

International Ukraine-Poland Seminar

Power quality in distribution networks with distributed generation

Kiev, July 4-5, 2019

DOI: 10.32073/iepl.2019.06

**ВПЛИВ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ НА
НЕСИНУСОЇДНІСТЬ НАПРУГИ МЕРЕЖІ В ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНО
ПІДКЛЮЧЕННЯ ВІТРОУСТАНОВКИ**

Юрій Саєнко, Андрій Молчан

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Abstract: A new method for turbulent wind flow modeling has been proposed, which allows an assessment of the wind flow nature influences on the wind turbine operation. Simulation of wind turbines at the wind flow with the set parameters is done. A harmonic analysis of the wind turbine voltages was performed for various parameters of the turbulent wind flow. The dependence of total harmonic distortion in time with damping coefficient of the correlation function and wind flow standard deviation is obtained.

1. ВСТУП

В даний час спостерігається значний розвиток галузі енергетики, перетворюючої кінетичну енергію вітрового потоку в електричну енергію. Таке перетворення здійснюється за допомогою вітроустановок різної конструкції і, як правило, вони об'єднуються в вітроелектростанції (ВЕС). ВЕС включаються в загальну мережу, що призводить до поступового переходу від чисто централізованої моделі електропостачання споживачів, основою яких є потужні ТЕС і АЕС, до комбінованої.

Залежно від типу вітроустановок і, з огляду на те, що енергосистема сама має піки і провали енергоспоживання, виникають проблеми з якістю електроенергії і електромагнітною сумісністю – відхилення, коливання, несиметрія напруг, генерація вищих гармонік і інтергармонік. Наприклад, широке використання сучасних перетворювачів частоти в деяких типах вітроустановок призводить до збільшення вмісту в кривій напруги мережі вищих гармонік, субгармонік, інтергармонік і високочастотних складових напруги з частотою в декілька кГц.

Також існує декілька явищ, впливаючих на коливання напруги та дозу флікера, які зумовлені технологією ВЕС [1]:

- ефект тіні вежі: викликаний періодичним проходженням лопатей турбіни повз вежу, що призводить до спаду механічного крутного моменту при кожному проходженні;

– перемикання ВЕС: призводять до провалів напруги в розподільній мережі. Особливо гостро ця проблема виникає для вітроустановок номінальною потужністю 0.5 МВт і вище.

Значний вплив на роботу вітроустановки, зокрема на несинусоїдність напруги мережі в точці загального підключення, має турбулентний вітровий потік, як збурюючий вплив для вітроустановки, тобто будь-які коливання вітру будуть відображатись в посиленій формі на механічній потужності, переданій на вал турбіни, і звідти на вихід генератора, що призведе до коливань активної і реактивної потужності вітроустановки [2]. Згідно [3] в вітроустановках через зміни швидкості вітру виникають значні коливання вихідної потужності ВЕС, і як наслідок погіршується якість електроенергії в точці загального підключення, зокрема виникають коливання напруги.

У даній роботі, для дослідження впливу вітрового потоку на роботу вітроустановок, зокрема на показники якості електроенергії, був розроблений метод моделювання турбулентного вітрового потоку за допомогою спектрально-кореляційної теорії випадкових процесів.

2. МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО ПОТОКУ С ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Турбулентний вітровий потік часто описують за допомогою різних математичних моделей спектральної щільності, отриманих за емпіричними даними. Найвідомішою з них, проте не самої кращою, є модель Ван дер Ховена (Van der Hoven), побудована за даними вимірів на метеорологічній вежі. В [4], для проектування розрахункових навантажень рекомендується використовувати моделі Манна і Каймала.

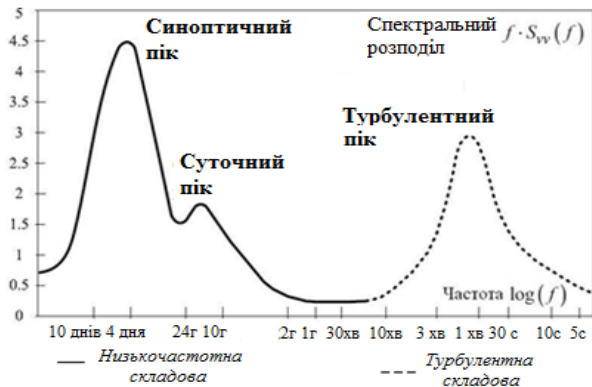


Рисунок 1 – Спектральний розподіл горизонтальної складової швидкості вітру в діапазоні від 0,0007 до 90 циклів/год

Ван дер Ховен ще в 1957 р за даними вимірів побудував спектральний розподіл горизонтальної складової швидкості вітру в діапазоні від 0,0007 до 90 циклів/год (рис. 1), демонструючи явні піки, відповідні синоптичним (кілька днів), добовим і турбулентним ефектів [5, 6].

Між добовим і турбулентним піками розташовується так званий «спектральний зазор», що дозволяє розглядати синоптичні і добові зміни як абсолютно відмінні від турбулентності.

Турбулентний вітровий потік може бути представлений у вигляді рівняння [4]

$$V(t) = V_{cp} + v(t) \quad (1)$$

де V_{cp} – середня швидкість вітру в 10-тихвилинном часовому інтервалі; $v(t)$ – турбулентна складова швидкості вітру.

У вітроенергетиці турбулентну складову швидкості вітру описують за допомогою моделей спектральної щільності, отриманих шляхом спостережень і експериментів. Моделі спектральної щільності можна розділити на 2 групи [7]:

- незалежні від висоти – моделі Давенпорта, Харріса;
- залежать від висоти – моделі Кармана, Сіміу, Каймала, Манна.

Для спрощення процесу моделювання в якості основної характеристики при моделюванні турбулентного вітрового потоку запропоновано використовувати його кореляційну функцію, отриману шляхом апроксимації спектральної щільності моделі

Каймала, яка має достатню точність, відповідає вимогам і рекомендована міжнародним стандартом. У подальших дослідженнях, результати моделювання дозволять провести більш простий аналіз впливу мінливості вітрового потоку на роботу вітроустановки і оцінити вплив на показники якості електроенергії.

Нормована спектральна щільність для моделі Каймала описується рівнянням [4]:

$$\frac{fS(f)}{\sigma^2} = \frac{4f \frac{L}{V_{cp}}}{\left(1 + 6f \frac{L}{V_{cp}}\right)^{\frac{5}{3}}} \quad (2)$$

де f – частота, Гц; $S(f)$ – односторонній спектр поздовжньої складової вектора швидкості; σ – середньоквадратичне відхилення поздовжньої складової вектора швидкості; L – інтегральний масштабний параметр турбулентності.

Перейдемо від нормованої спектральної щільності (2) до енергетичного спектру швидкості вітру

$$S(\omega) = \frac{4\sigma^2 \frac{L}{V_{cp}}}{\left(1 + 6 \frac{L}{V_{cp}} \omega\right)^{\frac{5}{3}}} = \frac{2kD}{(1 + 3k\omega)^{\frac{5}{3}}}, \quad (3)$$

де $D = \sigma^2$ – дисперсія швидкості вітру; $k = 2L/V_{cp}$ – коефіцієнт, що залежить від V_{cp} і L .

Для отриманої спектральної щільності інтеграл не може бути виражений через елементарні функції. Тому одним із способів вирішення поставленого завдання є апроксимація спектральної щільності одним з відомих виразів для $S(\omega)$.

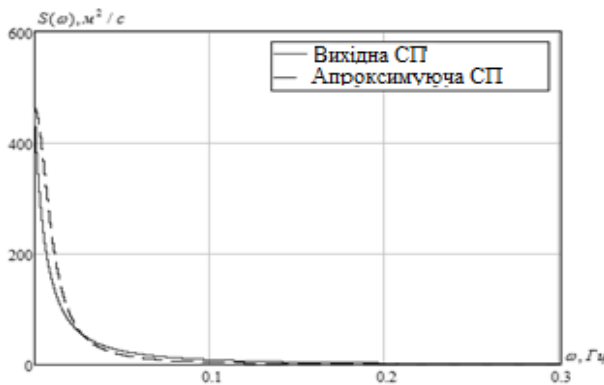


Рисунок 2 – Апроксимація спектральної щільності

На рисунку 2 наведено вихідна і апроксимуюча спектральні щільності.

У роботі пропонується алгоритм моделювання, заснований на моделюванні за допомогою рекурентних різницевих рівнянь, який придатний для моделювання випадкових процесів з раціональним спектром. В основі даного алгоритму лежить лінійне перетворення дискретного білого шуму $x(i)$ з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією в послідовність, корелювали з нормальним законом розподілу (4) [8].

$$v(i) = a_0x(i) + a_1x(i-1) - b_1v(i-1) - b_2v(i-2), \quad (4)$$

де a_0, a_1, b_1, b_2 – параметри алгоритму

Вихідними даними для моделювання є: середня швидкість вітру в регіоні V_{cp} ; середньоквадратичне відхилення σ , залежне від категорії турбулентності; коефіцієнт загасання кореляційної функції α , кроку дискретизації Δt .

Моделювання турбулентного вітрового потоку було виконано в середовищі програмування MATLAB для різних значень коефіцієнта загасання кореляційної функції і середньоквадратичного відхилення турбулентного вітрового потоку на інтервалі часу $t=40c$ з кроком дискретизації $\Delta t=0.1c$.

Нижче наведено приклади моделювання турбулентного вітрового потоку для коефіцієнта загасання кореляційної функції $\alpha_V = 0.7:5$ (рис. 3) і для середньоквадратичного відхилення кореляційної функції $\sigma_V = 2:3.5$ м/с (рис. 4).

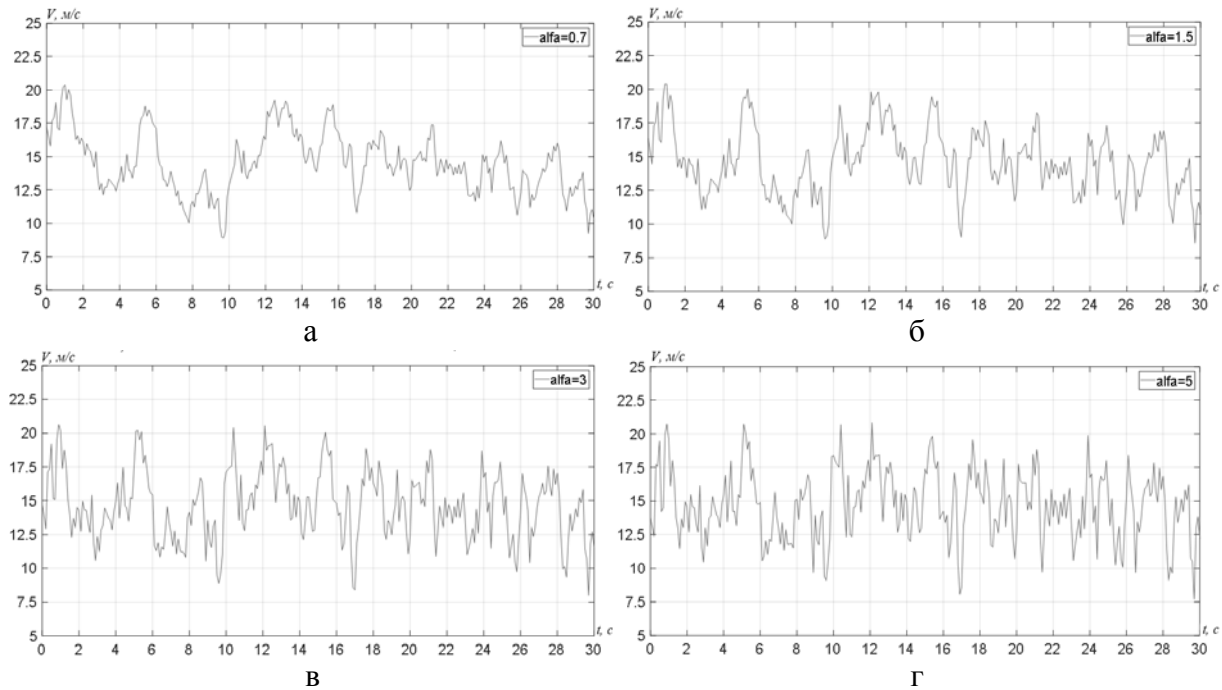


Рисунок 3 – Змодельований турбулентний вітровий потік при коефіцієнті загасання кореляційної функції: а) $\alpha_V = 0.7$, б) $\alpha_V = 1.5$, в) $\alpha_V = 3$, г) $\alpha_V = 5$

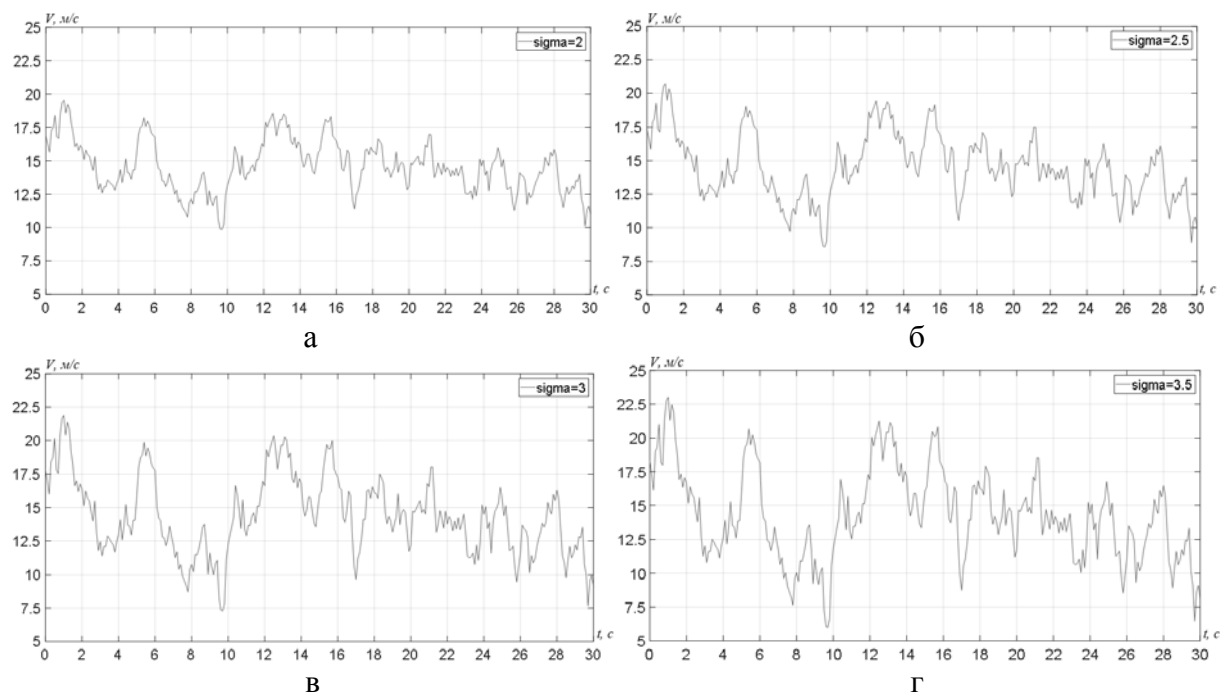


Рисунок 4 – Змодельований турбулентний вітровий потік при середньоквадратичному відхиленні: а) $\sigma_V = 2$ м/с, б) $\sigma_V = 2.5$ м/с, в) $\sigma_V = 3$ м/с, г) $\sigma_V = 3.5$ м/с

При оцінці результатів моделювання були виключені початкові 10 секунд протікання перехідного процесу. Змодельований турбулентний вітровий потік задається в модель вітрової електростанції за допомогою блока зчитування даних з робочого простору середовища програмування MATLAB «From workspace».

3. МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Вітроустановки з регульованою швидкістю обертання в даний час набули найбільшого поширення в усьому світі (понад 85% ринку) [9]. Це обумовлено наявністю перетворювачів частоти в їх конструкції, які дозволяють контролювати процес перетворення енергії, управляти активної і реактивної потужністю, дозволяють поліпшити взаємозв'язок з розподільною мережею. Однак, окрім перерахованих переваг існує ряд недоліків, основний з яких, згідно наведеним в [10] результатам порівняльного моделювання основних типів вітроустановок, перетворювачі частоти є основним джерелом спотворення гармонічного спектру напруги розподільчої мережі у вітроустановках.

Відповідно до загальноприйнятої світової класифікації, існує дві різних концепції виконання вітроустановок з регульованою швидкістю обертання [11]:

- тип С – з частковим перетворенням частоти;
- тип D – з повномасштабним перетворенням частоти.

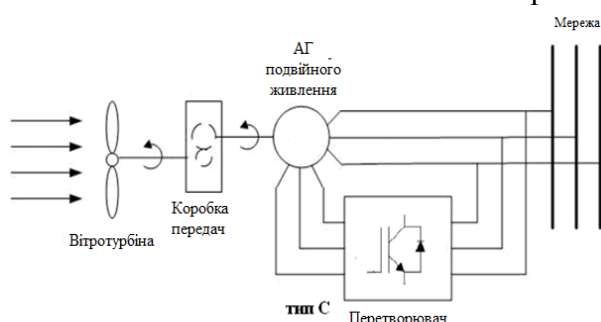


Рисунок 5 – Вітроустановка з частковим перетворенням частоти

В даній роботі дослідження впливу турбулентного вітрового потоку проводилось на імітаційній моделі вітроустановки типу С – з регульованою швидкістю обертання з частковим перетворенням частоти (рис. 5). Цей тип оснащений асинхронним генератором подвійного живлення (DFIG) і перетворювачем частоти, розрахованим приблизно на 30% від номінальної потужності генератора для живлення обмоток ротора [11]. Наявність

перетворювача частоти дозволяє управляти частотою ротора, отже, швидкістю ротора в 30% діапазоні потужності близько синхронної швидкості. Також, перетворювач виконує функцію компенсації реактивної потужності і покращує підключення до розподільчої мережі.

У вітроустановках типу С, обладнаних АГ, найчастіше використовуються дворівневі перетворювачі частоти з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) [12]. Вони виконуються зі зворотним зв'язком і підключаються до мережі через трансформатор. Основною перевагою даного типу перетворювача є висока надійність за рахунок відносно простої структури і малої кількості елементів. Однак наявність дворівневої вихідної напруги призводить до погіршення якості електроенергії.

В [13] представлені результати вимірювання якості електроенергії, виконані для двох вітроустановок з різними конструктивними характеристиками (тип С і D), підключених до розподільчої мережі і розташованих на ВЕС на північному заході Іспанії В роботі виконано гармонійний аналіз фазних вихідних струмів вітроустановок. Порівняння результатів, отриманих в ході аналізу, показує, що гармонійний спектр для різних типів генераторів відрізняється. У першому випадку (для вітроустановки типу С), поряд з основною гармонікою присутні 5-а, 7-а і 11-а гармоніки з високими амплітудними значеннями. У другому випадку (для вітроустановки типу D) амплітудно-частотний спектр вихідного струму видається більш рівномірним: у відносно рівних значеннях в спектрі присутні 3-тя, 5-а, 7-а 11-я і 13-я гармоніки. У той же час, в амплітудно-частотному спектрі вихідного струму вітрогенератора типу С амплітудне значення 7-й канонічної гармоніки в два рази перевищує значення цієї ж гармоніки в спектрі вихідного струму вітрогенератора типу D. Крім того, поряд з вищими гармоніками в амплітудно-частотному спектрі вихідного струму

вітрогенератора типу D присутні інтергармонік. Слід зазначити, що амплітудні значення інтергармонік досягають амплітудних значень вищих гармонік, а в деяких випадках – навіть перевищують: бічні складові 3-ої гармоніки перевищують її на 30%, а 7-й – на 25%.

Моделювання ВЕС проводилось в графічному середовищі Simulink і складається з моделі розподільчої 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 вітроустановки представлена у вигляді двох систем перетворення (рис.5): механічне перетворення – перетворення кінетичної енергії повітряного потоку в механічний крутний момент на валу ротора генератора, і електричне перетворення – перетворення крутного моменту на валу ротора генератора в електричну енергію, що віддається в мережу.

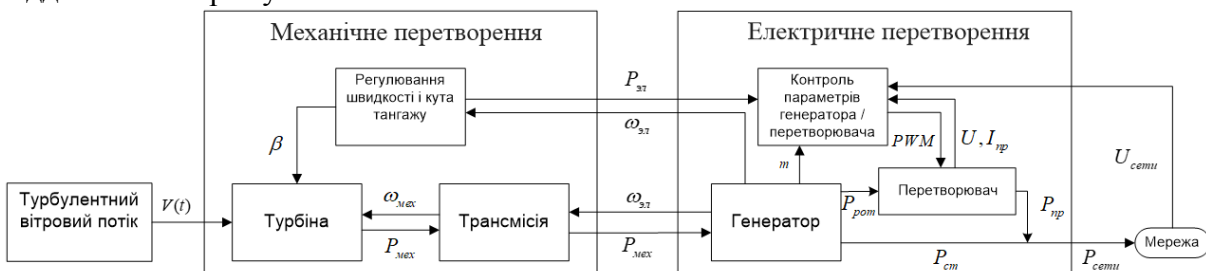


Рисунок 5 – Узагальнена структурна схема вітрогенератора

4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

За отриманими результатами моделювання було виконано гармонійний аналіз фазних напруг вітроустановки при різних параметрах турбулентного вітрового потоку.

На рис. 6 наведено спектральний склад напруги на стороні 35 кВ при $\alpha_v=5$ та $\sigma_v=3.5$, згідно якого видно, що в спектрі поряд з основною гармонікою присутні 5-а, 7-а і 11-а гармоніки з високими амплітудними значеннями, викликані наявністю перетворювача частоти. Однак амплітуди гармонік і інтергармонік в спектрі з 30 по 39-у, які викликані частотою ШІМ-модуляції перетворювача, мають значно більше значення ніж 5-а, 7-а і 11-а гармоніки.

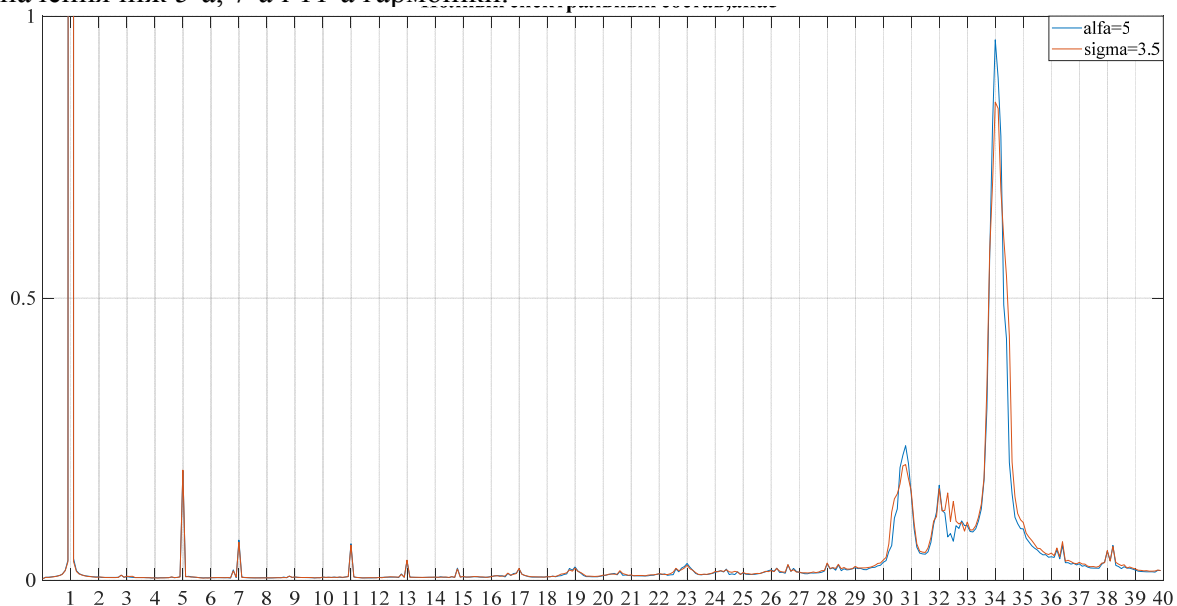


Рисунок 6 – Спектральний склад напруги на стороні 35 кВ

Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень коефіцієнта загасання кореляційної функції α_V (рис. 7) і середньоквадратичного відхилення (рис. 8) вітрового потоку σ_V наведені нижче

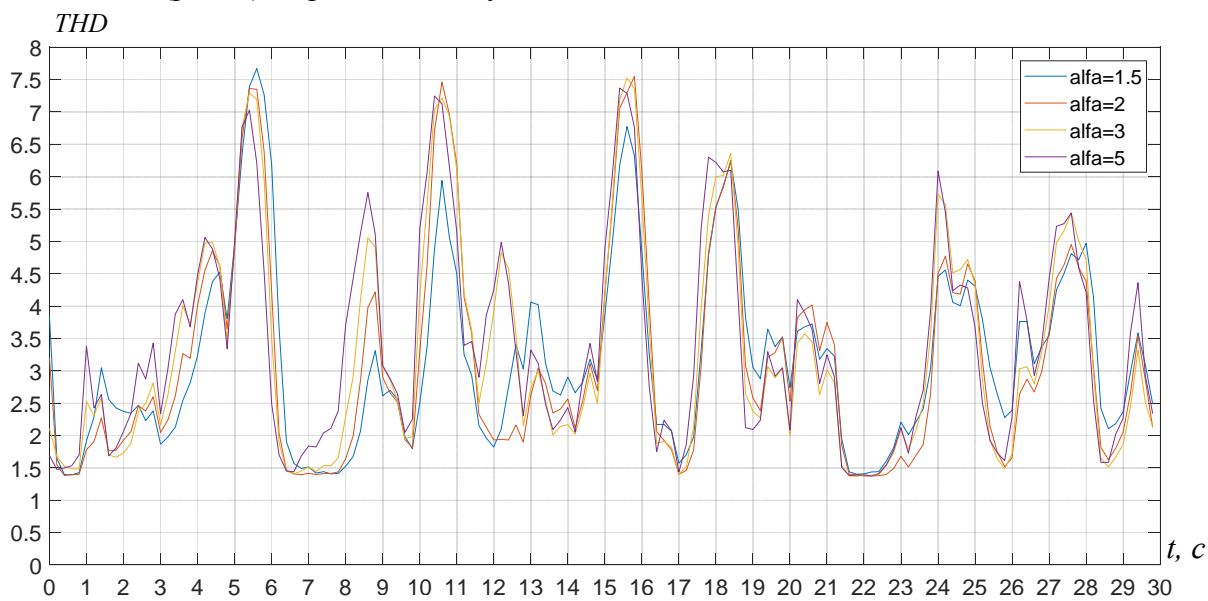


Рисунок 7 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень α_V

Як можна бачити з рис. 7, при збільшенні значення коефіцієнта згасання кореляційної функції α_V збільшується значення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги, тобто збільшення швидкості коливань турбулентності вітрового потоку призводить до збільшення спотворень синусоїдності кривої напруги мережі.

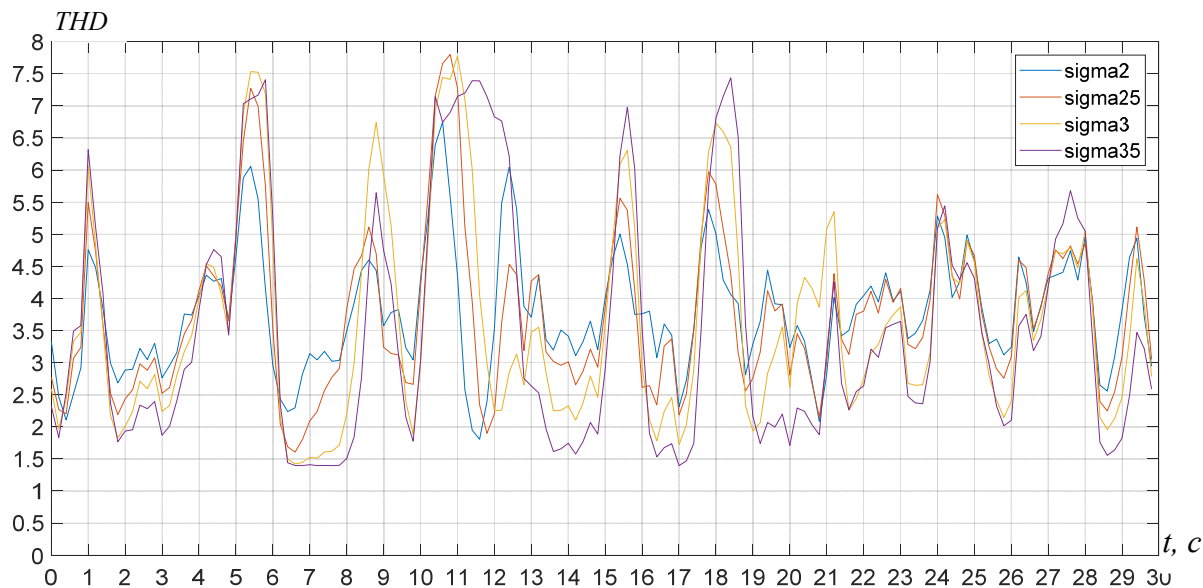


Рисунок 8 – Зміни коефіцієнта нелінійних спотворень напруги в часі для деяких значень σ_V

Як можна бачити з рис. 8, при збільшенні значення середньоквадратичного відхилення вітрового потоку σ_V збільшується значення коефіцієнта нелінійних спотворень напруги, при збільшенні розмаху коливань турбулентності вітрового потоку збільшується рівень спотворення синусоїдності кривої напруги мережі.

5. СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Grünbaum R., Voltage and power quality control in wind power applications means of dynamic compensation, ABB Power Systems AB, Vasteras, Sweden. 2000
2. 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.
3. Gholami M., Fathi S.H., Milimonfared J., Chen Z., Deng F. The effect of turbulence and wake on the power fluctuation in the wind farms, 25th Iranian conference on electrical engineering (ICEE2017), 2017. pp. 1148-1153.
4. IEC 61400-1: 2005 Wind Turbines – Part 1: Design requirements.
5. Burton T. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
6. Van Der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour, J. Meteor, 1957. pp. 160-164.
7. Вєс J. Influence of wind spectrum formula choice on footbridge response, 5th international symposium on computational wind engineering, 2010. pp. 23-27.
8. Сергієнко А.Б. Цифрова обробка сигналів: навчальний посібник. СПб.:БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
9. Ackermann T. Wind power in power systems. Stockholm :John Wiley & Sons, 691 p., 2012.
10. Duong, M.Q., Le K.H., Grimaccia, F., Leva S., Mussetta M., Zich R.: Comparison of power quality in different grid-integrated wind turbines. IEEE 16th international conference on harmonics and quality of power, 2014. pp. 669-673
11. Larsson, A. The power quality of wind turbines, Chalmers bibliotek, Goteborg, Sweden. 2000. 46 p.
12. Rodriguez J., Bernet S., Wu Bin, Pontt J.O., Kouro S.: Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives. IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 54, no. 6, 2007. pp. 2930-2945.
13. Gutierrez J.J., Ruiz J., Saiz I., Azcerate L., Leturiondo A., Lazkano A., Power quality in grid connected, In Tech, 2011. ch. 24.

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