

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНОЇ КОНТРОТОРНОЇ ВІТРОУСТАНОВКИ З ТРАНСФОРМАТОРОМ ІЗ ОБЕРТОВОЮ ПОЛОВИНОЮ

Актуальність роботи. В умовах низьких середньорічних швидкостей вітру на території України [1] ефективніше працюють вітроелектроустановки (ВЕУ) з вертикальною віссю обертання (ВВО), перевагою яких є стабільна робота на малих швидкозмінних поривчастих вітрах та відсутність потреби орієнтування за напрямом вітру [2]. Для генерування електричної енергії з максимальною енергетичною ефективністю, у ВЕУ з ВВО використовують синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ), причому, завдяки відсутності в такій конструкції обмежень на розміри генератора, ВЕУ доцільно конструювати безредукторною, що забезпечує її високу надійність та низьку стартову швидкість вітру. Застосування контроторної системи ВЕУ дає змогу збільшити вдвічі куту швидкість генератора, що суттєво зменшує розміри і вартість генератора [3]. Проте у контроторній ВЕУ виникає проблема у передачі виробленої електричної енергії з якоря СГПМ, який розміщений на рухомій частині установки (контроторі).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для безконтактної передачі та регулювання виробленої електричної енергії з рухомих частин контроторної ВЕУ з ВВО спроектовано та виготовлено спеціальний трансформатор з обертовою половиною (ТЗОП), індуктивність взаємоіндукції для кожної фази якого не залежить від кута повороту його рухомої частини [4, 5]. Відводи на його вторинній обмотці надають можливість відбирати максимальну енергію шляхом підтримання роботи ВЕУ з ВВО в околі точки максимуму використання потужності вітру та підтримання максимально можливого ККД ВЕУ в цілому.

Мета статті. Розроблення математичної моделі роботи ВЕУ з ВВО в усталеному режимі з метою енергетично-вартісної оптимізації конструкції для різної потужності ВЕУ та обґрунтування параметрів її складових елементів.

Матеріал і результати досліджень. З метою дослідження роботи ТЗОП та подальшого його використання у складі контроторної ВЕУ з ВВО, виникає необхідність у створенні адекватної імітаційної комп'ютерної моделі. Для реалізації цієї задачі використано засоби пакету прикладних програм MATLAB/Simulink. Комп'ютерна модель ТЗОП побудована на основі Т-подібної заступної схеми, параметри якої визначалися експериментально, використовуючи раніше спроектований та виготовлений макетний зразок [3, 6]. Модель враховує залежність втрат в сталі від частоти. Перемикання відводів вторинної обмотки трансформатора здійснюється за зовнішніми сигналами при переходах вторинної напруги через нуль.

Особливість використання Т-подібної заступної схеми полягає у тому, що вторинна обмотка ТЗОП приводиться до первинної. Недоліком такого рішення є те, що воно вимагає під'єднання до трансформатора не реального, а приведеного навантаження. Створена комп'ютерна модель містить перехресну систему автоматичного керування, яка здійснює узгодження реального навантаження з Т-подібною заступною схемою [6].

З метою верифікації комп'ютерної моделі було проведено фізичні експерименти на макетному зразку та комп'ютерна симуляція для тих же умов живлення та навантаження ТЗОП. Результати цих досліджень (рис. 1) показали розбіжність не вище 5%. Також хорошими залишаються енергетичні показники: ККД для першого, другого і третього відводів становлять відповідно 0,84, 0,9 та 0,86.

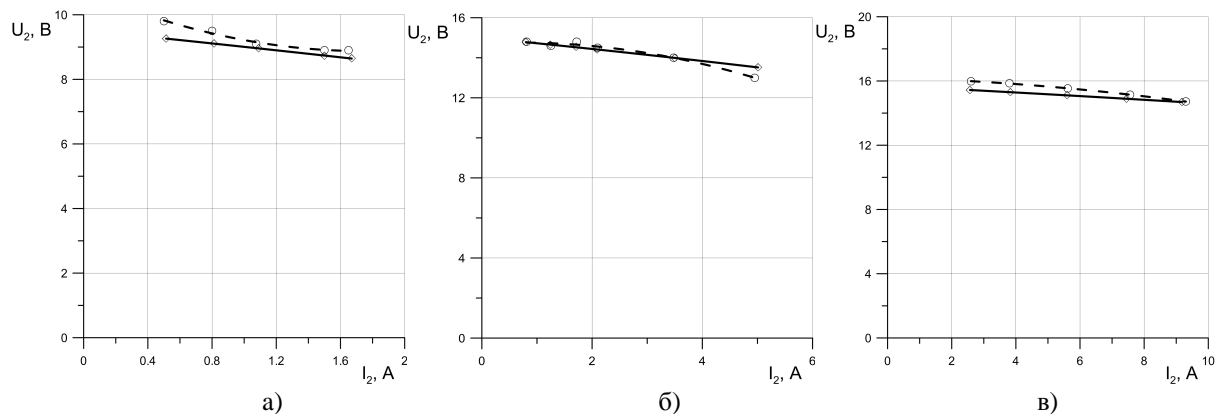


Рис. 1 Зовнішні характеристики ТЗОП при комп'ютерному моделюванні (◆◆◆) та визначенні експериментально (⊖ ⊖ ⊖): а) робота на першому відводі; б) на другому відводі; в) на третьому відводі

Контрроторна ВЕУ з ВВО змодельована відповідно до функціональної схеми зображеної на рис. 2. Параметри вітророторів (ВР) вибрані наступними: номінальна вихідна механічна потужність 285 Вт при швидкості вітру 8 м/с, радіус одного вітроротора 1,14 м і його площа омивання 1,29 м², максимальне значення коефіцієнта використання потужності вітру $C_{p\max} = 0,351$. Параметри СГПМ: номінальна частота обертання 520 об/хв, кількість пар полюсів 12, діюча напруга при неробочому ході 60,5 В, опір обмотки якоря та її індуктивність 0,8 Ом і 3,5 мГн, амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парю полюсів постійних магнітів 0,086 Вб. Напруга акумуляторна батареї 24 В.

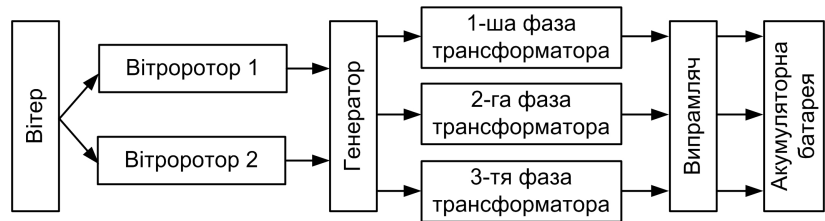


Рис. 2 Функціональна схема контрроторної ВЕУ

Результати комп'ютерного моделювання представлено на рис. 3. Їхній аналіз показує, що для ефективної роботи ВЕУ на всьому діапазоні швидкості вітру достатньо двох відводів вторинної обмотки ТзОП: для швидкості вітру 3-5 м/с – робота на першому відводі й для 5-11 м/с – на третьому відводі. Це забезпечує майже максимальну енергетичну ефективність – коефіцієнт використання потужності вітру є близьким до максимального значення, а вихідна потужність ВЕУ з ВВО має максимальне значення у порівнянні з роботою на інших відводах. Проте, повна ефективність системи "СГПМ – ТзОП – випрямляч" відносно низька – 0,6 - 0,75 через втрати енергії в обмотках, а особливо через зниження $\cos \varphi$. Підвищити ефективність можна буде шляхом вмикання трифазного конденсатора для компенсації реактивної потужності.

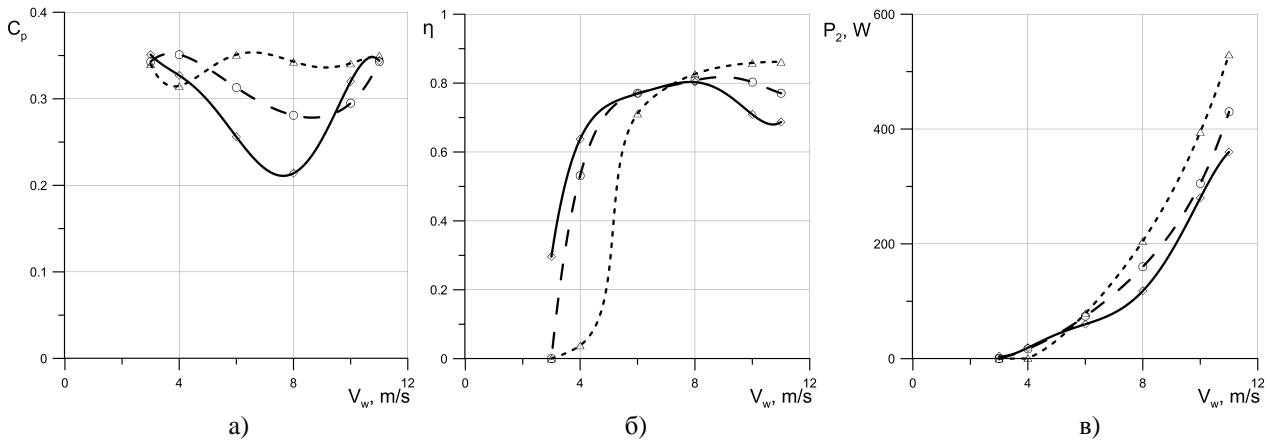


Рис. 3 Показники роботи дослідної ВЕУ при різних ввімкнених відводах вторинних обмоток ТзОП на вітрах з різною швидкістю (—○—○— – робота на першому відводі; - - -□- - - на другому відводі; ····△····△ – третьому відводі): а) коефіцієнт використання потужності вітру; б) ефективність перетворення енергії в системі "СГПМ – ТзОП – випрямляч"; в) електрична потужність на вході акумуляторної батареї

Для розв'язання задачі з оптимізації параметрів автономної безконтактної контрроторної ВЕУ з ТзОП постає необхідність у створенні математичної моделі в усталеному режимі. На рис. 4 наведено заступну схему спрощеної електромеханічної частини однієї фази ВЕУ, яка взята за основу математичної моделі. Спрощення полягає у врахуванні лише першої гармоніки. Це допущення вносить деяку похибку, яка, проте, є допустимою для даного роду задач.

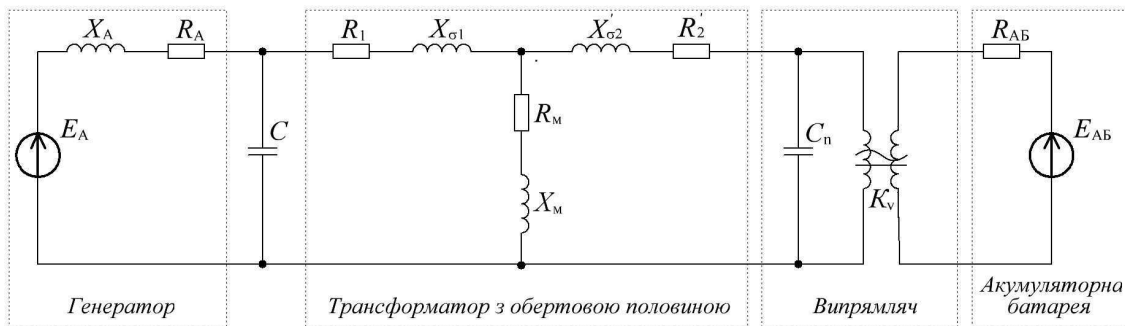


Рис. 4 Заступна схема однієї фази електромеханічної частини ВЕУ

Роботу ВЕУ в усталеному режимі, у відповідності до функціональної схеми на рис. 2, з врахуванням заступної схеми, показаної на рис. 4, представимо у вигляді такої математичної моделі:

$$P_m = 2 \cdot 0,5 \rho_r C_p A v_w^3; \quad C_p = a \left(\frac{b}{\lambda} - 1 \right) e^{-\frac{c}{\lambda}}; \quad \lambda = \frac{\omega_w R}{v_w}; \quad P_m = \frac{3}{2} \dot{E}_A |I_A| \cos(\varphi); \quad (1)$$

$$\dot{E}_A = 2 p I \omega_w; \quad f = \frac{2 p \omega_w}{2 \pi}; \quad \omega = 2 \pi f; \quad \varphi = 0 - \arg(I_A); \quad R_m = 0,0306 f^{1,3}; \quad (2)$$

$$\dot{I}_A - \dot{I}_C - \dot{I}_1 = 0; \quad \dot{I}_1 - \dot{I}_m - \dot{I}'_2 = 0; \quad \dot{I}'_2 - \dot{I}'_{C_n} - \dot{I}'_n = 0; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A - \dot{I}_A (R_A + j \omega L_A) - \dot{I}_C \left(\frac{1}{j \omega C} \right) &= 0; \\ \dot{E}_A - \dot{I}_A (R_A + j \omega L_A) - \dot{I}_1 (R_1 + j \omega L_{y1}) - \dot{I}_m (R_m + j \omega L_m) &= 0; \\ \dot{I}_m (R_m + j \omega L_m) - \dot{I}'_2 (R'_2 + j \omega L'_{y2}) - \dot{I}'_n &= 0; \\ \dot{I}_m (R_m + j \omega L_m) - \dot{I}'_2 (R'_2 + j \omega L'_{y2}) - \dot{I}'_{C_n} \left(\frac{1}{j \omega C_n} \right) &= 0; \quad U_v - I_{AB} R_{AB} - E_{AB} = 0; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$P_{in} = \frac{3}{2} |\dot{U}'_n| |\dot{I}'_2| \cos[\arg(\dot{U}'_n) - \arg(\dot{I}'_2)]; \quad P_{out} = P_{in} - 2 |\dot{I}_2|; \quad P_{out} = U_v I_{AB}; \quad U_v = K_v \frac{|\dot{U}'_n|}{\sqrt{2}} \sqrt{3} - 2; \quad (5)$$

$$\dot{U}'_n = \dot{U}'_n \frac{w_2}{w_1}; \quad \dot{I}_2 = \dot{I}'_2 \frac{w_1}{w_2}. \quad (6)$$

Рівняння наведеної математичної моделі можна умовно поділити на групи (1) – (6). Рівняння групи (1) описують механічну частину ВЕУ [7], де ρ_r – густина повітря; C_p – коефіцієнт використання потужності вітру; A – площа омивання ВР; v_w – швидкість вітру; λ – швидкохідність ВР; a, b, c – емпіричні коефіцієнти для завдання характеристики $C_p(\lambda)$; ω_w – кутова швидкість ВР; R – радіус ВР; P_m – механічна потужність ВР; \dot{E}_A – ЕРС однієї фази генератора; \dot{I}_A – фазний струм СГПМ; φ – кут зсуву між ЕРС та фазним струмом СГПМ.

Рівняння групи (2) у поєднанні з останнім рівнянням групи (1) зв'язують механічну частину ВЕУ з електричною, де p – кількість пар полюсів постійних магнітів СГПМ; I – амплітуда потокозчеплення обмотки якоря з парою полюсів постійних магнітів; f – частота напруги генератора; ω – кругова частота напруги в колі якоря СГПМ; R_m – опір в Т-подібній заступній схемі ТзОП, що моделює втрати в сталі [6].

Рівняння групи (3) та (4) записані використавши 1-й та 2-й закон Кірхгофа для вузлів та контурів заступної схеми, зображеної на рис. 4. Тут: \dot{I}_C – струм конденсатора С; \dot{I}_1 – струм в первинній обмотці ТзОП; \dot{I}_m – струм намагнічування ТзОП; \dot{I}'_2 – зведений струм у вторинній обмотці ТзОП; \dot{I}'_{C_n} – струм, що протікає через конденсатор C_n , що є одним із елементів системи випрямлення; \dot{I}'_n – зведеним струм навантаження, який проходить через випрямляч. Параметри R_A , L_A – активний опір та індуктивність обмотки якоря СГПМ; значення елементів Т-подібної заступної схеми ТзОП R_1 , L_{y1} , R_m , L_m , R'_2 , L'_{y2} визначаються експериментально [6]; U_v – випрямлена напруга; I_{AB} – струм заряду акумуляторної батареї (АБ); R_{AB} – внутрішній опір АБ; E_{AB} – ЕРС АБ.

Рівняння групи (5) призначені для моделювання складного нелінійного елемента – випрямляча, який створює форму струму у вторинній обмотці ТзОП. За основу взято рівність потужностей: P_{in} – потужність на вході випрямляча; P_{out} – потужність на виході випрямляча; $2|\dot{I}_2|$ – втрати потужності у двох послідовно з'єднаних діодах мостового випрямляча. Ємність C_n , а також коефіцієнт K_v визначають величину напруги, яка утворюється після випрямлення. Ці параметри визначаються з таких міркувань, щоб результати для номінального режиму роботи в математичній та комп'ютерній моделях максимально наближалися. Так, для варіанту ВЕУ, який макетується та досліджується експериментально, вони становлять 50 мкФ та 1,3 відповідно.

Рівняння групи (6) необхідні для здійснення приведення параметрів та величин вторинної обмотки ТзОП до первинної (w_1 , w_2 – кількості витків первинної та вторинної обмотки відповідно) [8].

У табл. 1 наведено відповідні значення координат роботи ВЕУ в номінальному режимі, отримані на математичній та комп'ютерній моделях [6]. Комп'ютерна модель є базовою для визначення похибки, оскільки її достовірність підтверджена експериментально (рис. 1).

Таблиця 1 – Результати роботи ВЕУ при математичному та комп'ютерному моделюванні

Проміжні координати	Математичне моделювання	Комп'ютерне моделювання	Відносна похибка математичного моделювання, %
Швидкість вітру v , м/с	8	8	0
Механічна потужність ВР P_m Вт	254	278	-9
Коефіцієнт використання потужності вітру C_p	0,313	0,342	-8
Швидкохідність ВР λ	2,74	3,19	-14
Активна вихідна потужність генератора, P_1 , Вт	232	248	-6
Діюче значення фазного струму генератора I_1 , А	3,04	3,29	-8
Діюче значення фазної напруга генератора U_1 , В	25,6	29,1	-12
Активна потужність на виході трансформатора, P_2 , Вт	213	205	4
Діюче значення фазного струму трансформатора I_2 , А	6,63	5,85	14
Діюче значення фазної напруги трансформатора U_2 , В	12,7	13	-2
Електрична потужність випрямляча, P_v , Вт	194	184	5
Струм на виході випрямляча I_v , А	7,27	7,7	-6
Напруга на виході випрямляча U_v , В	26,6	24,4	9

Висновки.

1. Проведено порівняльний аналіз результатів симуляції на комп'ютерній моделі та результатів фізичного експерименту на макетному зразку (рис. 1). Невелика розбіжність між ними підтверджує високу адекватність комп'ютерної моделі.

2. Змодельовано та досліджено роботу контрроторної ВЕУ з ВВО, в результаті чого визначено, що двох відводів достатньо для ефективної роботи на всьому діапазоні швидкостей вітру.

3. З метою енергетично-вартісної оптимізації конструкції, для різних потужностей ВЕУ розроблено спрощену математичну модель роботи ВЕУ для першої гармоніки в усталеному режимі роботи. Порівняння відповідних значень проміжних координат, отриманих з математичної моделі та комп'ютерного моделювання, показують допустиму для запланованих досліджень розбіжність, яка не перевищує 14%.

Список літератури.

1. Титко Р. Відновлювані джерела енергії (досвід Польщі для України) / Р. Титко, В. Калініченко. – Варшава: OWG, 2010. – 532 с.
2. Ahmed A. New constant electrical power soft-stalling control for small-scale VAWTs / A. Ahmed, L. Ran, J.R. Bumby // IEEE Trans. on Energy Convers. – 2010. – Vol.25, no.4. – P. 1152 – 1161.
3. Ковальчук А.І. Трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А.І. Ковальчук // Електроенергетичні та електромеханічні системи: Вісн. Націон. ун-ту "Львівська політехніка". – № 736. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту "Львівська політехніка", 2012. – С. 59 – 63.
4. Ковальчук А.І. Обертвий трансформатор для контрроторної вітроустановки з вертикальною віссю обертання / А.І. Ковальчук // 36. матер. конф. «Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації», 28 – 29 березня 2012 р., Кременчук. – Кременчук: Кременч. націон. ун-т ім. Михайла Остроградського, 2012. – С. 122 – 123.
5. Патент на корисну модель UA 80216 U, МПК F03D 3/02, F03D 7/04. Безконтактна контрроторна вітроустановка / О.В. Макарчук, І.З. Щур, А.І.Ковальчук; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201207720, заявл. 25.06.2012; опубл. 27.05.2013, Бюл. №10.
6. Щур І.З. Імітаційне моделювання трансформатора з обертовою половиною у складі контрроторної вітроелектроустановки / І.З. Щур, А.І. Ковальчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013 (22). – С. 330 – 335.
7. Щур І.З. Квазіоптимальне дискретне регулювання навантаження синхронного генератора з постійними магнітами в безконтактній контрроторній автономній вітроустановці / І.З. Щур, А.І. Ковальчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 431 – 434.
8. Яцун М. А. Електричні машини: підручник / М.А. Яцун. – Львів: Вид-во Націон. ун-ту "Львівська політехніка", 2011. – 464 с.