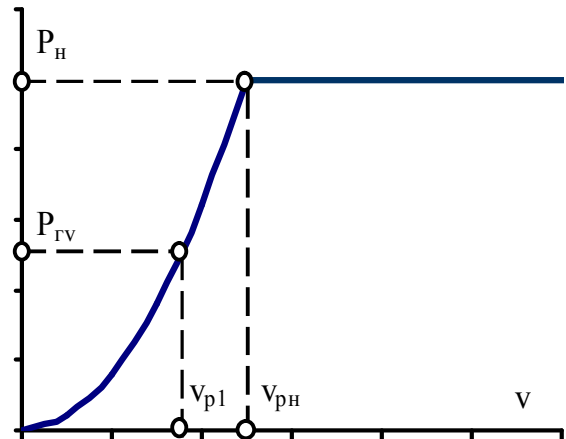
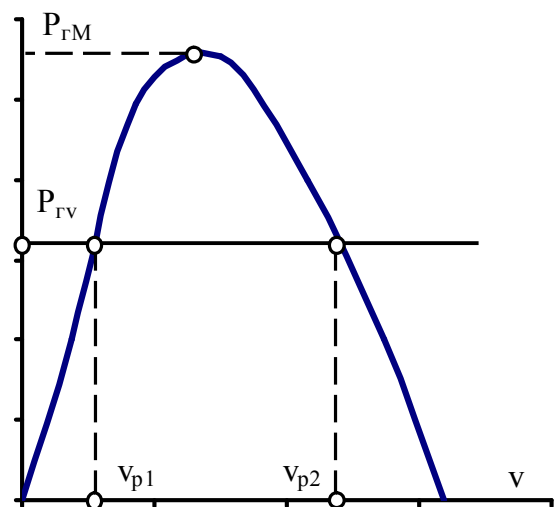


Рис. 1. Енергетичні характеристики вітроелектричної установки.



а)



б)

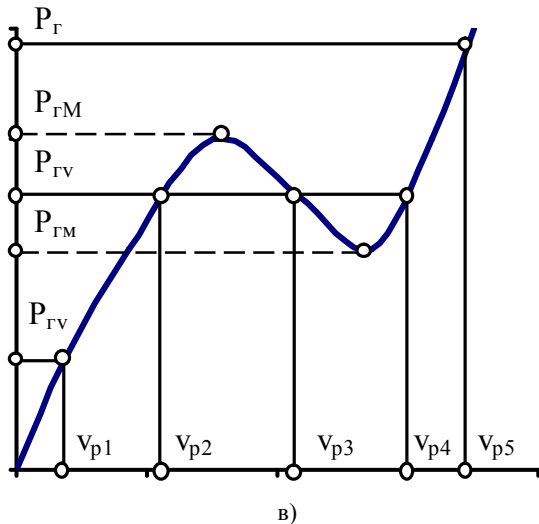


Рис. 2. Неоднозначність залежності потужності вітроелектричної установки від швидкості вітру.

За такого перетворення вираз для безпосереднього визначення функції розподілу потужності $F(p_z|m_v)$ по функції розподілу швидкості вітру $F(v|m_v)$ [6] залежить від способу регулювання потужності ВЕУ. Характер кривої $P_z = f(v)$ при регулюванні потужності шляхом зміни кута повороту лопатей наведено на рис. 2а, а при регулюванні шляхом зриву потоку на лопатях – на рис. 2б, 2в.

Якщо залежність $P_z = f(v)$ відповідає рис. 2а, то $F(p_{zv} | m_v) = W(P_z \leq p_{zv}) =$

$$= \begin{cases} W(V \leq v_{p1}) = F(v_{p1} | m_v) & \text{при } p_{zv} < P_n \\ 1 & \text{при } p_{zv} \geq P_n. \end{cases}$$

де $W(\dots)$ – імовірність вказаної в дужках нерівності.

За регулювання потужності шляхом зриву потоку на лопатях при залежності $P_z = f(v)$, що відповідає рис. 2б, маємо:

$$F(p_{zv} | m_v) = W(P_z \leq p_{zv}) =$$

$$= \begin{cases} W(V \leq v_{p1}) + W(V > v_{p2}) = \\ = 1 + F(v_{p1} | m_v) - F(v_{p2} | m_v) & \text{при } p_{zv} < p_{zM} \\ 1 & \text{при } p_{zv} \geq p_{zM}. \end{cases} \quad (4)$$

Якщо функція $P_z = f(v)$ має характер, наведений на рис. 2в, то в залежності від величини p_{zv}

$$F(p_{zv} | m_v) = W(P_z \leq p_{zv}) =$$

$$= \begin{cases} W(V \leq v_{p1}) = F(v_{p1} | m_v) & \text{при } p_{zv} < p_{zM} \\ W(V \leq v_{p2}) + W(v_{p3} \leq V < v_{p4}) = \\ = F(v_{p2} | m_v) + F(v_{p4} | m_v) - F(v_{p3} | m_v) & \text{при } p_{zM} < p_{zv} < p_{zM} \\ W(V < v_{p5}) = F(v_{p5} | m_v) & \text{при } p_{zv} \geq p_{zM}. \end{cases}$$

За будь-якого іншого характеру залежності $P_z = f(v)$ можна міркувати аналогічно.

Значення p_{zv} і v_{pi} пов'язані нелінійною залежністю (3) і розраховуються числовими методами за рівністю:

$$p_{zv} = \frac{\omega_{pu}}{1 + a_n} \left\{ 0,5\pi\rho R^3 v_{pi}^2 Sp[\bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_n)] - M_{ch} \right\}, \quad (5)$$

$$z_{pi} = \frac{R\omega_o(1 - s_n)}{k_m v_{pi}},$$

де $Sp[\bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_n)]$ – кубічний сплайн відносної аеродинамічної характеристики моменту ротора ВЕУ за вказаного кута повороту лопатей φ_n .

Умовну щільність імовірності потужності ВЕУ $f(p_{zv}|m_v)$ визначимо числовим методом за відомою щільністю імовірності швидкості вітру $f(v_{pi}|m_v)$ [6] за допомогою методу порівняння елементів імовірності [7]. Оскільки залежність $P_z = f(v)$ у загальному випадку є неоднозначною, то одному елементу імовірності потужності $f(p_{zv}|m_v) dp_{zv}$ може відповідати декілька елементів імовірності швидкості вітру $f(v_{pi}|m_v) dv_{pi}$ (рис. 3). У цьому випадку $f(p_{zv}|m_v) dp_{zv}$ дорівнює сумі всіх елементів імовірності $f(v_{pi}|m_v) dv_{pi}$ [7]:

$$f(p_{zv} | m_v) dp_{zv} = \sum_{i=1}^n f(v_{pi} | m_v) dv_{pi}, \quad (6)$$

де n – кількість елементів імовірності швидкості вітру.

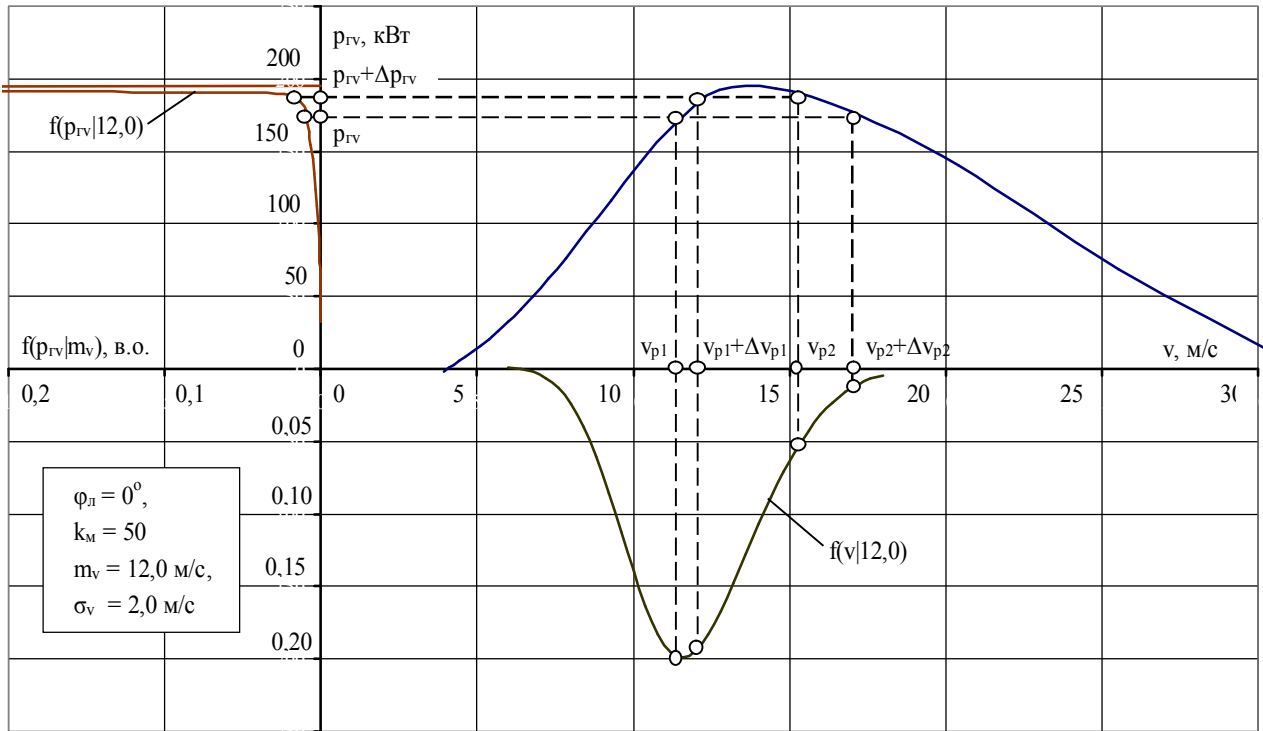


Рис. 3. Нелінійний взаємозв'язок елементів імовірності потужності та швидкості вітру.

З рівності (6) знаходиться шуканий зв'язок між щільністями імовірностей швидкості вітру та потужності ВЕУ:

$$f(p_{cv} | m_v) = \sum_{i=1}^n f(v_{pi} | m_v) \left| \frac{dv_{pi}}{dp_{cv}} \right| = \sum_{i=1}^n f(v_{pi} | m_v) \left| \frac{1}{dp_{cv}/dv_{pi}} \right|. \quad (7)$$

За припущення, що зміни потужності генератора обумовлені лише змінами моменту ротора ВЕУ, похідну dp_{cv}/dv_{pi} отримаємо з рівності (3):

$$\begin{aligned} \frac{dp_{cv}}{dv_{pi}} &= \frac{\omega_{po}}{1+a_n} \frac{d}{dv_{pi}} \left[0,5\pi\rho R^3 v_{pi}^2 \bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l) - M_{ch} \right] = \\ &= \frac{\pi\rho R^3 \omega_{po}}{2(1+a_n)} \left[2v_{pi} \bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l) - \frac{R\omega_o(1-s_n)}{k_M} \frac{d\bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l)}{dz_{pi}} \right]. \end{aligned}$$

Таким чином, з урахуванням (5) та (7) щільність імовірності потужності ВЕУ $f(p_{cv}|m_v)$ задається системою параметричних рівнянь:

$$\begin{cases} f(p_{cv} | m_v) = \sum_{i=1}^n \frac{2(1+a_n) f(v_{pi} | m_v)}{\left| \pi \rho R^3 \omega_{po} \left[2v_{pi} \bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l) - \frac{R\omega_o(1-s_n)}{k_M} \frac{d\bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l)}{dz_{pi}} \right] \right|}, \\ p_{cv} = \frac{\omega_{pn}}{1+a_n} \left[0,5\pi \rho R^3 v_{pi}^2 \bar{M}_p(z_{pi} | \varphi_l) - M_{ch} \right], \\ z_{pi} = \frac{R\omega_o(1-s_n)}{k_M v_{pi}}. \end{cases} \quad (8)$$

Імовірнісні характеристики потужності ВЕУ-220, розраховані за (4) та (8) для вказаних на рис. 4 розподілів швидкостей вітру, наведені на рис. 5 та 6.

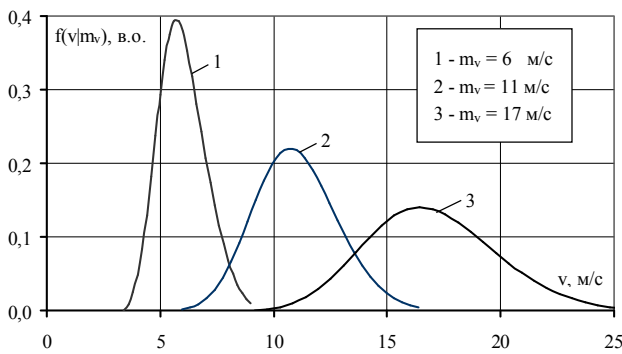


Рис. 4. Щільність імовірності розподілу швидкості вітру.

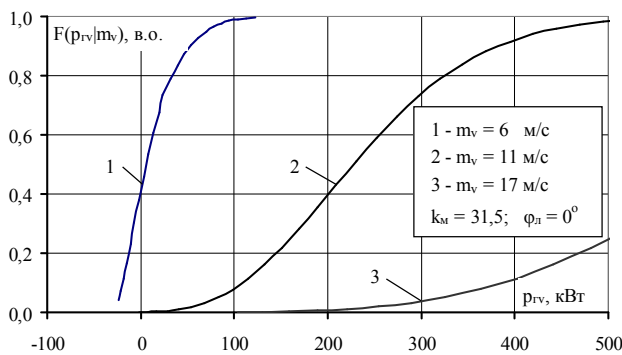
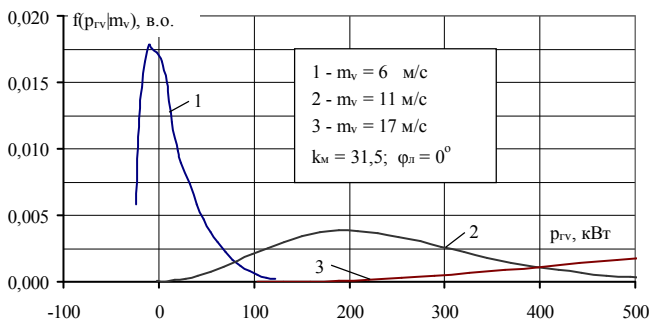


Рис. 5. Щільність імовірності $f(p_{mv}|m_v)$ та функція розподілу $F(p_{mv}|m_v)$ потужності ВЕУ-220 за передавального числа мультиплікатора $k_M = 31,5$.

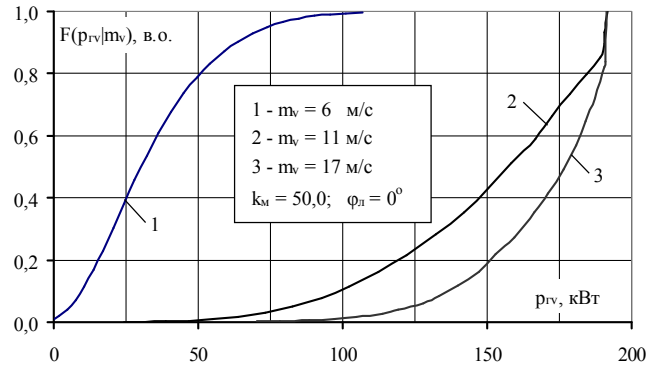
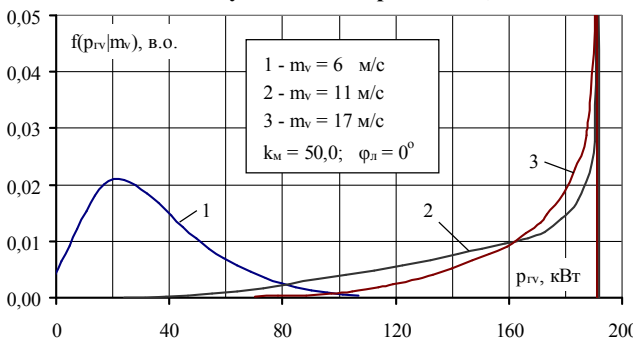


Рис. 6. Щільність імовірності $f(p_{mv}|m_v)$ та функція розподілу $F(p_{mv}|m_v)$ потужності ВЕУ-220 за передавального числа мультиплікатора $k_M = 50,0$.

Результати розрахунків при передавальному числі мультиплікатора $k_M = 31,5$ показують, що за середньої швидкості вітру 6 м/с ВЕУ-220 на оптимальному куті повороту лопатей $\varphi_l = 0^\circ$ майже 40% часу працює в режимі двигуна, споживаючи електроенергію з мережі. Максимальна потужність практично не перевищує 110 кВт. За номінальної швидкості вітру 11 м/с асинхронна машина не переходить працювати в режим двигуна, проте імовірність її перевантаження складає 53%, а максимальна потужність у 2,5 рази може перевищувати номінальне значення. Подальше збільшення середньої швидкості вітру виключає можливість роботи ВЕУ-220 на оптимальному куті повороту лопатей через перевантаження генератора.

Зміна передавального числа мультиплікатора з 31,5 на 50,0 поліпшує режим роботи ВЕУ. За середньої швидкості вітру 6 м/с генератор менше 2% часу працює в режимі двигуна, а максимальна потужність не змінюється. За швидкостей вітру 11 м/с і 17 м/с спостерігається аеродинамічна стабілізація потужності на рівні 191 кВт.

Зменшити перевантаження генератора можна регулюванням кута повороту лопатей. На рис. 7 наведено імовірнісні характеристики потужності ВЕУ-220 за $\varphi_l = 6^\circ$. На цьому куті за $k_M = 50$ і швидкості вітру 11 м/с потужність ВЕУ змінюється від 0 до 275 кВт. Проте, враховуючи, що щільність імовірності потужності в діапазоні 220÷275 кВт незначна, то можна очікувати, що температурне поле машини не перевищить гранично допустимого значення. Аеродинамічна стабілізація потужності за $\varphi_l = 6^\circ$ відсутня. За $\varphi_l = 6^\circ$ і $k_M = 31,5$ навіть при номінальній середній швидко-

сті вітру 11 м/с асинхронна машина 2% часу працюватиме в режимі двигуна.

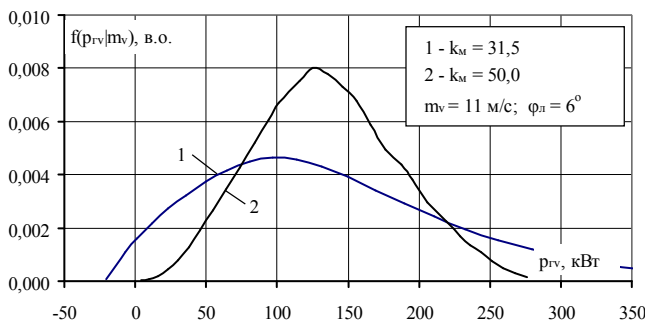


Рис. 7. Щільність імовірності $f(p_{gv}|m_v)$ потужності ВЕУ-220 за кута повороту лопатей $\phi_n = 6^\circ$.

Імовірність перевантаження асинхронної машини або її роботи в режимі двигуна за даного розподілу швидкості вітру визначається за умовною одновимірною функцією розподілу $F(p_{gv}|m_v)$ або щільністю імовірності $f(p_{gv}|m_v)$ потужності ВЕУ:

$$W(P_z \leq 0) = F(0|m_v) = \int_{-\infty}^0 f(p_{gv} | m_v) dp_{gv},$$

$$W(P_z > P_n) = 1 - F(P_n|m_v) = 1 - \int_{-\infty}^{P_n} f(p_{gv} | m_v) dp_{gv},$$

де $W(P_z \leq 0)$ – імовірність роботи асинхронної машини в режимі двигуна; $W(P_z > P_n)$ – імовірність перевантаження асинхронної машини.

Абсолютний час роботи асинхронної машини за межами нормального навантажувального режиму на інтервалі спостереження T (розрахунковому інтервалі) складає:

$$T_0(P_z \leq 0) = T \cdot W(P_z \leq 0) = T \cdot F(0|m_v),$$

$$T_n(P_z > P_n) = T \cdot W(P_z > P_n) = T \cdot [1 - F(p_n|m_v)],$$

де $T_0(P_z \leq 0)$ – тривалість роботи асинхронної

машини в режимі двигуна на інтервалі спостереження T ; $T_n(P_z > P_n)$ – тривалість роботи асинхронної машини з перевантаженням на інтервалі спостереження T .

Висновки. Розроблено стохастичну модель потужності ВЕУ, що дозволяє за імовірнісними характеристиками швидкості вітру визначити імовірнісні характеристики потужності ВЕУ. Модель враховує неоднозначність та немонотонність функціональної залежності потужності ВЕУ від швидкості вітру. Імовірнісні характеристики потужності дозволяють встановити режим роботи електричної машини та його тривалість. Отримані імовірнісні характеристики вказують на необхідність оптимізації як параметрів ЕМС ВЕУ, так і законів її регулювання під вітрові умови в місці розташування ВЕУ для досягнення максимальної ефективності електромеханічного процесу перетворення енергії вітру.

1. Гайдукевич В.И., Титов В.С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 160 с.
2. Захаренко А.Б. Исследование теплового режима ветрогенератора // Электричество. – 2006. – №4. – С. 61–64.
3. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
4. Васько П.Ф., Пекур П.П. Електромеханічна стала часу вітроелектричних установок з асинхронними генераторами в навантажувальних режимах роботи // Відновлювана енергетика. – 2006. – №2. – С. 49–55.
5. Кривцов В.С. Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия: ветроэлектростанции. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2003. – 400 с.
6. Пекур П.П. Аналітичне зображення щільності ймовірності та функції розподілу швидкості вітру // Відновлювана енергетика. – 2005. – № 2. – С. 53–58.
7. Пугачёв В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 2002. – 496 с.