

УДК 62-523: 621.311.245

ТЕНДЕНЦІ РОЗРОБКИ І НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ІМІТАЦІЇ ВІТРОТУРБІН**О. М. Буров**Приватне акціонерне товариство «Запоріжтрансформатор»
вул. Дніпровське шосе, 3, м. Запоріжжя, 69600, Україна. E-mail: o.m.burov@i.ua**Н. М. Власюк**Запорізька державна інженерна академія
просп. Соборний, 226, м. Запоріжжя, 69006, Україна. E-mail: vlasjuk.nn@gmail.com

Імітатори вітротурбін є корисним інструментом для вивчення поведінки, функціонування й управління вітротурбінами. Ефективне використання систем імітації вітротурбін дозволить проводити розробку більш якісного та економічного електрообладнання вітроенергетичних установок. У роботі розглянуто загальні питання імітації поведінки вітротурбін і надано узагальнену структуру системи імітації. Проведено аналіз варіацій структур електромеханічних систем сучасних імітаторів вітротурбін на базі електроприводів постійного й змінного струму. Проаналізовано підходи до розробки програмно-управляючої системи імітаторів вітротурбін, зокрема, до створення математичної моделі вітротурбіни з урахуванням статичних і динамічних режимів її роботи, а також до моделювання параметрів вітрового потоку. За результатами аналізу систематизовано підходи до розробки сучасних систем імітації вітротурбін залежно від особливостей електромеханічної та програмно-управляючої систем імітаторів вітротурбін, а також запропоновано напрями вдосконалення даних систем. Отримані результати дозволяють оптимізувати процес проектування систем імітації вітротурбін.

Ключові слова: імітатор вітротурбіни, електромеханічна система, програмно-управляюча система, математична модель вітротурбіни, параметри вітрового потоку.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ИМИТАЦИИ ВЕТРОТУРБИН**А. Н. Буров**Частное акционерное общество «Запорожтрансформатор»
ул. Днепровское шоссе, 3, г. Запорожье, 69600, Украина. E-mail: o.m.burov@i.ua**Н. Н. Власюк**Запорожская государственная инженерная академия
просп. Соборный, 226, г. Запорожье, 69006, Украина. E-mail: vlasjuk.nn@gmail.com

Имитаторы ветротурбин являются полезным инструментом для изучения поведения, функционирования и управления ветротурбинами. Эффективное использование систем имитации ветротурбин позволит проводить разработку качественного и экономичного электрооборудования ветроэнергетических установок. В работе рассмотрены общие вопросы имитации поведения ветротурбин и представлена обобщенная структура системы имитации. Проведен анализ вариаций структур електромеханических систем современных имитаторов ветротурбин на базе электроприводов постоянного и переменного тока. Проанализированы подходы к разработке программно-управляющей системы имитаторов ветротурбин, в частности, к созданию математической модели ветротурбины с учётом статических и динамических режимов её работы, а также к моделированию параметров ветрового потока. По результатам анализа систематизированы подходы к разработке современных систем имитации ветротурбин в зависимости от особенностей електромеханической и программно-управляющей систем имитаторов ветротурбин, а также предложены направления совершенствования данных систем. Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс проектирования систем имитации ветротурбин.

Ключевые слова: имитатор ветротурбины, електромеханическая система, программно-управляющая система, математическая модель ветротурбины, параметры ветрового потока.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні вітроенергетика займає лідируючі позиції серед усіх інших видів альтернативної енергетики як за загальною потужністю встановлених агрегатів (487 ГВт) [1], так і за собівартістю електроенергії, що виробляється (від 4,99 євроцентів за кВт·год).

Подальший розвиток вітроенергетики можливий за рахунок підвищення ефективності та економічності вітрогенеруючого обладнання, зокрема, електрообладнання (ЕО) вітроенергетичних установок (ВЕУ). Така тенденція вимагає вдосконалення допоміжного обладнання, що застосовується при дослідженнях та виробництві ВЕУ. Одним із таких інструментів є електромеханічні системи, здатні імі-

тувати режими роботи реальних вітротурбін (імітатори вітротурбін, або ІВТ). При цьому досягається подібність поведінки реальної вітротурбіни (ВТ) (M_B, ω_B) і імітатора ВТ (M_B, ω_i) відносно вала генератора (рис. 1).

Застосування систем імітації вітротурбін дозволяє проводити дослідження, розробку й діагностування електрообладнання ВЕУ для вітроенергетичних установок та відповідних алгоритмів управління в короткі терміни в умовах підприємств-виробників без підключення до реальних вітротурбін, що, у свою чергу, дозволяє значно скоротити витрати на зазначений комплекс робіт.

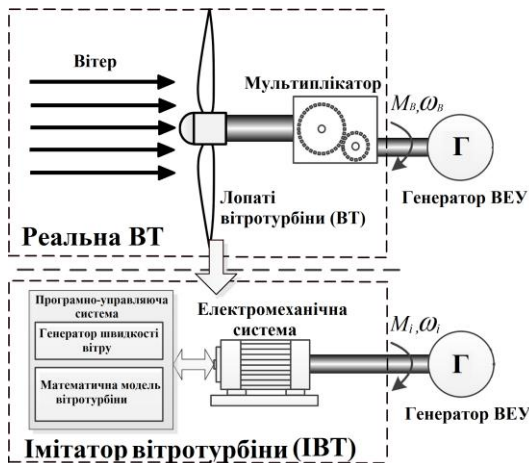


Рисунок 1 – Сутність заміни реальної ВТ на імітатор ВТ відносно генератора ВЕУ

Питанням розробки систем імітації вітротурбін присвячено чимало робіт, в основному закордонних авторів. Ці роботи носять переважно інженерно-прикладний характер. Водночас багато питань проектування систем імітації ВТ, від оптимізації їх структурного синтезу до аналізу їх найбільш ефективного використання, залишається поза увагою. Таким чином, подальший розвиток даного напрямку є актуальним.

Метою даного дослідження є узагальнення світового досвіду розробки систем імітації поведінки вітротурбін для систематизації підходів до їх реалізації, а також визначення напрямків подальшого вдосконалення даних систем.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Опис узагальненої структури системи імітації вітротурбін

Виходячи з огляду існуючих схем ІВТ, для подальшого аналізу було розроблено узагальнену структуру системи імітації вітротурбін (рис. 2) [2].

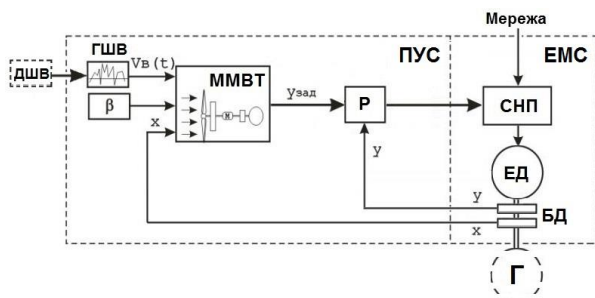


Рисунок 2 – Узагальнена структура системи імітації вітротурбін

Умовно у структурі ІВТ можна виділити дві системи: програмно-управляючу (ПУС), основою якої є математична модель вітротурбіни, та електромеханічну (ЕМС), яка на основі сигналу завдання від ПУС відтворює на валу генератора характеристики реальної ВТ.

Основою програмно-управляючої системи є блок математичної моделі вітротурбіни (ММВТ), який на

основі вхідних параметрів формує сигнал завдання ($y_{зад}$) для здійснення процесу управління ЕМС ІВТ за допомогою регулятора (Р). У загальному випадку вхідними параметрами блоку ММВТ є швидкість вітрового потоку ($V_B(t)$), яка задається за допомогою генератора швидкості вітру (ГШВ), кут установки лопатей вітротурбіни (β) і параметр (x), що характеризує стан ЕМС ІВТ. Електромеханічна система імітатора ВТ складається із силового напівпровідникового перетворювача (СНП), який здійснює трансформацію енергії мережі з метою управління електродвигуном (ЕД) для забезпечення необхідних параметрів системи (x, y) відносно вала генератора ВЕУ (Г), значення яких передаються у ПУС за допомогою блоку інформаційних датчиків (БД).

З рис. 2 видно, що системи імітації побудовані за принципом одноконтурних систем автоматичного управління (САУ) параметром (y), що характеризує стан ЕМС ІВТ. Стан вітротурбіни відносно вала генератора, як правило, характеризується двома параметрами: механічним моментом на валу M_i і кутовою швидкістю вала ω_i . Таким чином, САУ електроприводу ІВТ може бути побудована за принципом управління одним із цих параметрів. Так, наприклад, якщо здійснюється управління механічним моментом ($y=M_i$), то значення кутової швидкості вала ($x=\omega_i$) подається на вхід блоку математичної моделі вітротурбіни й використовується в розрахунку сигналу завдання ($y_{зад}$). Якщо ж управління здійснюється за кутовою швидкістю, то $y=\omega_i$, а $x=M_i$.

Слід зазначити, що механічний момент найбільш повно характеризує динаміку поведінки ВТ. Крім того, до переваг даного варіанту слід віднести простоту побудови систем, а також однозначність визначення необхідної робочої точки системи із застосуванням статичних механічних характеристик ВТ.

Особливості розробки електромеханічної системи ІВТ

ЕМС сучасних ІВТ будуються на базі електроприводу (ЕП) постійного [3–10] або змінного [11–20] струму.

Зазвичай у першому типі систем застосовуються двигуни постійного струму з незалежним електромагнітним збудженням (ДПС з НЗ) [3–9] завдяки простим і надійним способам регулювання частоти обертання електродвигуна. Крім того, ДПС з НЗ можуть працювати в усіх трьох гальмівних режимах, що є важливим для імітації всіх можливих режимів роботи реальних ВТ. У роботі [10] у функції електродвигуна застосовується ДПС із магнітоелектричним збудженням від постійних магнітів (ДПС із ПМ), але таке рішення економічно доцільне тільки на невеликих потужностях. Слід зазначити, що загальні тенденції орієнтації на електроприводи змінного струму також відобразилися на їх все більшому використанню в ІВТ.

У другому типі систем найчастіше застосовуються асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором (АДКР) [11–16], що обумовлено перевагами самої короткозамкненої машини та ефективністю частотно-

го способу її регулювання. Проте для досягнення нормованої якості перехідних процесів ЕП на базі АДКР вимагають застосування сучасних принципів векторного управління, що, у свою чергу, потребує використання більш складних алгоритмів управління й дорогих перетворювачів електричної енергії.

У роботах [17–20] в ЕМС застосовано синхронні двигуни із збудженням від постійних магнітів (СДПМ), що обумовлено їх компактністю, великою перевантажувальною здатністю, а також постійною частотою обертання незалежно від механічного навантаження на валу. Проте СДПМ мають високу вартість і труднощі з регулюванням частоти обертання, яке можливе лише шляхом зміни частоти живильної напруги. Це обмежує застосування СДПМ як електродвигуна для імітації поведінки реальних ВТ.

На даний момент практичного застосування набули нечисленні схеми СНП залежно від типу ЕП. В ІВТ на базі ЕП постійного струму застосовуються нереверсивні керовані випрямлячі (НКВ) [3–5] або схеми на базі некерованих випрямлячів (НВ) у комбінації з широтно-імпульсними перетворювачами (ШП) [7, 8]. В ІВТ на базі ЕП змінного струму найчастіше застосовуються перетворювачі частоти з ланкою постійного струму на базі некерованого випрямляча й автономного інвертора напруги з ШІМ-модуляцією (АН-ШІМ) з векторним [11–14, 17–19] або скалярним [15] управлінням. У [16] застосовується дволанковий безпосередній перетворювач частоти з активним випрямлячем і АН-ШІМ. Слід зазначити, що для адекватної імітації схеми СНП повинні дозволяти реалізовувати як статичні, так і динамічні режими роботи ВТ (пуск, розгін, гальмування), але більшість запропонованих схем не дозволяє імітувати всі можливі режими роботи ВТ.

Для оцінки адекватності процесу імітації поведінки системи «ВТ–ЕО ВЕУ» необхідно також точно відтворювати характеристики й режими роботи генеруючої системи в лабораторних умовах. Проте цьому питанню не приділяється достатньо уваги. У проаналізованих роботах як навантаження ІВТ застосовуються спрощені схеми генеруючих систем. У роботі [17], наприклад, така система побудована на базі асинхронного генератора, у [3, 16] – асинхронного генератора з фазним ротором, у [4, 5, 12, 15] – синхронного генератора, у [6, 8, 13, 14] – синхронного генератора з постійними магнітами, у [9, 11] – генератора постійного струму. У роботі [7] запропоновано імітацію поведінки генератора за допомогою динамометра.

Особливості розробки програмно-управляючої системи ІВТ

Одним із найважливіших завдань у синтезі ІВТ є розробка точної моделі ВТ з урахуванням усіх можливих її режимів роботи.

У статичних режимах робота вітротурбіни описується сімейством механічних характеристик у вигляді залежності моменту (M_{BT}) або механічної потужності (P_{BT}) ВТ від кутової швидкості обертання ВТ (ω_{BT}) або кількості обертів ВТ (n_{BT}) при різних

значеннях швидкості вітру (V_B) (рис. 3,а), або у спрощеній формі – залежності коефіцієнта потужності (C_p) від коефіцієнта швидкохідності (Z) (рис. 3,б). Так, на рис. 3 [12] зображено статичні характеристики для горизонтальної вітротурбіни потужністю 3 кВт із трьома жорсткозакріпленими лопатями і радіусом ротора 45 м.

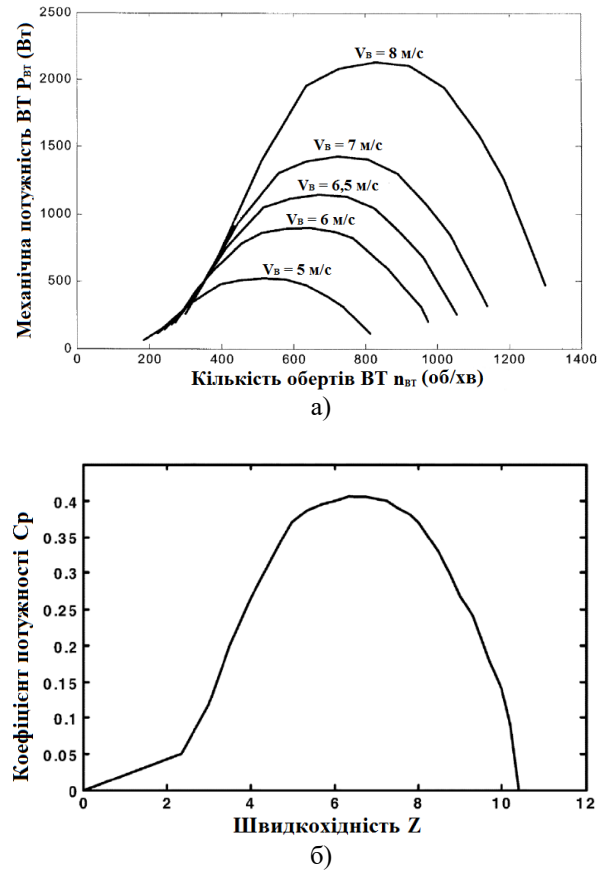


Рисунок 3 – Статична характеристика ВТ потужністю 3 кВт: а) $P_{BT}(n_{BT})$; б) $C_p(Z)$

У статичному режимі роботи передбачається, що при зміні швидкості вітру відбувається зміна відповідної механічної характеристики. Тобто ВТ постійно працює в усталеному режимі й при зміні швидкості вітру миттєво переходить з одного усталеного стану в інший. При цьому мається на увазі, що швидкість вітру змінюється досить повільно.

У роботах [15, 20] показано системи, які імітують тільки статичні режими роботи ВТ. Але при роботі ВТ у реальних вітрових умовах виникають динамічні ефекти, які суттєво впливають на її вихідні параметри й тому повинні бути враховані для підвищення адекватності процесу імітації. Серед таких ефектів виділяють: інерційність системи, градієнт швидкості вітру, ефект «затінення» вежі ВТ, неідеальність механічної передачі ВТ та пружність валу.

Інерційність системи (inertia effect), обумовлена її маховими масами, призводить до появи динамічного моменту на валу ВТ через постійне знаходження ВТ у стані перехідного процесу. Це явище обмежує швидкодію реакції системи на зміну умов вітру

[7] і, відповідно, впливає на частотну характеристику системи, а тому враховується при розробці програмно-управляючої системи переважної кількості систем імітації вітротурбін [3, 4, 7, 8, 10–14, 16, 17].

Аналітичний вираз для механічного моменту, який необхідно відтворювати на валу електродвигуна імітатора, може бути отриманий при аналізі кінематичної схеми ВЕУ (рис. 4,а) і системи ІВТ (рис. 4,б).

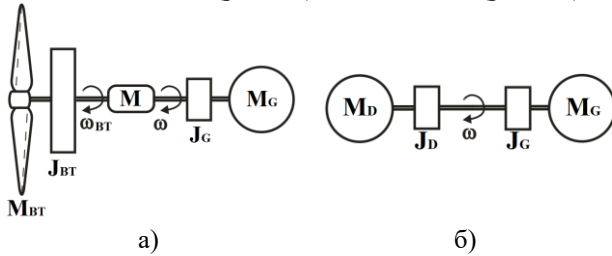


Рисунок 4 – Кінематична схема: а) ВЕУ; б) системи імітації ВТ

Для ВЕУ момент на валу ВТ при врахуванні мультиплікатора знаходиться як

$$\frac{M_{BT}}{K_M} - \frac{J_{BT}}{K_M^2} \frac{d\omega}{dt} = M_G + J_G \frac{d\omega}{dt} = M_I, \quad (1)$$

де J_{BT} , J_G , M_{BT} , M_G – моменти інерції [кг·м²], статичні механічні моменти [Н·м] вітротурбіни та генератора відповідно; ω – кутова швидкість [рад/с] на валу; K_M – коефіцієнт передачі мультиплікатора.

Вираз (1) є математичним описом моменту імітації M_I , який визначається не тільки статичним механічним моментом ВТ, а й її динамічним моментом. Проте при визначенні моменту завдання для імітатора окрім моменту імітації необхідно враховувати динаміку ІВТ.

Для системи ІВТ при заміні ВТ і мультиплікатора (М) електроприводом повний момент на валу двигуна імітатора знаходиться як

$$M_D - J_D \frac{d\omega}{dt} = M_G + J_G \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

де J_D , M_D – момент інерції [кг·м²] і механічний момент [Н·м] на валу двигуна імітатора.

Приврівнявши ліві частини (1) і (2) і виразивши момент на валу двигуна M_D , отримаємо:

$$M_D = \frac{M_{BT}}{K_M} - \frac{d\omega}{dt} \left(\frac{J_{BT}}{K_M^2} - J_D \right). \quad (3)$$

Вираз (3) описує момент завдання для ЕП імітатора, який враховує динаміку ВТ і електродвигуна ІВТ.

Ефект «затінення» вежі ВТ (tower shadow effect) виникає внаслідок гальмування вежею вітротурбіни набігаючого вітрового потоку, що призводить до виникнення в околиці вежі області (рис. 5,а, сектор S), яка надає додатковий опір проходженню лопатей. Механічний момент ВТ (M_{BT}) із жорстко-закріпленими лопатями й урахуванням ефекту «затінення» вежі визначається як

$$M_{BT} = M'_{BT}(\omega_{BT}, V_B) - M_{EB}(k\omega_{BT}t), \quad (4)$$

де $M'_{BT}(\omega_{BT}, V_B)$, $M_{EB}(k\omega_{BT}t)$ – статичний момент вітротурбіни без урахування ефекту «затінення» вежі й момент, що враховує зниження моменту ВТ за рахунок зазначеного ефекту (кратний кількості лопатей – k) відповідно, [Н·м]. Це явище призводить до появи пульсацій аеродинамічного моменту вітротурбіни, кратних кількості її лопатей (рис. 6) [5, 6, 10–12, 16–18].

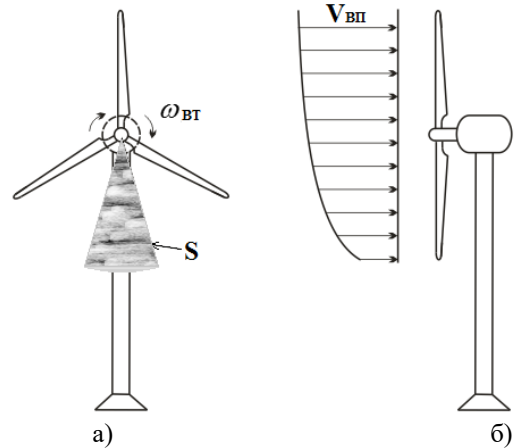


Рисунок 5 – Вітротурбіна: а) пояснення ефекту «затінення» вежі; б) пояснення градієнта швидкості вітрового потоку

Сутність явища градієнта швидкості вітрового потоку (gradient effect, wind shear effect) полягає в тому, що внаслідок залежності швидкості вітру від висоти кожна лопать, а також кожна її ділянка будуть у процесі обертання перебувати в різних вітрових умовах (рис. 5,б). Наближено ця залежність може бути описана за допомогою виразу

$$V_1 = V_0 (h_1/h_0)^\beta, \quad (5)$$

де V_1 , V_0 – швидкість вітрового потоку на висоті h_1 та відома швидкість вітру на висоті h_0 відповідно, [м/с]; β – коефіцієнт, урахувуючий особливості місцевості. Це явище також призводить до пульсацій вихідного моменту [5, 6, 12, 16–18].

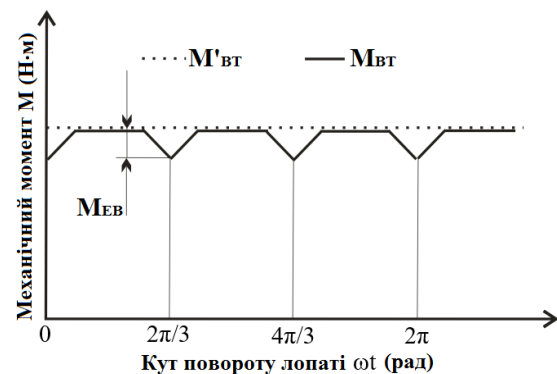


Рисунок 6 – Пульсації моменту ВТ, спричинені ефектом «затінення вежі»

Існують моделі, які окрім інерційності системи також урахують механічні ефекти більш високого порядку, такі як неідеальність механічної передачі ВТ (gearbox inertia) та пружність вала (shaft elasticity) [3, 10], адже характеристики вала можуть істотно впливати на вихідні параметри вітрогенератора. У цьому випадку механічна система «ВТ–генератор ВЕУ» зазвичай розглядається як двомасова або тримасова залежно від того, скільки значних механічних компонентів включено в модель [7].

Кінематичну схему такої системи (рис. 7) з урахуванням дисипативних сил умовно можна розділити на елементи, які працюють на малій швидкості вітроколеса (ВТ–вал–мультиплікатор), а також елементи, що працюють на високій швидкості генератора (мультиплікатор–вал–генератор ВЕУ). ВТ надана у схемі за допомогою моменту інерції J_{BT} й аеродинамічного моменту M_{BT} , що розвивається. Вплив (пружність) вала враховано за допомогою коефіцієнта жорсткості (K) і коефіцієнта демпфування (B). Мультиплікатор (M) надано як ідеальна передача. Генератор (G), відповідно, наданий моментом інерції J_G і механічним моментом M_G .

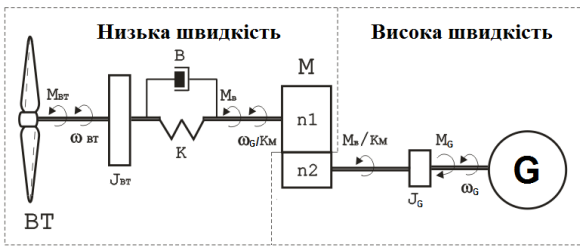


Рисунок 7 – Кінематична схема ВЕУ

Поведінка такої системи описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} J_{BT} \frac{d\omega_{BT}}{dt} = M_{BT} - M_B; \\ J_G \frac{d\omega_G}{dt} = M'_B - M_G; \\ M_B = K(\varphi_{BT} - \varphi_G/K_M) + B(\omega_{BT} - \omega_G/K_M); \\ \omega_{BT} = \frac{d\varphi_{BT}}{dt}; \\ \omega_G = \frac{d\varphi_G}{dt}, \end{cases} \quad (6)$$

де φ_{BT} , φ_G – кут повороту вала ВТ і генератора відповідно, [рад].

Очевидно, що, залежно від типу ВТ, буде змінюватися ступінь впливу кожного з динамічних ефектів на її вихідні параметри. Дослідження такого впливу є окремою актуальною задачею в контексті розробки адекватної математичної моделі ВТ. Критерієм оцінки в даному випадку може виступати якість процесу імітації.

Як вже зазначалося, вхідними параметрами для блоку ММВТ (рис. 2) у загальному випадку є швидкість вітрового потоку ($V_B(t)$) і кут установки лопатей ВТ (β).

Швидкість вітрового потоку задається за допомогою генератора швидкості вітру (ГШВ). Залежно від завдань імітації, ГШВ може реалізовувати різні способи завдання швидкості вітру. Так, виділяють завдання:

- 1) у ручному режимі [4, 10–12, 19] (рис. 8,а);
- 2) у режимі програмного симулятора:
 - шляхом генерації програмно заданої послідовності збурюючих впливів [3, 5–9, 11, 13–18, 20] (рис. 8,б);
 - шляхом моделювання характеристик вітрового потоку за допомогою ймовірнісних методів на основі результатів статистичних вимірювань у зазначеній місцевості. Для цих цілей, як правило, застосовуються дві ймовірнісні моделі у вигляді спектра Ван дер Ховена [11] (рис. 8,в) та розподілу Вейбула [2] (рис. 8,г). До переваг першого способу слід віднести врахування не лише амплітуди, а й тривалості поривів вітрового потоку.

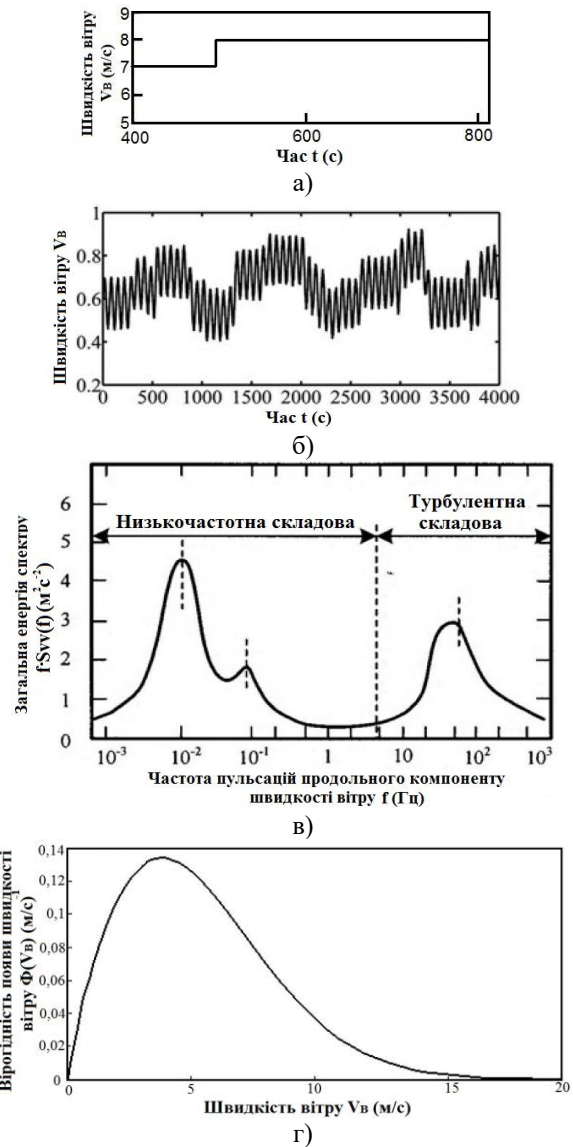


Рисунок 8 – Завдання швидкості вітру: а) вручну; б) програмно задана послідовність збурюючих впливів; в) спектр Ван дер Ховена; г) розподіл Вейбула

Крім того, можливе безпосереднє підключення до ІВТ датчика швидкості вітру (ДШВ). При цьому блок генерації виконує функцію узгодження сигналів.

У більшості робіт, як правило, застосовується один з указаних способів завдання параметрів вітрового потоку. Проте гнучкий підхід у питанні імітації параметрів вітрового потоку дозволяє суттєво підвищити ефективність застосування систем імітації при дослідженнях систем ЕО ВЕУ, починаючи від вивчення поведінки ВТ у реальних вітрових умовах і закінчуючи прогнозуванням її виробітку в конкретному місці встановлення.

Питання завдання кута установки лопатей (β) лежить виключно у площині відтворення режимів роботи системи ЕО ВЕУ та її системи управління в лабораторних умовах. Слід відзначити, що в системах з аеродинамічним регулюванням підтримання коефіцієнта перетворення ВТ оптимальним при значеннях швидкості вітру між пусковою й номінальною ($V_{\text{пуск}} \leq V_B < V_{\text{ном}}$) та обмеження потужності на валу вітротурбіни при значеннях швидкості вітру між номінальною й буремною ($V_{\text{ном}} \leq V_B < V_{\text{бур}}$) здійснюється шляхом зміни положення лопатей вітротурбіни і, як наслідок, зміни її механічної характеристики. У системах без аеродинамічного регулювання процес регулювання в цих двох режимах здійснюється при фіксованому положенні лопатей вітротурбіни з її постійною механічною характеристикою при заданій швидкості вітру за рахунок узгодження механічних характеристик вітротурбіни й генеруючої системи.

Так, у роботах [5, 8–12, 14, 15, 17–20] у ПУС імітаторів використані математичні моделі ВТ з жорсткозакріпленими лопатями, а в [3, 4, 6, 7, 13, 16] – з лопатями з аеродинамічним регулюванням. По суті, ІВТ для імітації поведінки ВТ з жорсткозакріпленими лопатями є окремим випадком більш універсальних систем для імітації поведінки ВТ з регульованими лопатями.

На основі вхідних параметрів блок ММВТ формує сигнал завдання для здійснення процесу імітації. Регулятор (Р) здійснює управління електромеханічною частиною імітатора ВТ шляхом відпрацювання сигналу завдання ($y_{\text{зад}}$) із заданою точністю й швидкодією. Слід зазначити, що у проаналізованих системах здебільшого застосовуються класичні регулятори з пропорційно-інтегральним (ПІ) [3, 4, 8–10, 12, 15, 18, 20] або пропорційно-інтегрально-диференціюючим (ПІД) [5, 7, 13] законом управління.

Тенденції розробки систем імітації ВТ

Виходячи з проведеного аналізу, можна систематизувати підходи й виділити наступні тенденції розробки сучасних систем імітації ВТ.

1. Побудова САУ ІВТ на основі електроприводу постійного або змінного струму за принципом управління механічним моментом.

2. Застосування автоматизованого ЕП на базі двигуна постійного струму з незалежним збудженням, асинхронного двигуна з короткозамкненим

ротором або синхронного двигуна з постійними магнітами.

3. Застосування наступних комбінацій СНП залежно від типу використаної електричної машини: нереверсивного керованого випрямляча або сполучення НВ–ІШП для ЕП постійного струму; ПЧ на основі АІН–ІШМ з різними типами випрямляючих схем (НВ або АВ) для ЕП змінного струму.

4. Спрощене надання систем ЕО ВЕУ як навантаження ІВТ.

5. Побудова математичної моделі ВТ з урахуванням динамічних ефектів, які мають місце при роботі вітротурбіни в реальних умовах.

6. Завдання в ПУС сімейства статичних характеристик за допомогою залежності $C_p(Z)$, яка в тому числі дозволяє враховувати аеродинамічне регулювання лопатей.

7. Використання, як правило, одного з можливих підходів у питанні моделювання параметрів вітрового потоку.

8. Застосування класичних структур регулятора у контурі управління параметром стану системи імітації.

Пропоновані напрями вдосконалення систем імітації ВТ

Виходячи зі специфіки й тенденцій розробки ІВТ, можна запропонувати наступні напрями вдосконалення систем імітації ВТ.

1. Застосування більш простих і енергоефективних схем електроприводів та принципів управління ними.

2. Вибір схем СНП з урахуванням імітації всіх можливих режимів роботи ВТ.

3. Використання як навантажень ІВТ генеруючих систем, подібних до реальних систем ЕО ВЕУ для підвищення якості процесу імітації.

4. Удосконалення математичної моделі ВТ шляхом оцінювання впливу динамічних ефектів на якість імітації.

5. Використання в ГШВ гнучких підходів при завданні параметрів вітрового потоку для підвищення ефективності застосування засобів імітації.

6. Проведення синтезу управляючого регулятора з огляду досягнення оптимальної якості процесу імітації.

ВИСНОВКИ. Проведений аналіз існуючих схем імітаторів вітротурбін дозволив систематизувати підходи до синтезу даних систем і виявити основні тенденції їх розробки. Отримані результати дозволяють оптимізувати процес проектування систем імітації режимів роботи ВТ як в плані структурного синтезу енергоефективної ЕМС та створення адекватної математичної моделі поведінки ВТ, так і підвищення ефективності використання імітаторів ВТ у цілому.

ЛІТЕРАТУРА

1. REN21. 2017 // Renewables 2017 Global Status Report. – Paris: REN21 Secretariat. – 2017.

2. Переверзев А.В., Буров А.Н. Электромеханические системы имитации ветротурбин: монография. – Запорожье: Издательство ЗГИА, 2014. – 170 с.
3. Rabelo B., Hofmann W., Gluck M. Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a DC-machine drive, IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004. – Iss. 3/2004 (3). – PP. 2107–2112.
4. Arifujjaman M., Iqbal M.T., Quaciao J.E. Development of an isolated small wind turbine emulator // The Open Renewable Energy Journal. – 2011. – Iss. 4. – PP. 3–12.
5. Monfared M., Kojabadi H.M., Rastegar H. Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor // Renew. Energy. – 2008. – Iss. 33 (5). – PP. 906–913.
6. Chinchilla M., Arnaltes S., Rodriguez-Amenedo J. Laboratory set-up for wind turbine emulation // IEEE International Conference on Industrial Technology. – 2004. – Iss. 1. – PP. 553–557.
7. Hardy T., Jewell W. Emulation of a 1.5 Mw wind turbine with a dc motor // Power and Energy Society General Meeting. – 2011. – PP. 1–8.
8. Tatsuta F., Takahashi S., Suzuki K., Nishikata S. A wind turbine simulator for adjusting the moment of inertia of a wind power generation system using a DC motor // Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2013. – PP. 214–217.
9. Kariyawasam K.K.M.S., Karunarathna K.K.N.P., Karunarathne, R.M.A. et al. Design and development of a wind turbine simulator using a separately excited DC motor // Smart Grid and Renewable Energy. – Iss. 4/2013 (03). – P. 259.
10. Lopes L.A.C., Lhuillier J., Mukherjee A., Khokar M.F. A Wind Turbine Emulator That Represents the Dynamics of the Wind Turbine Rotor and Drive Train // 36th IEEE Conference on Power Electronics Specialists. – 2005. – PP. 2092–2097.
11. Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S. Development of a Wind Turbine Simulator For Wind Generator Testing // Int. Energy J. – 2007. – Iss. 8. – PP. 21–28.
12. Hossein M.K., Liuchen Ch. Wind Turbine Simulators, Wind Turbines. – 2011. – ISBN: 978-953-307-221-0, InTech.
13. Devbratta Th. Jiang J. Design and Construction of a Wind Turbine Simulator for Integration to a Microgrid with Renewable Energy Sources // Electric Power Components and Systems. – (2017). – DOI: 10.1080/15325008.2017.1311385
14. Yun D., Han B., Choi N. Hardware simulator for PMSG wind power system with matrix converter // In Telecommunications Energy Conference. – 2009. – PP. 1–6.
15. Mohod S.W., Aware M.V. Laboratory development of wind turbine simulator using variable speed induction motor // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2011. – Iss. 3(5).
16. Abo-Khalil A.G. A new wind turbine simulator using a squirrel-cage motor for wind power generation systems // In Power Electronics and Drive Systems (PEDS). – 2011. – PP. 750–755. – IEEE Ninth International Conference
17. Dolan D.S.L. Lehn P.W. Real time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies // Proc. International Conference on Power Systems Transients. – 2005. – PP. 1–6.
18. Hu W., Wang Y., Song X., Wang Z. Development of wind turbine simulator for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous motor // Proc. of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2008. – PP. 2322–2326.
19. Ke X., Minqianq H., Yan, Y.R., Du W. Wind turbine simulator using PMSM // Proc. of the Power Engineering Conference. – 2007. – PP. 732–737
20. Yang L., Yan S., Chen Z., Liu W. A Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Permanent Magnet Synchronous Motor // Electrical Machines and Systems (ICEMS). – 2013. – PP. 2156–2158).

DEVELOPMENT TRENDS AND IMPROVEMENT WAYS OF A WIND TURBINE SIMULATION SYSTEMS

A. Burov

Zaporozhtransformator PJSC

vul. Dneprovskoe Shosse, 3, 69600, Zaporozhe, Ukraine. E-mail: o.m.burov@i.ua

N. Vlasiuk

Zaporizhia State Engineering Academy

prosp. Sobornyi, 226, Zaporizhia, 69006, Ukraine. E-mail: vlasiuk.nn@gmail.com

Purpose. To systematize the approaches to synthesis of wind turbine simulators and to develop the recommendations for the improvement of these systems. **Methodology.** Based on a comprehensive literature review, the generalized structure of a wind turbine simulation system is presented. The principle of work of wind turbine simulators is described. Designing features of an electromechanical system and a software-control system are analyzed. **Results.** Trends of designing of a wind turbine simulators are presented and improvement ways for these systems are developed. In most wind turbine simulators are constructed on the basis of torque controlled direct current or alternating current electric drive with simplified generating system of wind power plants as a load. Usually separately excited direct current motor driven by a controlled rectifier, or induction motor driven by a frequency converter can be used to reproduce the static and dynamic characteristics of real wind turbines. Wind turbines mathematical models usually takes into consideration dynamic effects of wind turbine like inertia effect, tower shadow effect, gradient effect, gearbox inertia and shaft elasticity to varying degrees without analysis of influence on simulation quality. The power-speed pattern of the wind can

be generated from the data based on the Van der Hoven power spectrum or Weibull distribution, from the actual recorded wind speed data or from manual set up. **Originality.** The complex analysis of the features of the structural synthesis of wind turbine simulation systems is carried out and recommendations for improving the construction and effectiveness of use of wind turbine simulators are developed. **Practical value.** The obtained results allow to optimize the process of designing wind turbine simulators. References 20, figures 8.

Key words: wind turbine simulator, electromechanical system, software-control system, wind turbine mathematical model, parameters of the wind flow.

REFERENCES

1. REN21 (2017), Global Status Report, *REN21 Secretariat*, Paris.
2. Pereverzev, A.V. and Burov, A.N. (2014), *Elektromekhanicheskiye sistemy imitatsii vetroturbin* [Electromechanical systems of wind turbine simulation], ZSEA, Zaporizhia. (in Ukrainian)
3. Rabelo, B., Hofmann, W. and Gluck, M. (2004), "Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a DC-machine drive", *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 3, pp. 2107–2112.
4. Arifujjaman, M., Iqbal, M.T. and Quaciao, J.E. (2011), "Development of an isolated small wind turbine emulator", *The Open Renewable Energy Journal*, Vol. 4, pp. 3–12.
5. Kariyawasam, K.K.M.S., Karunarathna, K.K.N.P., Karunarathne, R.M.A. et al. (2013), "Design and development of a wind turbine simulator using a separately excited DC motor", *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 4, no. 3, pp. 259–265.
6. Chinchilla, M., Arnaltes, S. and Rodriguez-Amenedo, J. (2004), "Laboratory set-up for wind turbine emulation," *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vol. 1, pp. 553–557.
7. Hardy, T. and Jewell, W. (2011), "Emulation of a 1.5 Mw wind turbine with a DC motor", *Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–8.
8. Tatsuta, F., Takahashi, S., Suzuki, K. and Nishikata, S. (2013), "A wind turbine simulator for adjusting the moment of inertia of a wind power generation system using a DC motor", *Electrical Machines and Systems*, pp. 214–217.
9. Monfared, M., Kojabadi, H.M. and Rastegar, H. (2008), "Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor", *Renew. Energy*, Vol. 33, no. 5, pp. 906–913.
10. Lopes, L.A.C., Lhuillier, J., Mukherjee, A. and Khokar, M.F. (2005), "A wind turbine emulator that represents the dynamics of the wind turbine rotor and drive train", *36th IEEE Conference on Power Electronics Specialists*, pp. 2092–2097.
11. Neammanee, B., Sirisumrannukul, S. and Chatratana, S. (2007), "Development of a wind turbine simulator for wind generator testing", *Int. Energy J.*, Vol. 8, pp. 21–28.
12. Kojabadi, H.M. and Chang, L. (2011), "Wind Turbine Simulators", *Wind Turbines*, ISBN: 978-953-307-221-0, InTech.
13. Thakur, D. and Jiang, J. (2017), "Design and Construction of a Wind Turbine Simulator for Integration to a Microgrid with Renewable Energy Sources", *Electric Power Components and Systems*, pp. 1–15.
14. Yun, D., Han, B. and Choi, N. (2009), "Hardware simulator for PMSG wind power system with matrix converter", in *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2009. 31st International*, pp. 1–6.
15. Mohod, S.W. and Aware, M.V. (2011), "Laboratory development of wind turbine simulator using variable speed induction motor", *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, no. 5, pp. 73–82.
16. Abo-Khalil, A.G. (2011), "A new wind turbine simulator using a squirrel-cage motor for wind power generation systems", *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), IEEE Ninth International Conference*, pp. 750–755.
17. Dolan, D.S.L. and Lehn, P.W. (2005), "Real time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies," *Proc. International Conference on Power Systems Transients*, pp. 1–6.
18. Hu, W., Wang, Y., Song, X. and Wang, Z. (2008), "Development of wind turbine simulator for wind energy conversion systems based on permanent magnet synchronous motor," *Proc. of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 2322–2326.
19. Ke, X., Minqianq, H., Yan, Y.R. and Du, W. (2007), "Wind turbine simulator using PMSM," *Proc. of the Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 732–737.
20. Yang, L., Yan, S., Chen, Z. and Liu, W. (2013), "A Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Permanent Magnet Synchronous Motor", *Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference*, pp. 2156–2158.

Стаття надійшла 02.09.2017.