

International Ukraine-Poland Seminar

**Power quality in distribution networks with distributed generation**

Kiev, July 4-5, 2019

---

---

DOI: 10.32073/iepl.2019.04

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ  
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИНОСОЇДНОСТІ І КОЛИВАНЬ  
НАПРУГИ**

**Юрій Саєнко, Андрій Молчан**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Abstract: A model of a wind power plant in Simulink package has been developed as a source of voltage distortions and voltage fluctuations. Simulation of modern mechanical transformation system of wind turbine, which includes turbine, transmission and control system, is described. Four types of transmission models based on the Multi-body System approach are considered, the choice of a two-mass model of wind turbine transmission system is justified. Simulation of electrical transformation system of variable speed wind turbine models with partial scale frequency conversion, which includes generator, frequency converter and converter control system, is described..

## 1. ВСТУП

Світовою тенденцією розвитку енергетики в даний час є концепція розподіленої генерації, що означає перехід від централізованої системи електропостачання до комбінованої. Дана концепція, поряд з позитивним впливом, пов'язаним зі зниженням шкідливих викидів в атмосферу, зниженням втрат електроенергії за рахунок максимального наближення таких джерел безпосередньо до споживачів, підвищенням ступеня резервування електропостачання і т.п., може мати негативний вплив на існуючу систему електропостачання за рахунок застосування нелінійних і різкозмінних джерел електроенергії, до яких відносяться вітроустановки.

Підключення вітрових електростанцій (ВЕС) до «слабкої» мережі може призвести до погіршення якості напруги за рахунок виникнення значних коливань напруги (флікера), викликаних змінним характером генерації активної потужності. При цьому можуть виникати також і періодичні коливання механічного моменту на валу, які можуть привести до значних перешкод в точці підключення до енергосистеми [1]. Дані коливання безпосередньо залежать від характеру зміни вітрового потоку, як від збурюючого впливу для вітроустановки, тобто будь-які коливання вітру будуть

відобразитися в посиленій формі на механічній потужності, переданій на вал турбіни, і звідти на вихід генератора [2, 3].

У даній роботі, для детального дослідження режимів роботи і аналізу впливу вітроустановок на якість електроенергії в графічному середовищі Simulink була розроблена імітаційна модель вітрової електростанції на базі асинхронного генератора подвійного живлення, як джерела несинусоїдності і коливань напруги, тому що даний тип вітроустановок є найбільш поширеним (більше 60 % світового ринку) [2, 3].

Імітаційна модель вітрової електростанції складається з моделі розподільної мережі 110/35 кВ, 35/0.69 кВ, моделі вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти, і блока, який задає збурюючий вплив для системи, тобто задає характеристики вітрового потоку.

Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink наведена на рис. 1 і представляє собою джерело змінної напруги 110 кВ, знижувальну підстанцію 110/35 кВ, підстанцію 35/0.4 кВ до якої підключене навантаження 2 МВА і підстанцію 35/0.69 кВ до якої підключена вітрова електростанція.

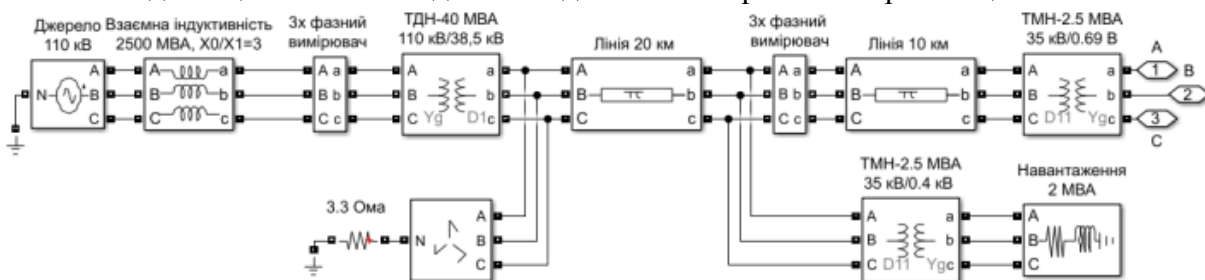


Рисунок 1 – Модель розподільної мережі в графічному середовищі Simulink

Модель вітроустановки в графічному середовищі Simulink представлена у вигляді двох систем перетворення:

1. Механічне перетворення – перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічний крутний момент на валу ротора генератора;
2. Електричне перетворення – перетворення крутного моменту на валу ротора генератора в електричну енергію, що віддається в мережу.

## 2. МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Сучасні системи механічного перетворення для всіх типів вітроустановок є практично однаковими і включають в себе: турбіну, трансмісію і систему керування. Відмінність може полягати у відсутності трансмісії. На рис. 2 наведена модель механічної системи перетворення в графічному середовищі Simulink.

Для моделювання роботи турбіни використовується рівняння (1), яке описує процес отримання енергії повітряного потоку [4]

$$P_M = \frac{\rho}{2} A_R V_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

де  $P_M$  – механічна потужність турбіни (Вт);  $\rho$ , – щільність повітря ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $V_w$  – швидкість вітру (м/с);  $A_R$  – ометаєма площа несучого гвинта ( $\text{м}^2$ );  $c_p$  – коефіцієнт продуктивності турбіни;  $\lambda$ ,  $\beta$  – швидкохідність турбіни і кут нахилу лопаті (град).

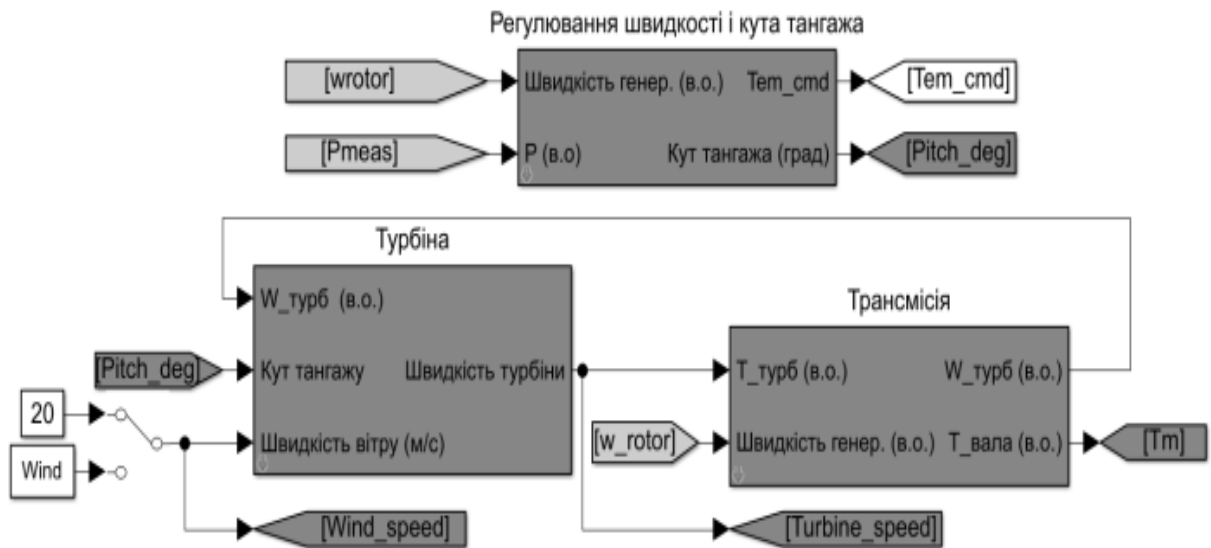


Рисунок 2 – Модель системи механічного перетворення в Simulink

Залежність  $c_p(\lambda, \beta)$  відображає енергетичну характеристику продуктивності турбіни. Для моделювання дану характеристику можна апроксимувати аналітичної функцією (2) [5].

$$c_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda_i}} \quad (2)$$

де  $c_1 = 0.5$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 0$ ,  $c_5 = 5$ ,  $c_6 = 21$ .

На рис. 3 наведені характеристики  $c_p - \lambda$  для різних значень кута тангажу  $\beta$ .

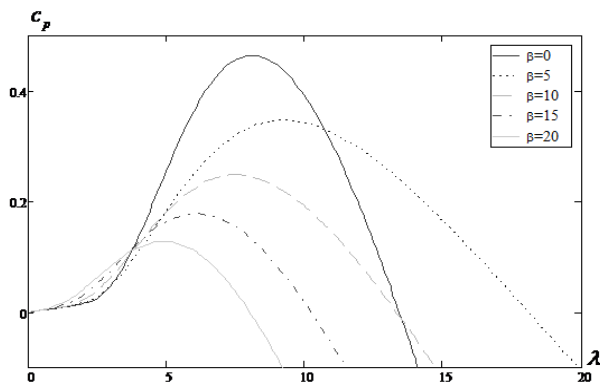


Рисунок 3 – Апроксимація характеристик  $c_p - \lambda$

Швидкість обертання ротора турбіни значно менше, ніж швидкість обертання генератора, тому в вітроустановках з регульованою швидкістю обертання частковим перетворенням частоти використовують трансмісію. Термін «трансмісія» охоплює всі деталі, що обертаються вітроустановки: ротор турбіни, систему редукторів, ротор генератора, і служить для збільшення низькою кутової швидкості ротора турбіни до необхідної швидкості генератора [1].

Основними компонентами трансмісії є маточина ротора, редуктор і високошвидкісні і тихохідні вали. Модель для опису всієї системи трансмісії вітроустановки може бути змодельована з використанням так званого підходу Multi-body System (MBS), тобто простим з'єднанням моделей окремих підсистем. В даний час існує чотири типи моделей трансмісії [5]: шестимасова, тримасова, двомасова, одномасова модель.

Модель з шістьма масами складна для моделювання, однак вона найбільш детально відображає процеси, що відбуваються в трансмісії (рис. 4) і включає в себе:

– шість інерцій:  $H_{B1}, H_{B2}, H_{B3}, H_H, H_{GB}$  и  $H_G$  лопатей, маточини, коробки передач і генератора відповідно;

– шість кутових швидкостей:  $\square_{B1}, \square_{B2}, \square_{B3}, \square_H, \square_{GB}$  и  $\square_G$  лопатей, маточини, коробки передач і генератора відповідно;

– шість кутових положень:  $\theta_{B1}, \theta_{B2}, \theta_{B3}, \theta_H, \theta_{GB}$  и  $\theta_G$  лопатей, маточини, коробки передач і генератора відповідно.

У даній моделі враховується:

– жорсткість між сусідніми масами, які виражаються постійними пружин  $K_{HB1}, K_{HB2}, K_{HB3}, K_{HGB}, K_{GBG}$

– взаємне демпфірування між сусідніми масами  $d_{HB1}, d_{HB2}, d_{HB3}, d_{HGB}$  и  $d_{GBG}$ .

– втрати крутного моменту від зовнішніх демпфуючих елементів окремих мас  $D_{B1}, D_{B2}, D_{B3}, D_H, D_{GB}$  и  $D_G$ .

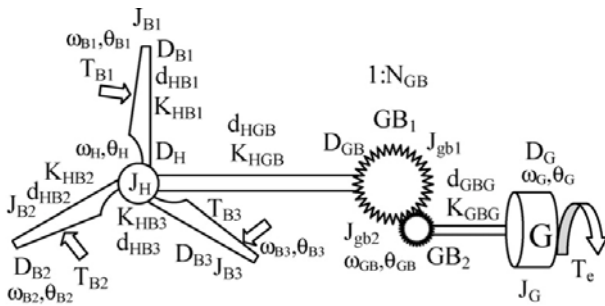


Рисунок 4 – Шестимасова структурна модель

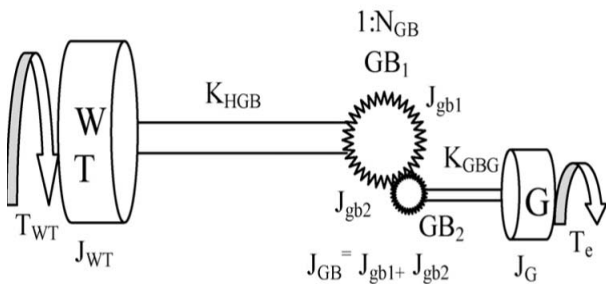


Рисунок 5 – Тримасова структурна модель

Для шестимасової моделі необхідно знати крутний момент генератора  $T_e$  і три окремих аеродинамічних крутних моментів, що діють на кожну лопать  $T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}$ . Сума моментів, що крутять лопаті розвиває крутний момент турбіни,  $T_{wt}$ . Передбачається, що аеродинамічні моменти, що діють на маточину і коробку передач, дорівнюють нулю.

Модель з трьома масами (рис. 5) є спрощеною моделлю шестимасової і модель складається з турбіни, коробки передач і генератора. У даній моделі інерція турбіни розраховується за сукупною масою трьох лопатей і маточини, тому взаємне демпфірування між маточиною модель і лопатями ігнорується, а окремий розподіл крутного моменту лез не може розглядатися. Замість цього передбачається, що турбіна з трьома лопатями має рівномірний розподіл ваги для простоти, тобто крутний момент турбіни  $T_{wt}$

вважається рівним сумі крутного моменту, що діє на три лопаті. Тому турбіна може бути прийнята за великий диск з невеликою товщиною.

Якщо необхідні дані відсутні, формулу (3) можна використовувати для приблизної оцінки моменту інерції  $J$  маси диска з малою товщиною. Аналогічно, інерція генератора і коробки передач може бути розрахована приблизно за їх діаметром і масою

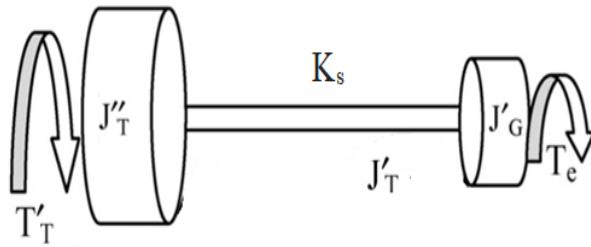
$$J = \frac{MD_d^2}{8}, \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (3)$$

де  $D_d$  – діаметр диска,  $M$  – вага диска.

Жорсткість валу розраховується за формулою (4)

$$K = \frac{M\pi D_{sh}^4}{32L}, \text{Н} \cdot \text{м} / \text{рад} \quad (4)$$

Тримасова модель може бути перетворена в двомасову модель (рис. 6) шляхом додавання мас двох дисків і з'єднання двох дисків з еквівалентною жорсткістю валу.

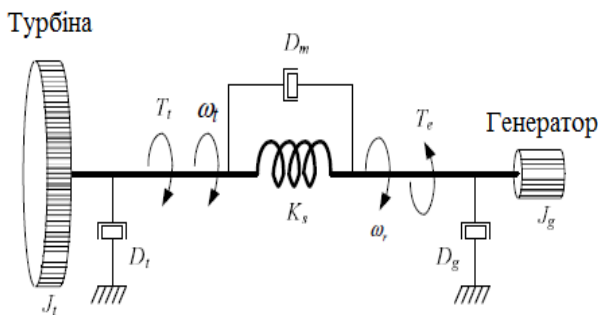


Еквівалентна жорсткість валу двомасової моделі  $K_s$  визначається за формулою (5).

$J''_T$  та  $J'_G$  представляють Рисунок 6 – Двомасова структурна модель еквівалентний момент маси інерції вітротурбіни і генератора відповідно [5]

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{\left(\frac{K_{HGB}}{N_{GB}^2}\right)} + \frac{1}{K_{GBG}} \quad (5)$$

В одномасовій моделі жорсткість валу і демпфірування ігноруються, а всі компоненти трансмісії згруповані разом і працюють як один обертовий елемент. Однак таке спрощене уявлення динаміки процесів між турбіною і генератором, з'єднаних один з одним за допомогою валу, не дозволяє провести аналіз стійкості, що може привести до неточних результатів.



При аналізі роботи трансмісії у вітроустановках, згідно [6], для моделювання взаємозв'язку між високою і низькою швидкістю валу досить використовувати механічну двомасову модель. Дана модель (рис. 7) являє собою два диски, з'єднані пружиною з певною жорсткістю  $K_s$  і демпфером  $D_m$ . Ротор турбіни і генератор представлені коефіцієнтами інерції  $H_t$  і  $H_g$  (6-9).

Рисунок 7 – Двомасова модель трансмісії

$$2H_t \frac{d\omega_t}{dt} = T_t - K_s(\theta_r - \theta_t) - D_m(\omega_r - \omega_t) \quad (6)$$

$$2H_g \frac{d\omega_r}{dt} = -T_e + K_s(\theta_r - \theta_t) + D_m(\omega_r - \omega_t) \quad (7)$$

$$\frac{d\theta_t}{dt} = \omega_t \quad (8)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (9)$$

де  $\omega_t$ ,  $\omega_r$  – швидкість обертання ротора турбіни і ротора генератора;  $T_t$ ,  $T_g$  – крутний момент ротора турбіни і ротора генератора;  $\theta_t$ ,  $\theta_g$  – кут ротора турбіни і генератора відповідно.

Система керування турбіною визначає і регулює швидкість генератора близько значення номінальної швидкості, згладжуючи коливання електричної потужності, викликані коливанням потужності валу турбіни. Значення номінальної швидкості

зазвичай становить 1.2 в.о, проте дана величина знижується при значеннях потужності нижче 75%. Для реалізації в моделі даної поведінки системи використовується рівняння (10)

$$\omega_{ном} = -0.67P_M^2 + 1.42P_M + 0.51 \quad (10)$$

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти представлена на рис. 8 і включає в себе: генератор, перетворювач частоти і систему керування перетворювачем.

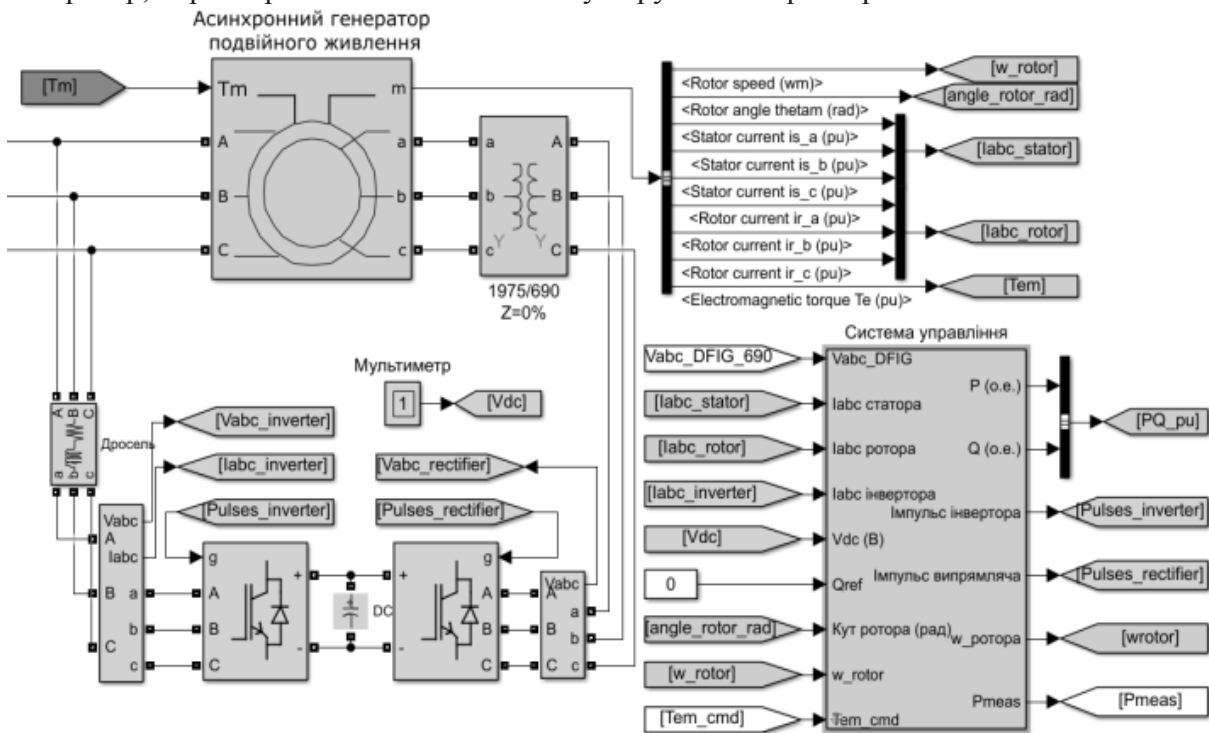


Рисунок 8 – Система електричного перетворення вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти

Особливістю даної концепції є застосування асинхронного генератора подвійного живлення (DFIG), що має роздільне живлення обмоток статора і ротора. Статор підключається безпосередньо в мережу, а ротор – через перетворювач частоти, що дає можливість керувати частотою обертання ротора. Даний принцип дозволяє регулювати швидкість вітроустановки в діапазоні  $\pm 30\%$  від синхронної швидкості генератора, відповідно потужність перетворювача значно менше, ніж в інших типах вітроустановки, і становить 25-30% від потужності генератора, що робить цю концепцію привабливою з економічної точки зору [2, 3].

Перетворювач подає напругу на затискачі ротора, забезпечуючи роботу зі змінною швидкістю і незалежне керування активною і реактивною потужністю генератора.

Залежно від амплітуди і фази напруги ротора генератор може працювати в субсинхронному або понадсинхронному режимі. У субсинхронному режимі роботи перетворювач подає живлення на ротор, а при понадсинхронному потужність ротора подається через перетворювач назад в мережу. Таким чином, потік потужності в

перетворювачі двонаправлений, отже перетворювач повинен складатися з самокомутованих напівпровідників, що дозволяють протікати потоку потужності в обох напрямках.

Модель генератора подвійного живлення аналогічна стандартній моделі асинхронного генератора з фазним ротором.

У вітроустановках з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти зазвичай використовують дворівневий перетворювач з ланкою постійного струму, що є комбінацією випрямляча з проміжною ланкою постійного струму і автономного інвертора [7, 8]. Даний перетворювач здатний генерувати потужність як в суб-, так і в понадсинхронному режимі, що дозволяє цій системі відслідковувати оптимальну швидкість у більшому діапазоні швидкостей, ніж інші типи перетворювачів [7, 8].

Модель перетворювача частоти (рис. 9) детально описує роботу перетворювача частоти на IGBT транзисторах, що дозволяє спостерігати динаміку роботи системи керування і досліджувати несинусоїдність напруги. Для досягнення прийнятної точності моделювання необхідно здійснювати з відносно малим кроком дискретизації  $\Delta t=5\text{мкс}$ .

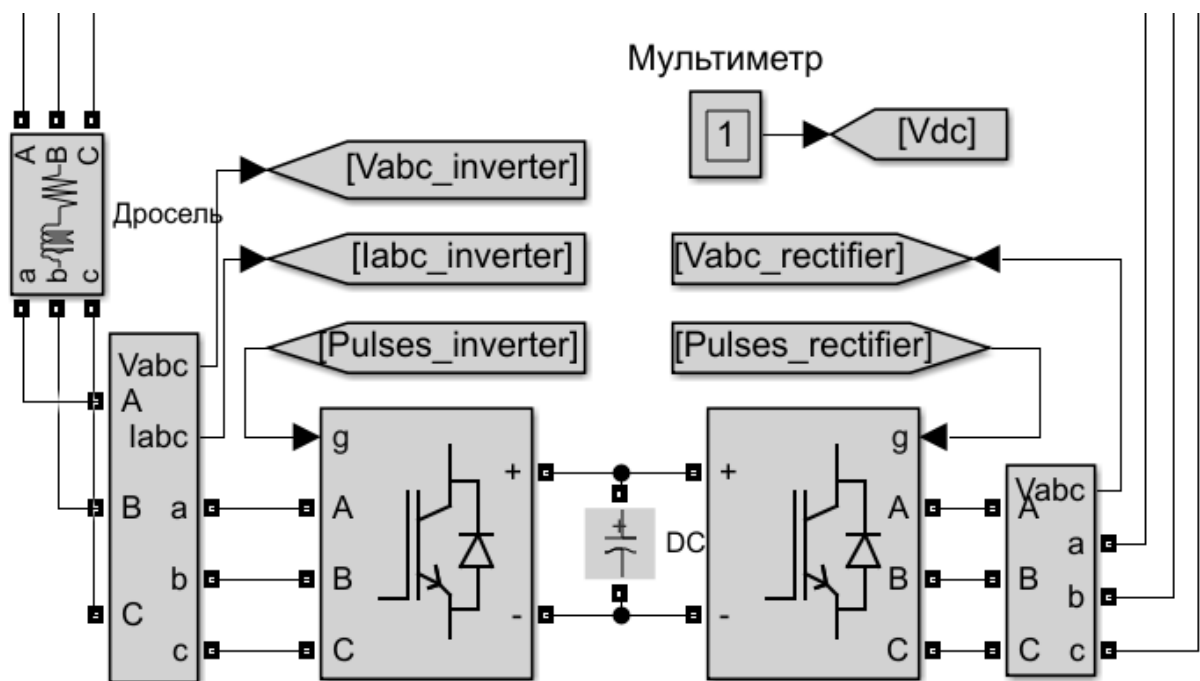


Рисунок 9 – Моделі дворівневого перетворювача частоти з ланкою постійного струму

Система керування перетворювачем реалізована за допомогою методу векторного керування в системі координат d-q окремо для системи керування випрямляча (СКВ) і системи керування інвертора (СКІ). СКІ регулює напругу ланки постійного струму і оптимізує перетікання реактивної потужності між СКВ і СКІ в сталому режимі і при збоях в мережі. СКВ контролює активну і реактивну потужність вітроустановки, і відстежує швидкість генератора для оптимальної генерації енергії в залежності від швидкості вітру.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Для досягнення прийнятної точності результатів моделювання при дослідженні несинусоїдності напруги, моделювання роботи вітроустановки в графічному середовищі Simulink здійснювалось з відносно малим кроком дискретизації  $\Delta t=5\text{мкс}$ . Приклад виміряних 3-хфазних струмів та напруг мережі на стороні 35 кВ в точці загального підключення наведено на рис. 10 у в.о..

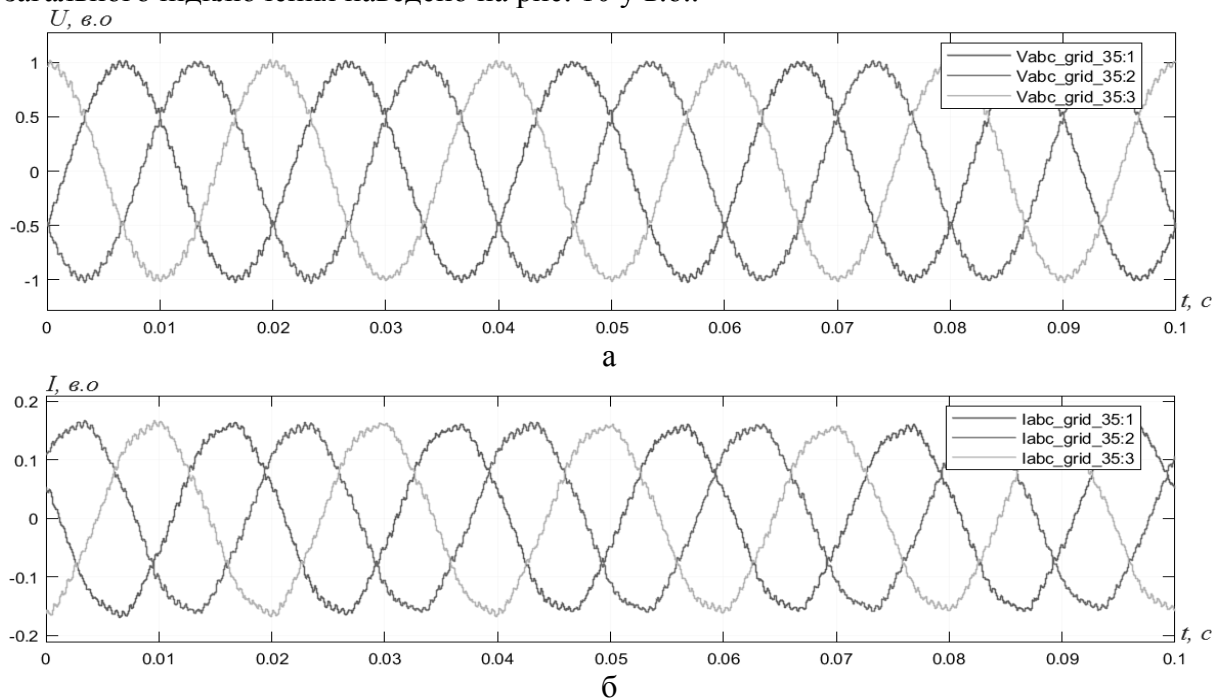


Рисунок 10 – Параметри мережі 35 кВ в точці загального підключення:  
а – 3-хфазні напруги; б – 3-хфазні струми.

На рис. 11 зображено виміряну активну та реактивну потужність вітроустановки на інтервалі часу  $t = 5\text{ c}$

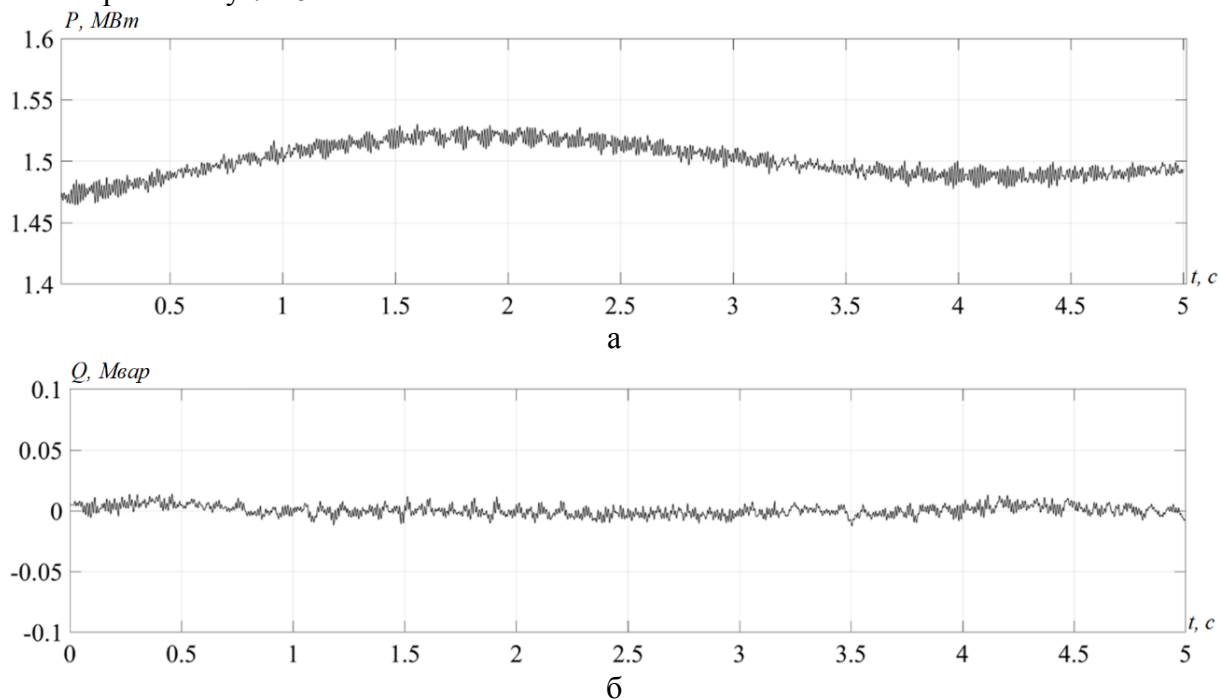


Рисунок 11 – Активна (а) та реактивна (б) потужність, вироблені вітроустановкою



Як видно з рис. 10, при роботі вітроустановки з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти виникають спотворення, як струму так і напруги мережі в точці загально підключення.

Як видно з рис. 11 змодельована система управління підтримує значення активної потужності близько 1.5 МВт, а значення реактивної потужності, виробленої вітроустановкою, близько 0 Мвар

Результати моделювання зберігаються у вигляді масиву даних в робочому просторі середовища програмування MATLAB для подальшої обробки

## 5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
2. T. Ackermann Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 691 p., 2012.
3. Саенко Ю. Л., Применение спектрально-корреляционной теории случайных процессов при моделировании работы ветрогенераторов. / Ю. Л. Саенко, А. В. Молчан // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. –2017. –. 4/2017 (40). – С. 61–67.
4. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
5. S.M. Muyeen, Md. Hasan Ali, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, Y. Tomaki, A. Sakahara and E. Sasano "Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models" IET Renew. Power Gener., 1 (2), pp. 131 –141., 2007.
6. IEC 61400-27-1:2015 Wind turbines – Part 27-1: Electrical simulation models – Wind turbines
7. F. Blaabjerg, M. Liserre, K. Ma. "Power electronics converters for wind turbine systems", IEEE transactions on industry applications, pp. 708-719, 2012.
8. F. Blaabjerg, F. Iov, Z. Chen, K. Ma. Power Electronics and Controls for Wind Turbine Systems. IEEE International Energy Conference, pp. 333-344, 2010.

**Доктор технічних наук, професор Юрій Саенко**  
ДВНЗ "Приазовський державний технічний університет"  
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна  
e-mail: yls62@i.ua

**Аспірант, Андрій Молчан**  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»  
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна  
e-mail: andre.molchan@gmail.com

