

УДК 621.311.24

АНДРІЄНКО П.Д.⁽¹⁾, АЛЕКСІЄВСЬКИЙ Д.Г.⁽²⁾,
ПАНКОВА О.О.⁽²⁾

(1) Запорізький національний технічний університет,

(2) Запорізька державна інженерна академія

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ МАТРИЦІ ЛАНКИ АЕРОДИНАМІЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕУ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ

Мета. Визначення передавальної матриці ланки аеромеханічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Методика. У процесі розробки методики визначення передавальної матриці була проведена процедура лінеаризації вихідної нелінійної моделі ланки аеродинамічного перетворення. Також використано математичний апарат розв'язання систем трансцендентних рівнянь. В основі методики лежить узагальнена модель ланки аеродинамічного перетворення електромеханічної системи вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням.

Результати. Розроблено методику визначення передавальної матриці ланки аеродинамічного перетворення для ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням. Розроблено методику розрахунку параметрів передавальної матриці.

Наукова новизна. Вперше на основі узагальненої моделі запропоновано методику визначення передавальної матриці ланки аеродинамічного перетворення електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Практична значимість. Дана методика може бути використана як складова у процедурі синтезу оптимальних регуляторів для електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Ключові слова: вітроенергетична установка, вітротурбіна, математична модель, передавальна матриця, аеродинамічне мультиплікування.

Вступ. Схема з аеродинамічним мультиплікуванням дозволяє позбутися механічного мультиплікатора ВЕУ. Збільшення кутової швидкості на валу генератора досягається за рахунок того, що швидкість вторинного повітряного потоку значно перевищує швидкість вітру.

Аналізу поведінки електрогенеруючої системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням у останній час було присвячено значну кількість опублікованих робіт [1-7]. У роботах [1, 5, 6] було досліджено статичні режими при постійному значенні кутової швидкості на валу генератора і на валу первинної вітротурбіни. Результати досліджень були отримані шляхом аналізу статичних характеристик, а також сталих режимів нелінійної моделі динаміки електрогенеруючої системи ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням. Вони, в основному, стосуються розв'язання проблем ефективності роботи ВЕУ. Динамічним властивостям електромеханічної системи з аеродинамічним мультиплікуванням були присвячені роботи [2, 3, 4, 7] та інші публікації цих же авторів.

Зокрема, в роботі [7] було розглянуто питання визначення передавальної функції ланки аеродинамічного мультиплікування, було отримано вираз для передавальної функції та запропонована методика визначення її коефіцієнтів. При побудові вихідної моделі було прийнято припущення про ідентичність параметрів і поведінки всіх трьох вторинних аеромеханічних підсистем. Таке припущення дозволило отримати адекватний інструмент для

аналізу основних процесів в цій системі при досить компактній формі запису результатів. Однак, при проектуванні системи управління даної БЕУ, існує ряд питань, які не можуть бути вирішені з використанням отриманої передавальної функції і вимагають виходу за рамки прийнятих припущень. Зокрема це стосується аналізу процесів взаємодії вторинних підсистем між собою. У цьому випадку всі вторинні підсистеми повинні розглядатися окремо. При цьому система має декілька входів і декілька виходів. А її математичний опис являє собою передавальну матрицю. Її визначенню і присвячена дана робота.

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення, в результаті аналітичного дослідження, передавальної матриці ланки аеромеханічного перетворення електромеханічної системи БЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням.

Передавальна матриця ланки аеродинамічного перетворення необхідна для процедури синтезу системи управління електромеханічною системою БЕУ методами теорії автоматичного керування [11]. В даному випадку ланка аеродинамічного перетворення виступає в якості складової частини об'єкта управління.

Результати дослідження. Модель ланки аеродинамічного перетворення. При побудові вихідної моделі ланки аеродинамічного мультиплікування були прийняті наступні припущення.

1. Моменти механічних втрат включені в механічні характеристики вітротурбін.
2. В даному наближенні всі обертові підсистеми вважаються жорсткими.

На рисунку 1 зображена блок-схема підсистеми аеромеханічного перетворення. Вона містить структурні елементи, які визначають її нелінійність: механічна характеристика первинної вітротурбіни (NB1.0), механічні характеристики вторинних вітротурбін (NB2.1, NB2.2, NB2.3), операції множення (NB3.1, NB3.2, NB3.3), операція ділення (NB4.0).

На рисунку 2 представлена лінеаризована модель підсистеми. Для виконання умови гомогенності [8] система розглядається в координатах приросту відповідних змінних. Після лінеаризації нелінійний елемент було описано рівнянням поверхні, що проходить через початок координат, типу:

$$y(x_1, x_2) = a_1 x_1 + a_2 x_2. \quad (1)$$

Отримана таким чином, блок-схема наведена на рисунку 2.

Визначення координат робочої точки. Першим етапом розрахунку коефіцієнтів моделі є визначення координат робочої точки. Значення змінних в робочій точці відповідають сталому режиму. Він характеризується нульовими значеннями входів інтеграторів (див. рис.1).

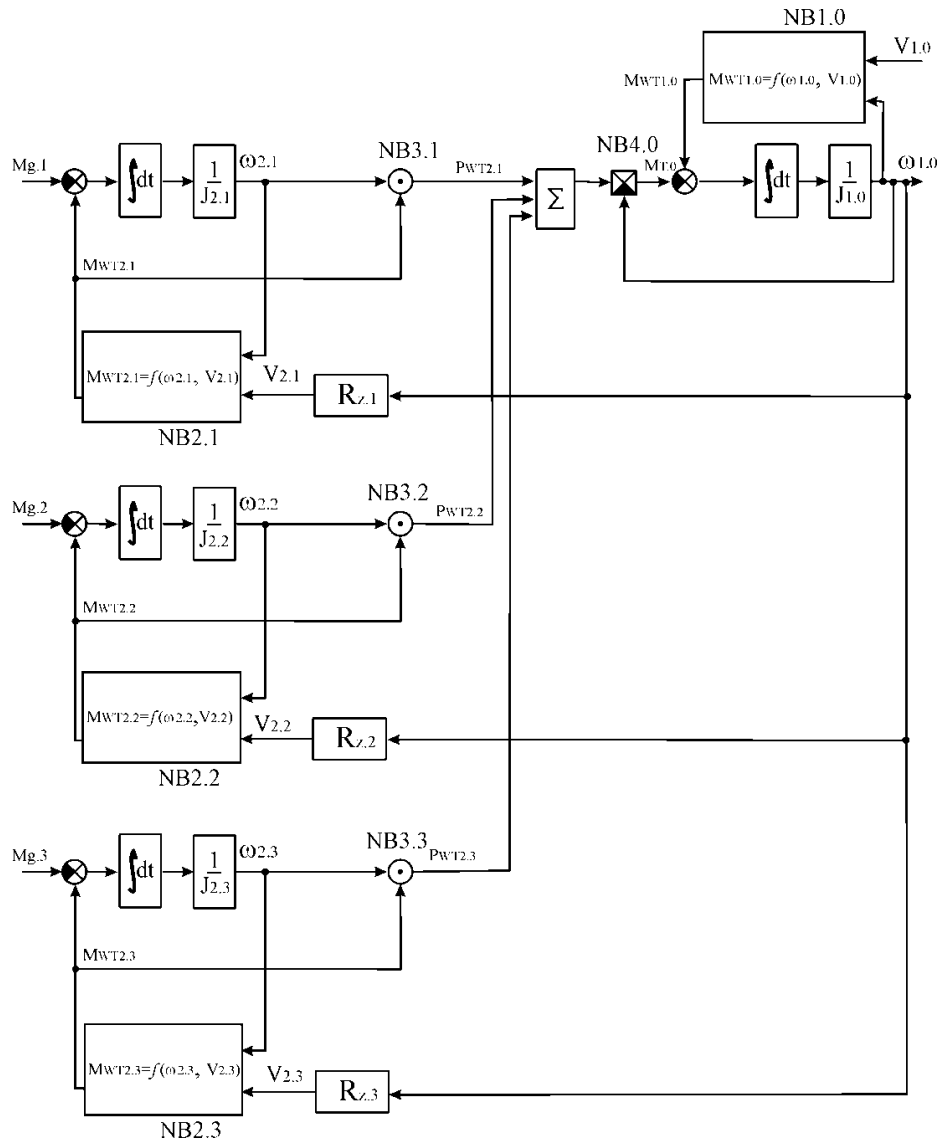


Рис.1. Вихідна блок схема моделі ланки аеродинамічного перетворення

Виходячи з даної властивості, можуть бути отримані наступні вирази:

$$M_{WT1.0}^{*0} = M_{T.0}^{*0}, \quad (2)$$

$$M_{WT2.1}^{*0} = M_{g.1}^{*0}, \quad (3)$$

$$M_{WT2.2}^{*0} = M_{g.2}^{*0}, \quad (4)$$

$$M_{WT2.3}^{*0} = M_{g.3}^{*0}, \quad (5)$$

де $M_{WT1.0}^{*0}$ - момент первинної вітротурбіни в сталому режимі,

$M_{T.0}^{*0}$ - момент гальмування первинної аеромеханічної підсистеми в

сталому режимі,

$M_{WT2.1}^{*0}$ $M_{WT2.2}^{*0}$ $M_{WT2.3}^{*0}$ - момент вторинних вітротурбін в сталому

режимі,

$M_{g.1}^{*0}$, $M_{g.2}^{*0}$, $M_{g.3}^{*0}$ - моменти на валу генераторів в сталому режимі.

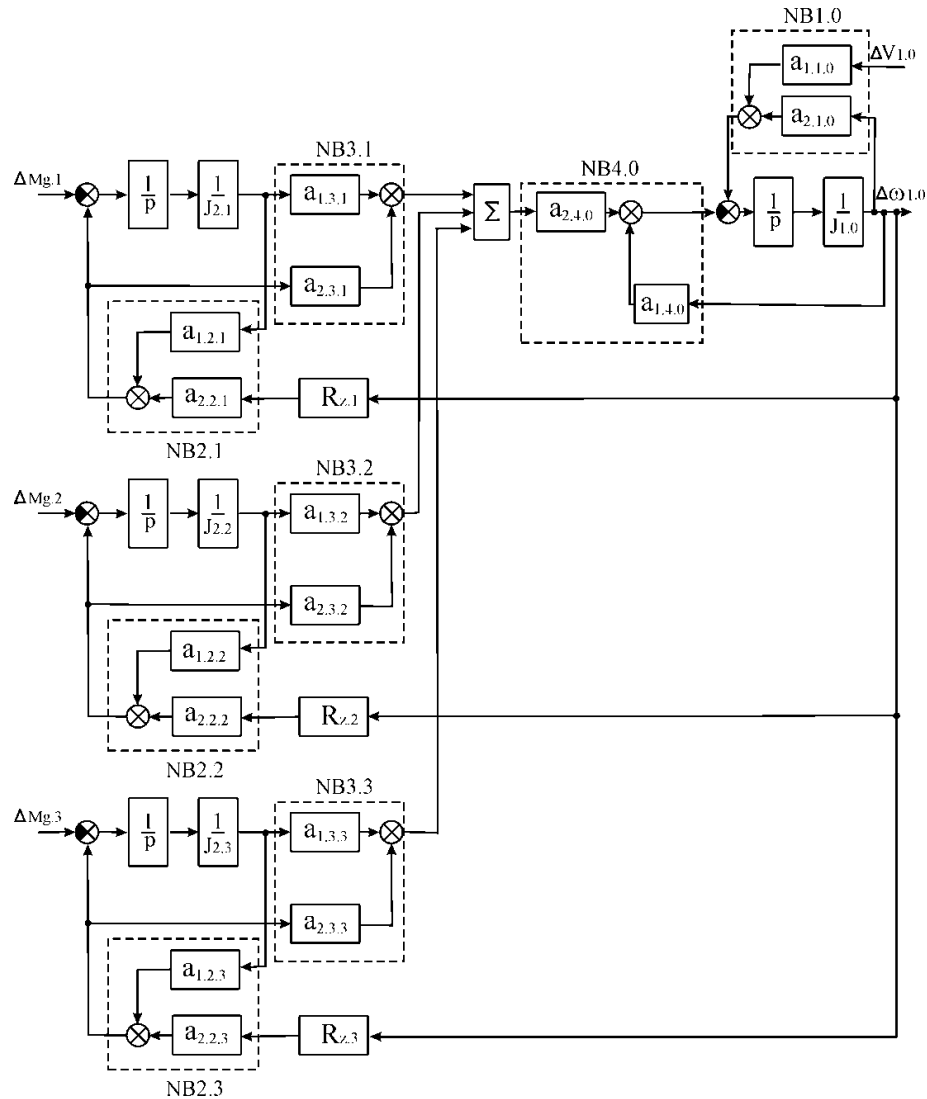


Рис.2. Блок-схема моделі ланки аеродинамічного перетворення після лінеаризації

Швидкості вторинних повітряних потоків визначаються кутовою швидкістю первинної вітротурбіни:

$$V_{2,1}^{*0} = R_{Z,1}^* \cdot \omega_{1,0}^{*0}, \quad V_{2,2}^{*0} = R_{Z,2}^* \cdot \omega_{1,0}^{*0}, \quad V_{2,3}^{*0} = R_{Z,3}^* \cdot \omega_{1,0}^{*0}, \quad (6)$$

де $R_{Z,1}^*$, $R_{Z,2}^*$, $R_{Z,3}^*$ - радіуси закріплення вторинних вітротурбін,

$\omega_{1,0}^{*0}$ - кутова швидкість обертання первинної вітротурбіни в сталому

режимі.

Для проведення лінеаризації нелінійних блоків необхідно визначити значення наступного набору параметрів робочої точки ланки аеродинамічного перетворення: $\omega_{1,0}^{*0}$, $\omega_{2,1}^{*0}$, $\omega_{2,2}^{*0}$, $\omega_{2,3}^{*0}$, $M_{T,0}^{*0}$, $P_{WT,2,1}^{*0}$, $P_{WT,2,2}^{*0}$, $P_{WT,2,3}^{*0}$, $V_{2,1}^{*0}$, $V_{2,2}^{*0}$, $V_{2,3}^{*0}$, $M_{WT,1,0}^{*0}$, $M_{WT,2,1}^{*0}$, $M_{WT,2,2}^{*0}$, $M_{WT,2,3}^{*0}$. Значення перших восьми з них можуть бути визначені в результаті розв'язання наступної системи трансцендентних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{WT1.0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - M_{T.0}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.1}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) - M_{g.1}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.2}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) - M_{g.2}^{*0} = 0 \\ f_{WT2.3}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) - M_{g.3}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.1}^{*0} - \omega_{2.1}^{*0} \cdot M_{g.1}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.2}^{*0} - \omega_{2.2}^{*0} \cdot M_{g.2}^{*0} = 0 \\ P_{WT2.3}^{*0} - \omega_{2.3}^{*0} \cdot M_{g.3}^{*0} = 0 \\ M_{T.0}^{*0} - \frac{P_{WT2.1}^{*0} + P_{WT2.2}^{*0} + P_{WT2.3}^{*0}}{\omega_{1.0}^{*0}} = 0 \end{array} \right. , \quad (7)$$

де $\omega_{2.1}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}$ - кутові швидкості вторинних вітротурбін.

Решта визначається за допомогою виразів (2), (3), (4), (5), (6).

В системі рівнянь (7) функції $f_{WT1.0}$, $f_{WT2.1}$, $f_{WT2.2}$, $f_{WT2.3}$ являють собою вирази для сімейства механічних характеристик первинної і вторинних вітротурбін, і визначаються з наступних виразів:

$$f_{WT1.0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) = \frac{(V_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{1.0}^{*0}} \cdot Cp_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}), \quad (8)$$

$$f_{WT2.1}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) = \left(\frac{R_{2.1}^*}{R_{1.0}^*}\right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.1}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.1}^{*0}} \cdot Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}), \quad (9)$$

$$f_{WT2.2}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) = \left(\frac{R_{2.2}^*}{R_{1.0}^*}\right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.2}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.2}^{*0}} \cdot Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}), \quad (10)$$

$$f_{WT2.3}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) = \left(\frac{R_{2.3}^*}{R_{1.0}^*}\right)^2 \cdot \frac{(R_{Z.3}^* \cdot \omega_{1.0}^{*0})^3}{\omega_{2.3}^{*0}} \cdot Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}). \quad (11)$$

Значення коефіцієнтів потужності вітротурбін $Cp_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})$, $Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0})$, $Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0})$ та $Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0})$ визначаються за допомогою наступних виразів (використовуючи [9]):

$$Cp_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{1.0}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})}{Z_{1.0}^{*opt}}\right)^{b_1} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0})}{Z_{1.0}^{*opt}}\right)^{b_2} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) \leq Z_{1.0}^{*opt} \\ Cp_{1.0}^{*max} - \frac{Cp_{1.0}^{*max}}{(Z_{1.0}^{*xx} - Z_{1.0}^{*opt})^{b_3}} \cdot (Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - Z_{1.0}^{*opt})^{b_4} & \text{при } Z_{1.0}^{*opt} < Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) < Z_{1.0}^{*xx} \\ Cp_{1.0}^{*max} - \frac{Cp_{1.0}^{*max}}{(Z_{1.0}^{*xx} - Z_{1.0}^{*opt})^{b_5}} \cdot (Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) - Z_{1.0}^{*opt})^{b_5} & \text{при } Z_{1.0}^{*xx} \leq Z_{1.0}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, V_{1.0}^{*0}) < +\infty \end{cases}$$

$$Cp_{2.1}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.1}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.1}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{2.1}^{*0}}{Z_{2.1}^{*opt}}\right)^{b_7} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{2.1}^{*0}}{Z_{2.1}^{*opt}}\right)^{b_8} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{2.1}^{*0} \leq Z_{2.1}^{*opt} \\ Cp_{2.1}^{*max} - \frac{Cp_{2.1}^{*max}}{(Z_{2.1}^{*xx} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_9}} \cdot (Z_{2.1}^{*0} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{10}} & \text{при } Z_{2.1}^{*opt} < Z_{2.1}^{*0} < Z_{2.1}^{*xx} \\ Cp_{2.1}^{*max} - \frac{Cp_{2.1}^{*max}}{(Z_{2.1}^{*xx} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{11}}} \cdot (Z_{2.1}^{*0} - Z_{2.1}^{*opt})^{b_{12}} & \text{при } Z_{2.1}^{*xx} \leq Z_{2.1}^{*0} < +\infty \end{cases}$$

$$Cp_{2.2}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.2}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.2}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{2.2}^{*0}}{Z_{2.2}^{*opt}}\right)^{b_{13}} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{2.2}^{*0}}{Z_{2.2}^{*opt}}\right)^{b_{14}} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{2.2}^{*0} \leq Z_{2.2}^{*opt} \\ Cp_{2.2}^{*max} - \frac{Cp_{2.2}^{*max}}{(Z_{2.2}^{*xx} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{15}}} \cdot (Z_{2.2}^{*0} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{16}} & \text{при } Z_{2.2}^{*opt} < Z_{2.2}^{*0} < Z_{2.2}^{*xx} \\ Cp_{2.2}^{*max} - \frac{Cp_{2.2}^{*max}}{(Z_{2.2}^{*xx} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{17}}} \cdot (Z_{2.2}^{*0} - Z_{2.2}^{*opt})^{b_{18}} & \text{при } Z_{2.2}^{*xx} \leq Z_{2.2}^{*0} < +\infty \end{cases}$$

$$Cp_{2.3}^{*0}(\omega_{1.0}^{*0}, \omega_{2.3}^{*0}) = \begin{cases} Cp_{2.3}^{*max} \cdot \left(\frac{Z_{2.3}^{*0}}{Z_{2.3}^{*opt}}\right)^{b_{19}} \cdot \left[-2 \cdot \left(\frac{Z_{2.3}^{*0}}{Z_{2.3}^{*opt}}\right)^{b_{20}} + 3\right] & \text{при } 0 < Z_{2.3}^{*0} \leq Z_{2.3}^{*opt} \\ Cp_{2.3}^{*max} - \frac{Cp_{2.3}^{*max}}{(Z_{2.3}^{*xx} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{21}}} \cdot (Z_{2.3}^{*0} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{22}} & \text{при } Z_{2.3}^{*opt} < Z_{2.3}^{*0} < Z_{2.3}^{*xx} \\ Cp_{2.3}^{*max} - \frac{Cp_{2.3}^{*max}}{(Z_{2.3}^{*xx} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{23}}} \cdot (Z_{2.3}^{*0} - Z_{2.3}^{*opt})^{b_{24}} & \text{при } Z_{2.3}^{*xx} \leq Z_{2.3}^{*0} < +\infty \end{cases}, \quad (12)$$

де $Cp_{1.0}^{*max}$, $Cp_{2.1}^{*max}$, $Cp_{2.2}^{*max}$, $Cp_{2.3}^{*max}$ - максимальні значення коефіцієнтів потужності у відносних одиницях первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*opt}$, $Z_{2.1}^{*opt}$, $Z_{2.2}^{*opt}$, $Z_{2.3}^{*opt}$ - оптимальні значення швидкохідності в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*xx}$, $Z_{2.1}^{*xx}$, $Z_{2.2}^{*xx}$, $Z_{2.3}^{*xx}$ - значення швидкохідності при холостому ході в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

$Z_{1.0}^{*0}$, $Z_{2.1}^{*0}$, $Z_{2.2}^{*0}$, $Z_{2.3}^{*0}$ - значення швидкохідності для сталого режиму в системі відносних одиниць первинної і вторинних вітротурбін, відповідно,

b_1, \dots, b_{24} - коефіцієнти апроксимації.

Значення швидкохідності первинної і вторинних вітротурбін в робочій точці визначаються за допомогою наступних виразів:

$$Z_{1.0}^{*0} = \frac{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{1.0}^*}{V_{1.0}^{*0}}, \quad Z_{2.1}^{*0} = \frac{\omega_{2.1}^{*0} \cdot R_{2.1}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.1}^*}, \quad Z_{2.2}^{*0} = \frac{\omega_{2.2}^{*0} \cdot R_{2.2}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.2}^*}, \quad Z_{2.3}^{*0} = \frac{\omega_{2.3}^{*0} \cdot R_{2.3}^*}{\omega_{1.0}^{*0} \cdot R_{Z.3}^*}, \quad (13)$$

де $R_{1.0}^*$, $R_{2.1}^*$, $R_{2.2}^*$, $R_{2.3}^*$ - значення радіусів первинної і вторинних вітротурбін у відносних одиницях, відповідно.

Визначення коефіцієнтів лінеаризації.

Коефіцієнти $a_{1.1.0}$ та $a_{2.1.0}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.1.0} \\ a_{2.1.0} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB1.0}} f_{NB1.0}(X_{NB1.0}), \quad \text{де } X_{NB1.0} = \begin{pmatrix} \omega_{1.0}^{*0} \\ V_{1.0}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB1.0}(X_{NB1.0}) = f_{WT1}(\omega_{1.0}^*, V_{1.0}^*). \quad (14)$$

Коефіцієнти $a_{1.2.1}$ та $a_{2.2.1}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.2.1} \\ a_{2.2.1} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2.1}} f_{NB2.1}(X_{NB2.1}), \quad \text{де } X_{NB2.1} = \begin{pmatrix} \omega_{2.1}^{*0} \\ V_{2.1}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB2.1}(X_{NB2.1}) = f_{WT2.1}(\omega_{2.1}^*, V_{2.1}^*). \quad (15)$$

Коефіцієнти $a_{1.2.2}$ та $a_{2.2.2}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1.2.2} \\ a_{2.2.2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2.2}} f_{NB2.2}(X_{NB2.2}), \quad \text{де } X_{NB2.2} = \begin{pmatrix} \omega_{2.2}^{*0} \\ V_{2.2}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB2.2}(X_{NB2.2}) = f_{WT2.2}(\omega_{2.2}^*, V_{2.2}^*). \quad (16)$$

Коефіцієнти $a_{1,2,3}$ та $a_{2,2,3}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1,2,3} \\ a_{2,2,3} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB2,3}} f_{NB2,3}(X_{NB2,3}), \text{ де } X_{NB2,3} = \begin{pmatrix} \omega_{2,3}^{*0} \\ V_{2,3}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB2,3}(X_{NB2,3}) = f_{WT2,3}(\omega_{2,3}^*, V_{2,3}^*). \quad (17)$$

Коефіцієнти $a_{1,3,1}$ та $a_{2,3,1}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1,3,1} \\ a_{2,3,1} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3,1}} f_{NB3,1}(X_{NB3,1}), \text{ де } X_{NB3,1} = \begin{pmatrix} \omega_{2,1}^{*0} \\ M_{WT2,1}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB3,1}(X_{NB3,1}) = \omega_{2,1}^* \cdot M_{WT2,1}^*. \quad (18)$$

Коефіцієнти $a_{1,3,2}$ та $a_{2,3,2}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1,3,2} \\ a_{2,3,2} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3,2}} f_{NB3,2}(X_{NB3,2}), \text{ де } X_{NB3,2} = \begin{pmatrix} \omega_{2,2}^{*0} \\ M_{WT2,2}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB3,2}(X_{NB3,2}) = \omega_{2,2}^* \cdot M_{WT2,2}^*. \quad (19)$$

Коефіцієнти $a_{1,3,3}$ та $a_{2,3,3}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1,3,3} \\ a_{2,3,3} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB3,3}} f_{NB3,3}(X_{NB3,3}), \text{ де } X_{NB3,3} = \begin{pmatrix} \omega_{2,3}^{*0} \\ M_{WT2,3}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і } f_{NB3,3}(X_{NB3,3}) = \omega_{2,3}^* \cdot M_{WT2,3}^*. \quad (20)$$

Коефіцієнти $a_{1,4,0}$ та $a_{2,4,0}$ визначаються з виразу:

$$\begin{pmatrix} a_{1,4,0} \\ a_{2,4,0} \end{pmatrix} = \nabla_{X_{NB4,0}} f_{NB4,0}(X_{NB4,0}), \text{ де } X_{NB4,0} = \begin{pmatrix} \omega_{1,0}^{*0} \\ P_{WT2,1}^{*0} + P_{WT2,2}^{*0} + P_{WT2,3}^{*0} \end{pmatrix} \text{ і} \\ f_{NB4,0}(X_{NB4,0}) = \frac{P_{WT2,1}^* + P_{WT2,2}^* + P_{WT2,3}^*}{\omega_{1,0}^*}. \quad (21)$$

Визначення передавальної матриці ланки електромеханічного перетворення. На підставі лінеаризованої моделі ланки аеродинамічного мультиплікування (див. рис.2) може бути складена модель в змінних стану (прохідна матриця відсутня) [10]:

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \\ y = C \cdot x \end{cases} \quad (22)$$

Системі (22) відповідають такі матриці:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{a_{2,1,0} - a_{1,4,0} - a_{2,4,0} \cdot (a_{2,3,1}a_{2,2,1}R_{Z1} + a_{2,3,2}a_{2,2,2}R_{Z2} + a_{2,3,3}a_{2,2,3}R_{Z3})}{J_{1,0}} & -a_{2,4,0}(a_{1,3,1}a_{2,3,1}a_{1,2,1}) & -a_{2,4,0}(a_{1,3,2}a_{2,3,2}a_{1,2,2}) & -a_{2,4,0}(a_{1,3,3}a_{2,3,3}a_{1,2,3}) \\ J_{1,0} & J_{1,0} & J_{1,0} & J_{1,0} \\ \frac{a_{2,2,1}R_{Z1}}{J_{2,1}} & \frac{a_{1,2,1}}{J_{2,1}} & 0 & 0 \\ \frac{a_{2,2,2}R_{Z2}}{J_{2,2}} & 0 & \frac{a_{1,2,2}}{J_{2,2}} & 0 \\ \frac{a_{2,2,3}R_{Z3}}{J_{2,3}} & 0 & 0 & \frac{a_{1,2,3}}{J_{2,3}} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{(-1)}{J_{2,1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(-1)}{J_{2,2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(-1)}{J_{2,3}} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad x = \begin{bmatrix} \Delta\omega_{1,0}^* \\ \Delta\omega_{2,1}^* \\ \Delta\omega_{2,2}^* \\ \Delta\omega_{2,3}^* \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta M_{g,1}^* \\ \Delta M_{g,2}^* \\ \Delta M_{g,3}^* \end{bmatrix}, \quad (23)$$

де $J_{1,0}^*$, $J_{2,1}^*$, $J_{2,2}^*$, $J_{2,3}^*$ - моменти інерції аеромеханічних підсистем,

$\Delta M_{g,1}^{*0}$, $\Delta M_{g,2}^{*0}$, $\Delta M_{g,3}^{*0}$ - приріст моментів генераторів,

$\Delta\omega_{1,0}^{*0}$, $\Delta\omega_{2,1}^{*0}$, $\Delta\omega_{2,2}^{*0}$, $\Delta\omega_{2,3}^{*0}$ - приріст кутових швидкостей аеромеханічної підсистеми.

Передавальна матриця визначається за допомогою матричного виразу [10]:

$$W(p) = C \cdot (p \cdot I - A)^{-1} \cdot B, \quad (24)$$

де I - одинична матриця.

Отримана передавальна матриця має великі розміри, внаслідок цього не може бути наведена, в рамках даної статті в розгорнутому вигляді, проте може бути використана в подальших обчисленнях при процедурі синтезу регулятора.

Висновки. Після лінеаризації вихідної нелінійної моделі ланки аеродинамічного перетворення була отримана передавальна матриця даної ланки та запропонована методика розрахунку її параметрів. Значення параметрів передавальної матриці ланки залежать від координат робочої точки на статичній траєкторії регулювання і від значення величини первинного повітряного потоку. Отримана методика є першим етапом синтезу закону регулювання електромеханічної системи ВЕУ з аеродинамічним мультипликуванням.

Список використаної літератури

1. Андриенко П.Д., Метельский В.П., Немудрый И.Ю., Никонова А.А. Повышение эффективности ветроэлектрической установки ТГ-750 // Вісник Севастопольського національного технічного університету. Серія Механіка, енергетика, екологія: збірник наукових праць. – Севастополь. – 2011. – Випуск 119. – С. 109–111.
2. Миргород В.Ф. Управление ветроэнергетической установкой большой мощности по запасам аэродинамической устойчивости // Вестник двигателестроения. – 2009. – № 3. – С. 67–70.
3. Гвоздева И.М., Миргород В.Ф., Глазьева О.В. Моделирование динамики ветроэнергетической установки большой мощности // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – № 1. – 2010. – С 53–57.
4. Гвоздева И.М., Миргород В.Ф., Деренг Е.В. Преобразование математической модели динамики ветроэнергетической установки к нормальной форме // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – № 3(19). – 2012. – С. 466–458.
5. Алексеевский Д.Г., Бузова А.А., Бузов А.Н., Кулаков С.А. Определение коэффициента преобразования мощности электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием // Вісник Чернігівського національного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. – 2014. – № 2(73). – С. 176–180.
6. Алексеевский Д.Г. Объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием // Технічні науки та технології. Науковий журнал. Серія: Технічні науки. – Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет. – 2015. – № 1(1). – С. 170–176.
7. Алексеевский Д.Г. Определение передаточной функции звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Спецвипуск: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Харків: Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – 2015. – № 12(1121). – С. 168–172.
8. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Перевод с английского Копылова Б.И. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
9. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы – Учебник. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет

«Харківський авіаційний інститут». – Севастополь: Севастопольський національний технічний університет, 2003. – 400 с.

10. Филлипс Ч., Харбрр Р. Системы управления с обратной связью. Перевод с английского Копылова Б.И. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

11. Ивановский Р.И., Нестеров А.В. Синтез многомерных систем управления. Проблема устойчивости // Третья Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2005). – 2005. – Том. 2. – С. 62–66.

References

1. *Andriienko P.D., Metelskii V.P., Nemudrii I.Yu.* Improving the efficiency of wind power plant TG-750. // *Visnyk Sevastopolskoho Nacionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriiia Mechanika, enerhetika, ekolohiia: zbirnyk naukovych prats – Sevastopol, – 2011. – Vypusk 119. – P. 109–111. (Rus.)*

2. *Mirhorod V.F.* The wind power plant control of high power reserves aerodynamic stability // *Vestnik dvihatelestroienia. – 2009. – № 3. – P. 67–70. (Rus.)*

3. *Hvozdeva I.M., Mirhorod V.F., Hlaziieva O.V.* Modeling the dynamics of a large power wind power plant // *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – № 1. – 2010. – P. 53–57. (Rus.)*

4. *Hvozdeva I.M., Mirhorod V.F., Derenh E.V.* The mathematical model dynamics transformation of the wind power plant to normal form // *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – № 3(19). – 2012. – P. 466–458. (Rus.)*

5. *Alekseevskii D.G., Burova A.A., Burov A.N., Kulakov S.A.* Determination of wind power plant power conversion efficiency of the electromechanical system with aerodynamic multiplication // *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriiia: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: Chernihivskii derzhavnyi tekhnolohichni universytet, – 2014. – № 2(73). – С. 176–180. (Rus.)*

6. *Alekseevskii D.G.* Explanation of the autooptimization effect of electromechanical systems wind power plant with aerodynamic multiplication // *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii. Naukovyi zhurnal. Seriiia: Tekhnichni nauky. – Chernihiv: Chernihivskii derzhavnyi tekhnolohichni universytet. – 2015. – № 1(1). – P. 170–176.*

7. *Alekseevskii D.G.* Determination of the aerodynamic conversion transfer function unit of electromechanical system for wind power plant with aerodynamic multiplication // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiyi politekhnichniy instytut». Spetsvypusk: Problemy avtomatizirovannoho elektroprivoda. Teoriia i praktika. – Kharkov.: Natsionalnyi tekhnichniy universytet «Kharkivskiyi politekhnichniy instytut», – 2015. – № 12(1121). – P. 168–172. (Rus.)*

8. *Dorf R., Bishop R.* Modern control systems. Pervod s anhliskoho *Kopylova B.I.* – Moskva: Laboratoriia Bazovykh Znanii, 2002. – 832 p. (Rus.)

9. *Krivtsov V.S., Oleinikov A.M., Yakovlev A.I.* Inexhaustible energy. Book 1. Wind power generators – Uchebnik. – Kharkov: Natsionalnyi aerokosmicheskii universitet «Kharkovskii aviatsionnii instytut», Sevastopol: Sevastopolskii natsionalnii tekhnicheskii universitet, 2003. – 400 p.

10. *Fillips Ch., Kharbr R.* Control systems with feedback. Pervod s anhliskoho *Kopylova B.I.* – Moskva: Laboratoriia Bazovykh Znanii, 2001. – 616 p.

11. *Ivanovskii R.I., Nesterov A.V.* Synthesis of multidimensional control systems. The problem of stability // *Tretia Mezhdunarodnaia konferentsiia po miahkim vychisleniiam i izmereniiam (SCM'2005). – 2005. – Tom 2. – P. 62–66.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ МАТРИЦЫ ЗВЕНА
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ ВЭУ С АЭРОДИНАМИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛИЦИРОВАНИЕМ**

АНДРИЕНКО П.Д.⁽¹⁾, АЛЕКСЕЕВСКИЙ Д.Г.⁽²⁾, ПАНКОВА О.О.⁽²⁾

(1) Запорожский национальный технический университет,

(2) Запорожская государственная инженерная академия

Цель. *Определение передаточной матрицы звена аэромеханического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.*

Методика. *В процессе разработки методики определения передаточной матрицы была проведена процедура линеаризации исходной нелинейной модели звена аэродинамического преобразования. Использован математический аппарат решения систем трансцендентных уравнений. В основе методики лежит обобщенная модель звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ветроэнергетической установки с аэродинамическим мультиплицированием.*

Результаты. *Разработана методика определения передаточной матрицы звена аэродинамического преобразования для ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием. Разработана методика для расчетов параметров передаточной матрицы.*

Научная новизна. *Впервые на основе обобщенной модели предложена методика определения передаточной матрицы звена аэродинамического преобразования электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.*

Практическая значимость. *Данная методика может быть использована как составляющая в процедуре синтеза оптимальных регуляторов для электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием.*

Ключевые слова: *ветроэнергетическая установка, ветротурбина, математическая модель, передаточная функция системы, аэродинамическое мультиплицирование.*

**DETERMINATION OF THE AERODYNAMIC CONVERSION UNIT TRANSFER
MATRIX OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM FOR WIND POWER PLANT WITH
AERODYNAMIC MULTIPLICATION**

ANDRIENKO P.D.⁽¹⁾, ALEKSEEVSKII D.G.⁽²⁾, PANKOVA O.J.⁽²⁾

(1) Zaporozhe National Technical University,

(2) Zaporozhe State Engineering Academy

Purpose. *Determination of the transfer matrix aeromechanical conversion link of electromechanical wind power system with aerodynamic multiplication.*

Methodology. *During the methods for determining the transfer matrix development, the original nonlinear model aerodynamic conversion link was to carry out linearization. Also used mathematical apparatus solutions of transcendental equations. The method is based on the aerodynamic conversion link generalized model of electromechanical system of wind power plant with aerodynamic multiplication.*

Findings. *The method for determining aerodynamic conversion link transfer matrix of wind power system with aerodynamic multiplication developed. The method for calculating the transfer matrix parameters.*

Originality. *Methods of determining the aerodynamic conversion level transfer matrix of wind power system with aerodynamic multiplication based on a generalized model of this system is first proposed.*

Practical value. *This method can be used as a component in the optimal controls synthesis process for electromechanical systems of wind power plant with aerodynamic multiplication.*

Key words: *wind power plant, wind turbine, mathematical model, transfer matrix, aerodynamic multiplication.*