

УДК 621.548

В.М.Головко¹, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**², канд.техн.наук, **М.О.Шихайлов**³ (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ), **К.Сандовал**⁴ (Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ)

Аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання

У статті аналізується режим роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного перетворювача для зарядження акумуляторних батарей за різної швидкості вітру. За допомогою моделювання визначений вплив ширини імпульсу на вихідні показники автономної системи. Модель розроблено на базі програмного пакету Matlab/Simulink. Бібл. 19, рис. 9.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроустановка, імпульсний перетворювач, зарядження акумуляторної батареї.

Orcid: ¹0000-0003-0195-9654; ²0000-0003-0033-1355; ³0000-0003-1845-9904; ⁴0000-0001-6700-3343.

Вступ. Використання автономних вітроелектричних систем (АВЕС) з асинхронним генератором (АГ) може бути здійснене для електрозабезпечення віддалених від центральних систем споживачів, оскільки вони мають відносну простоту конструкції, високу надійність і, при потребі, нескладну схему підключення паралельно до електромережі. В той же час асинхронний генератор потребує подання реактивної потужності до обмотки статора для самозбудження, що найчастіше здійснюється від блоку конденсаторів [1, 8, 19].

Найбільш складною задачею для роботи ВЕУ з АГ є регулювання напруги та частоти під впливом зміни швидкості вітру та утримання показників якості електроенергії в робочому режимі. Вирішенню цієї задачі присвячено ряд робіт, пов'язаних з розробкою методів розрахунку та аналізу ємності конденсатора для самозбудження, що розглядаються в [2–4], компенсації реактивної потужності через паралельно та послідовно підключені блоки конденсаторів [5, 6], дослідження роботи з використанням статичного компенсатора (СТАТКОМ), керованого напівпровідниковими елементами [7–9]. Також

проведено ряд досліджень, що аналізують динаміку роботи ВЕУ з АГ та інвертором змінного струму (ЗС) в постійний (ПС) для зарядження акумуляторної батареї або постачання електроенергії до електромережі постійного струму [10–14]. Для зарядження акумуляторної батареї від вітроагрегата проведено аналіз імпульсу зарядного пристрою в [17]. В роботі [18] проаналізовані структурні схеми АВЕС з АГ, які можуть підвищити коефіцієнт заповнення графіка навантаження споживача.

Постановка завдання досліджень та опис імітаційної моделі. Метою досліджень є аналіз ефективності роботи автономної вітроелектричної системи з асинхронним генератором та імпульсним перетворювачем (ІП) для зарядження акумуляторних батарей (АБ) за допомогою імітаційного моделювання.

На рис. 1 наведена імітаційна модель АВЕС, що складається з наступних елементів: вітроелектрична установка з АГ, трифазний випрямляч, ІП, що працює за допомогою широтної імпульсної модуляції (ШІМ), та навантаження (АБ). Модель було розроблено в програмному середовищі *Matlab/Simulink*.

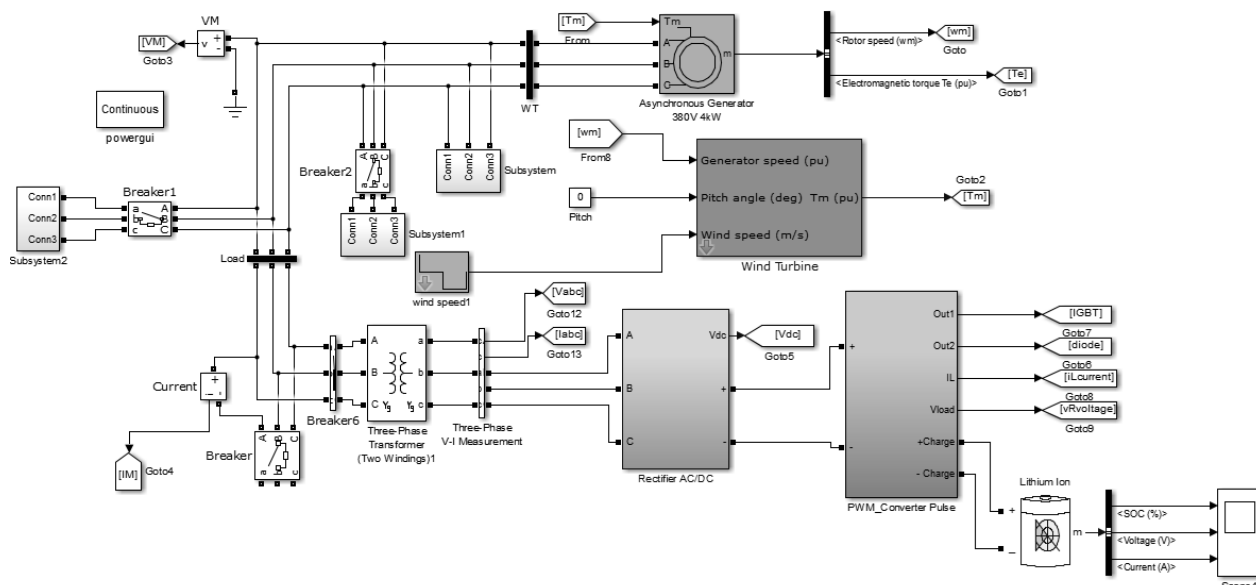


Рис. 1. Імітаційна модель автономної вітроелектричної системи з імпульсним перетворювачем.

Імпульсний перетворювач повинен періодично підключатися до навантаження (батареї). Керування комутаційним ключем здійснюється за допомогою широтної імпульсної модуляції. При цьому її робоча частота не повинна перевищувати 1 кГц. Перехідний процес, що відбувається в системі АВЕС з АГ з самозбудженням, – головна умова для визначення тривалості вихідного імпульсу t_{off} , тобто $t_{off} < T_a$ (стала часу ВЕУ).

Імпульсний перетворювач. За допомогою імпульсного перетворювача джерело постійного струму періодично приєднується до навантаження.

Робота імпульсного перетворювача наведена на рис. 2. Коли ключ увімкнений, то струм проходить через навантаження з тривалістю вихідного імпульсу t_1 , а коли ключ вимкнений, струм не проходить через навантаження з тривалістю паузи між імпульсами t_2 [15, 16].

Для перетворення імпульсної напруги в постійну використовується дросель L та діод (рис. 3). Протягом інтервалу часу t_1 накопичується енергія в дроселі L , після інтервалу часу паузи t_2 дана енергія передається до навантаження через діод та паралельно приєднується згладжувальний фільтр C .

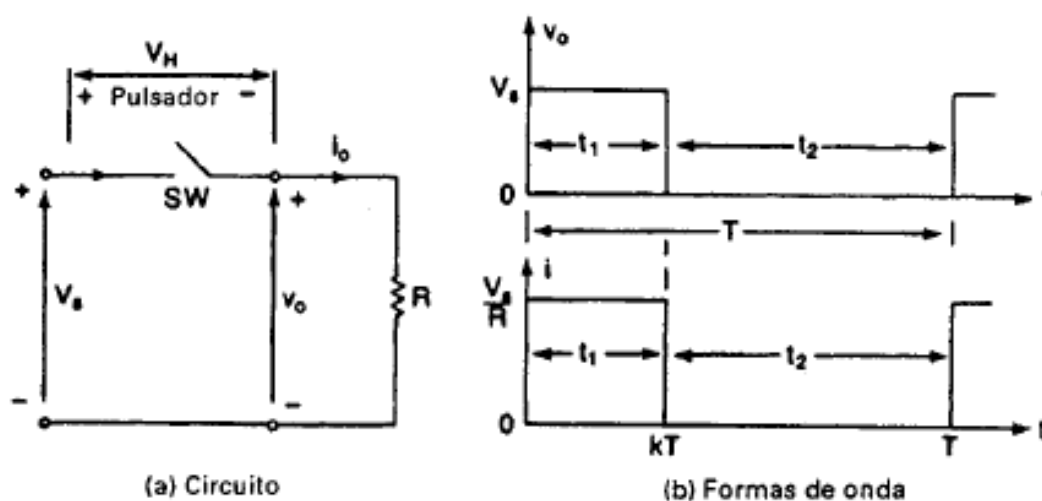


Рис. 2. Робота імпульсного перетворювача.

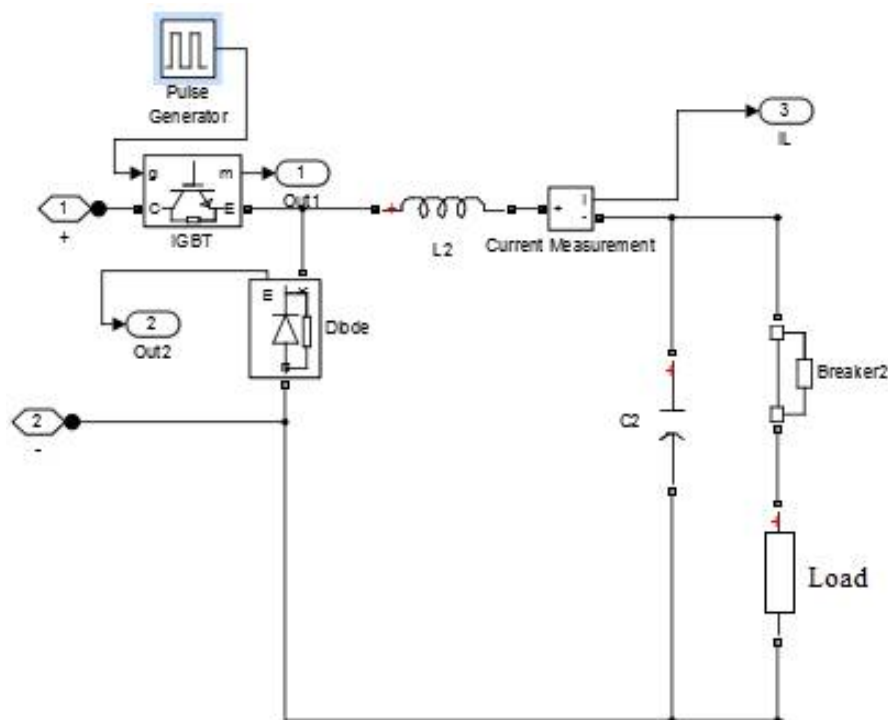


Рис. 3. Схема імпульсного перетворювача із згладжувальним фільтром.

Представим напругу на виході наступною формулою [15, 16]:

$$V_{out} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_0 dt = \frac{t_1}{T} \cdot v_{in}, \quad (1)$$

де V_{out} – середня напруга на виході; T – період сигналу,

$$V_{out} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \cdot V_{in}, \quad (2)$$

де t_1 – тривалість часу вмикання; t_2 – тривалість часу паузи.

$$V_{out} = k \cdot V_{in}. \quad (3)$$

Коефіцієнт заповнення імпульсу:

$$k = \frac{V_{out}}{V_{in}}. \quad (4)$$

Індуктивність дроселя вираховується за наступною формулою:

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out})k}{0,3 \cdot I_{load} \cdot f_{sw}}. \quad (5)$$

Ємність конденсатора розраховується за наступною формулою:

$$C = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta V_{out}}, \quad (6)$$

де C – мінімальна ємність на виході; ΔI_L – зміна струму в дроселі; ΔV_{out} – зміна вихідної напруги (максимум 2%).

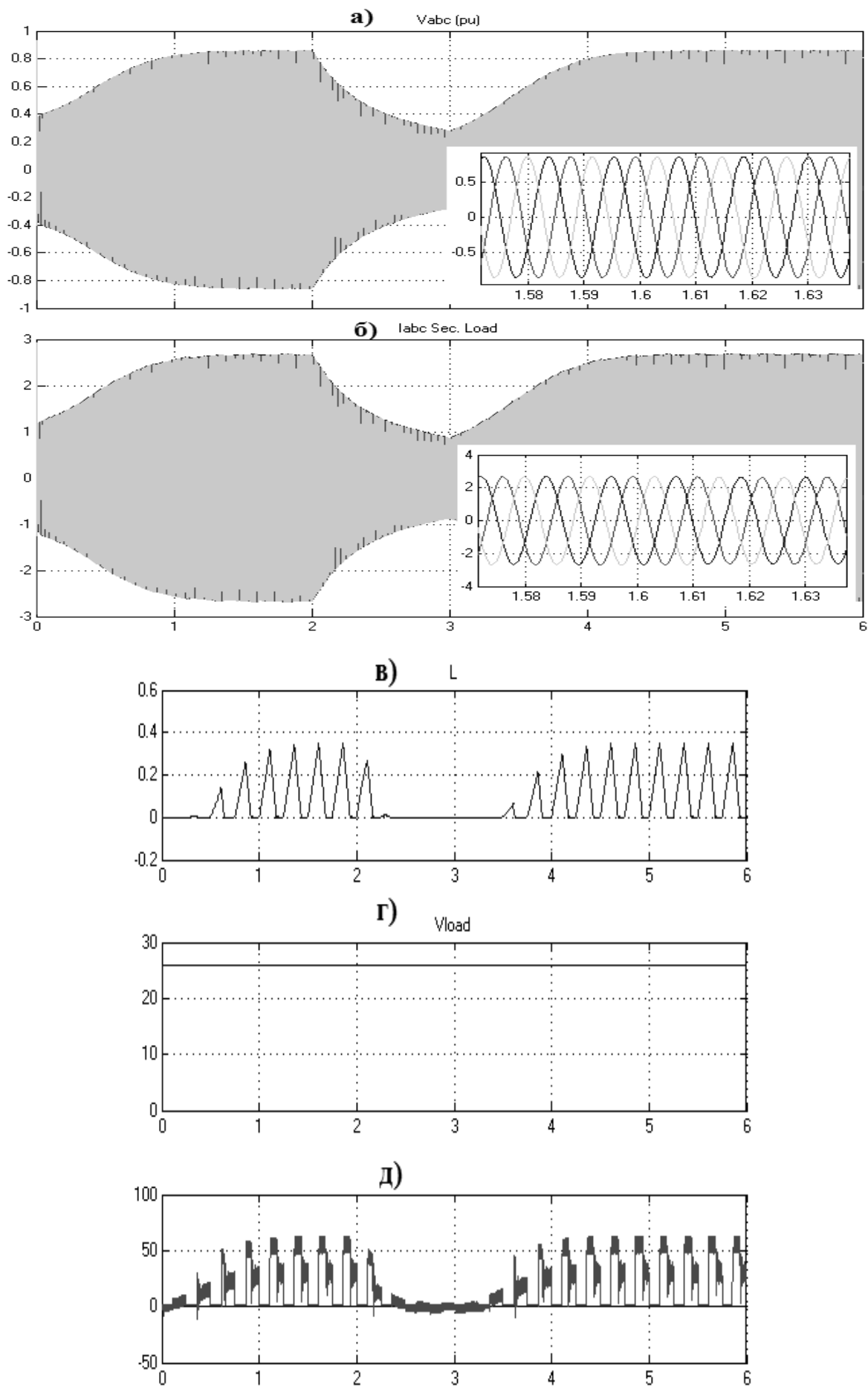
$$\Delta I_L = (0,2 \dots 0,4) \cdot I_{load}, \quad (7)$$

$$\Delta V_{out} \approx 2\% \cdot V_{out}. \quad (8)$$

Період комутації T розраховується за наступною формулою:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2. \quad (9)$$

Аналіз результатів імітаційного моделювання. На рис. 4 наведені характеристики АВЕС з АГ з використанням ІП.



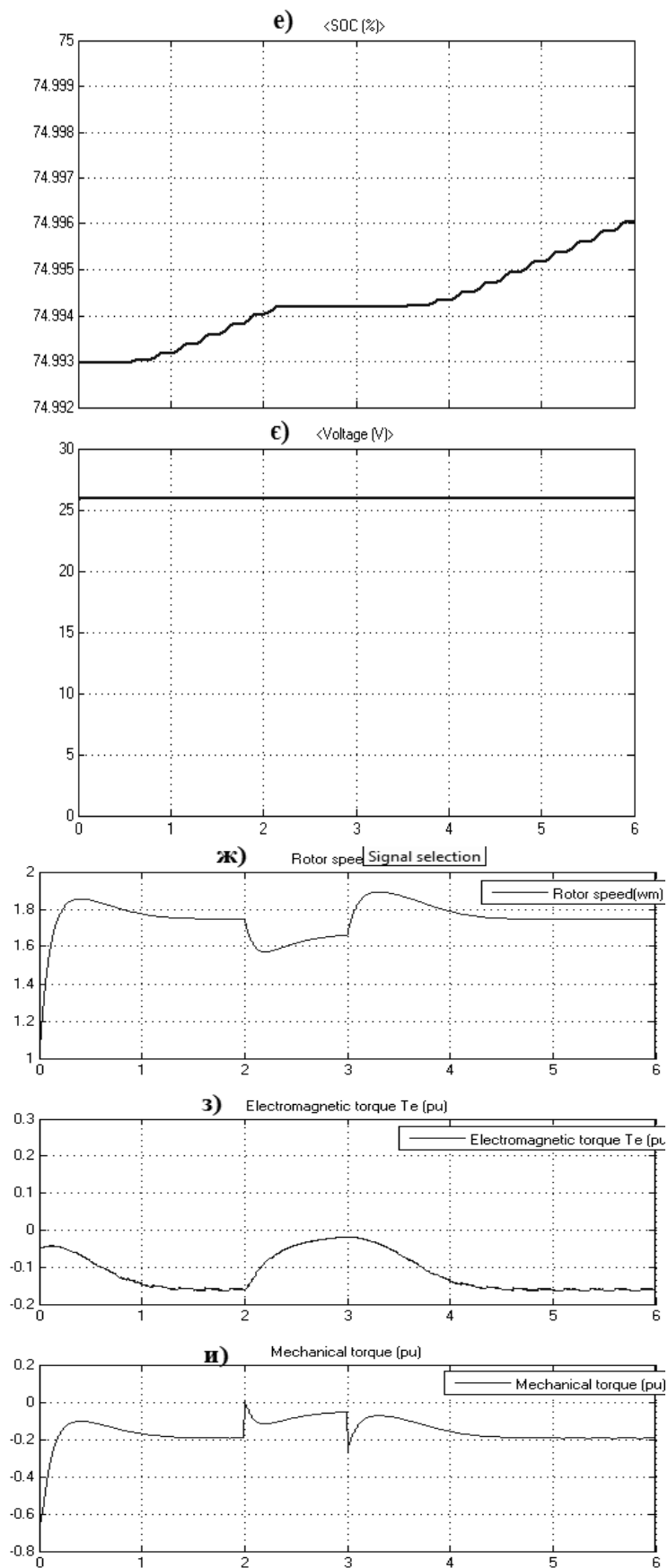


Рис. 4. Характеристики АВЕС з АГ з використанням ІП (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1 = 44\%$, $C = 23 \mu\text{F}$):

а) – напруга, що отримана на виході ВЕУ; б) – струм, що отриманий на виході ВЕУ; в) – струм на виході дроселя ІП; г) – напруга на виході ІП; д) – ширина імпульсу ІП; е) – стан зарядження батарей; є) – напруга батарей; ж) – швидкість ротора генератора; з) – електромагнітний момент генератора; и) – механічний момент на валу генератора.

Характеристики отримані при умові, що АВЕС працює при швидкості вітру 8 м/с. При досягненні усталеного значення напруги $U_{\phi} = 190$ В моделюється падіння швидкості вітру до 7 м/с, що спричиняє падіння напруги, струму та частоти. Падіння швидкості вітру триває 1 с, після чого знову збільшується швидкість вітру до 8 м/с і відбувається відновлення параметрів системи. Комутаційними елементами збільшується або зменшується ширина імпульсу.

На рис. 4 це відповідає графікам в), г), д).

При зміні часу вмикання до 44% при тій же частоті та ємності конденсатора отримані характеристики, що наведені на рис. 5.

При коливанні швидкості вітру від 8 до 7 м/с тривалістю 1 с робота ІП відповідає графікам в), г), д).

При зміні часу вмикання до 10% при тій же частоті та ємності конденсатора отримані характеристики, що наведені на рис. 6.

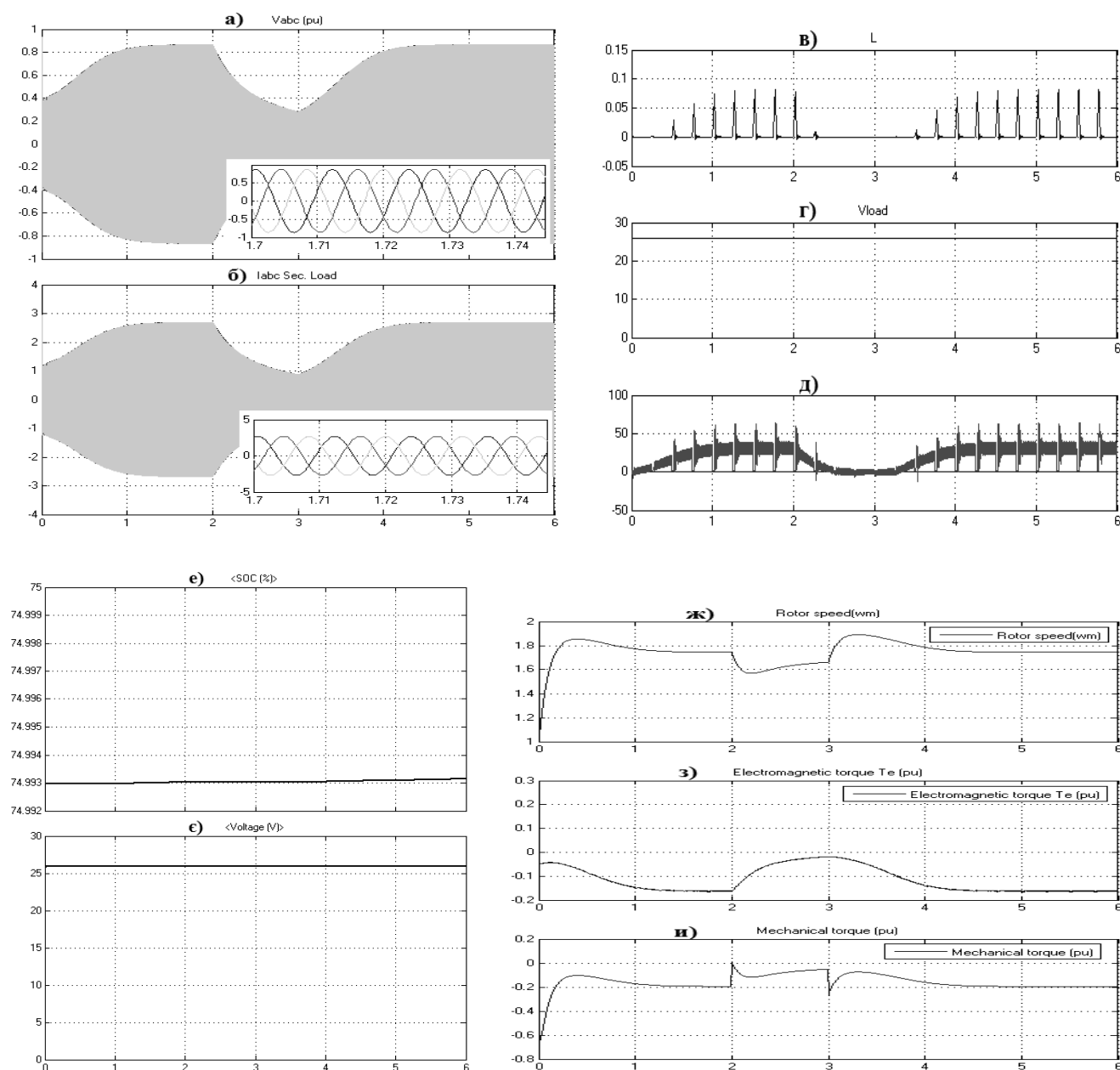
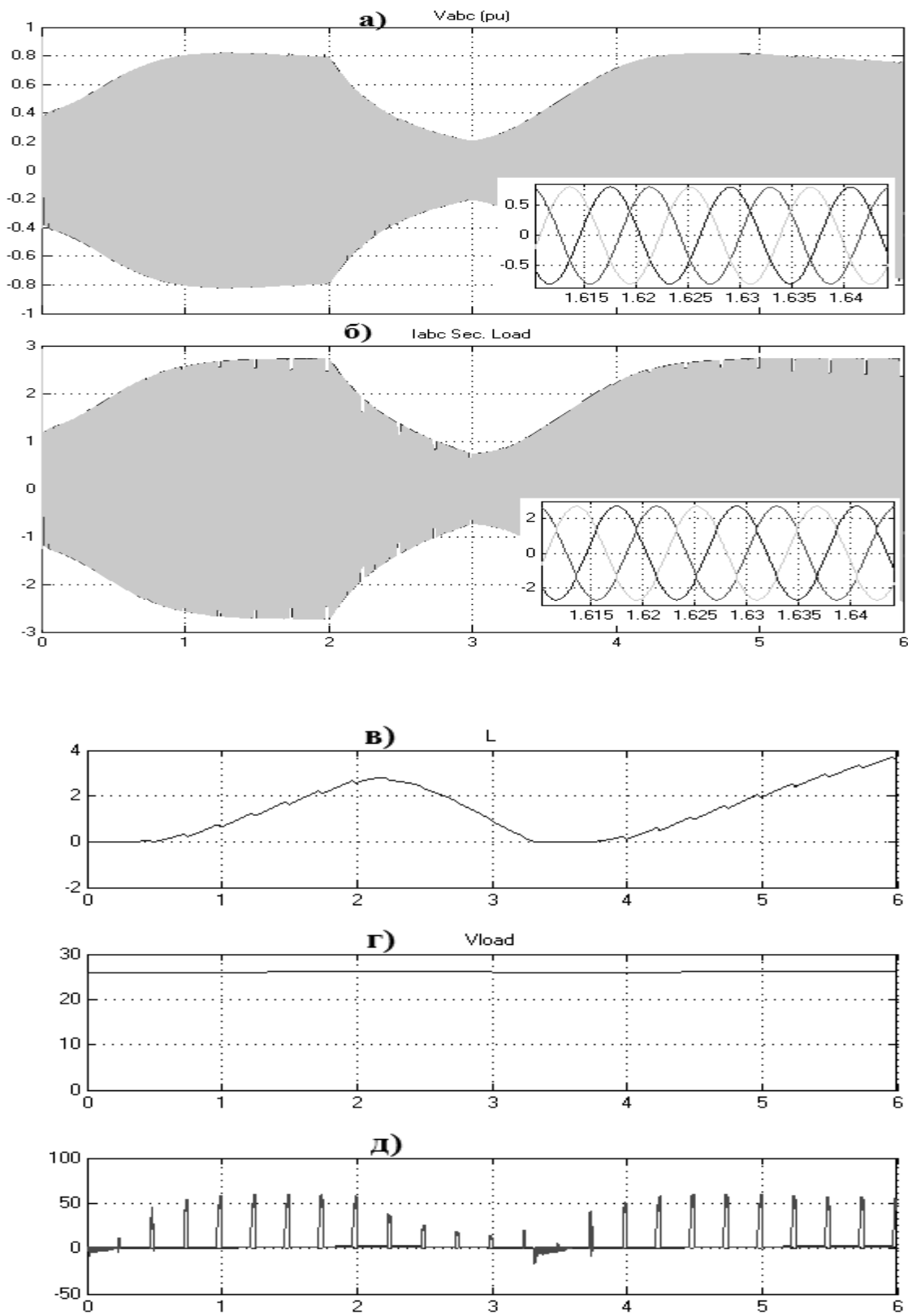


Рис. 5. Характеристики системи АВЕС з АГ з використанням ІП (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1 = 10\%$, $C = 23$ мкФ): а) – напруга, що отримана на виході ВЕУ; б) – струм, що отриманий на виході ВЕУ; в) – струм на виході дроселя ІП; г) – напруга на виході ІП; д) – ширина імпульсу ІП; е) – стан зарядження батарей; є) – напруга батарей; ж) – швидкість ротора генератора; з) – електромагнітний момент генератора; и) – механічний момент на валу генератора.



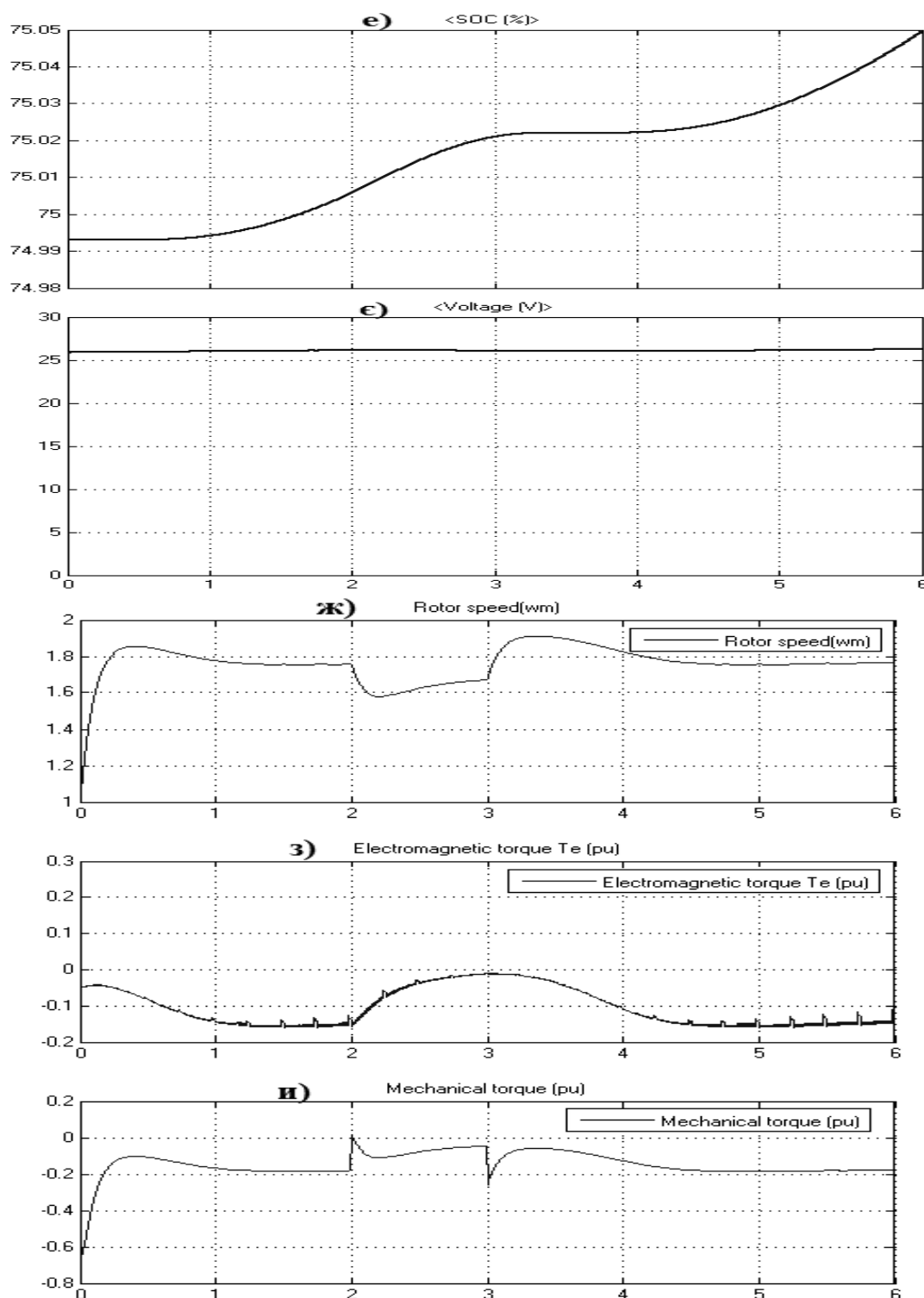


Рис. 6. Характеристики АВЕС з АГ з використанням ІП (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1 = 90\%$, $C = 23$ мкФ):

а) – напруга, що отримана на виході ВЕУ; б) – струм, що отриманий на виході ВЕУ; в) – струм на виході дроселя ІП; г) – напруга на виході ІП; д) ширина імпульсу ІП; е) – стан зарядження батарей; є) – напруга батарей; ж) – швидкість ротора генератора; з) – електромагнітний момент генератора; и) – механічний момент на валу генератора.

При коливанні швидкості вітру від 8 до 7 м/с тривалістю 1 с робота ІП відповідає графікам в), г), д).

При визначенні ємності конденсатора для збудження генератора необхідно враховувати

також додаткову ємність для компенсації реактивної потужності при приєднанні навантаження. На рис. 7 наведена залежність вихідної напруги системи при різних значеннях коефіцієнта заповнення імпульсів.

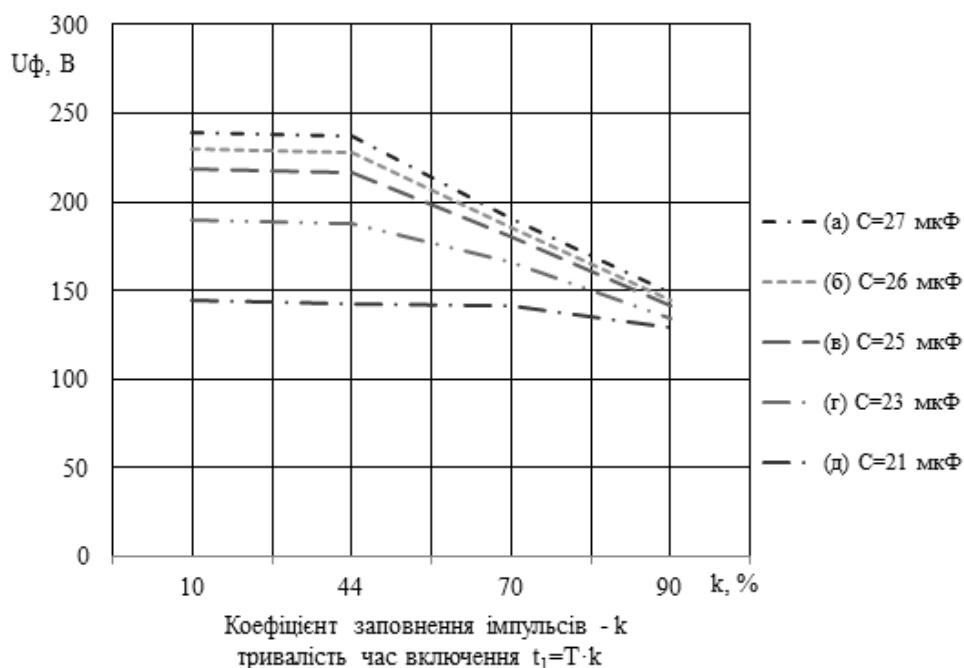


Рис. 7. Характеристики залежності вихідної напруги від коефіцієнта заповнення імпульсів.

Криві на рис. 7 отримані при умові, що швидкість вітру складає 8 м/с. З графіків видно, що при коефіцієнті заповнення імпульсів 90% фазна напруга має мінімальне значення. При зменшенні значення коефіцієнта заповнення напруга збільшується. Тобто при збільшенні часу паузи проходить скидання навантаження з генератора. В той же час, коли АВЕС з АГ приєднана до навантаження через ІП, при зменшенні ємності з 27 мкФ до 21 мкФ блоку конденсаторів АГ не втрачає збудження.

На рис. 8 наведені результати моделювання при змінних значеннях швидкості вітру (8 м/с, 7 м/с та 6 м/с).

При падінні напруги внаслідок зниження швидкості вітру необхідна компенсація реактивної потужності приєднанням конденсатора 15 мкФ через 3 с та 10 мкФ через 5 с.

Залежності вихідної напруги системи від зміни швидкості вітру при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів наведені на рис. 9.

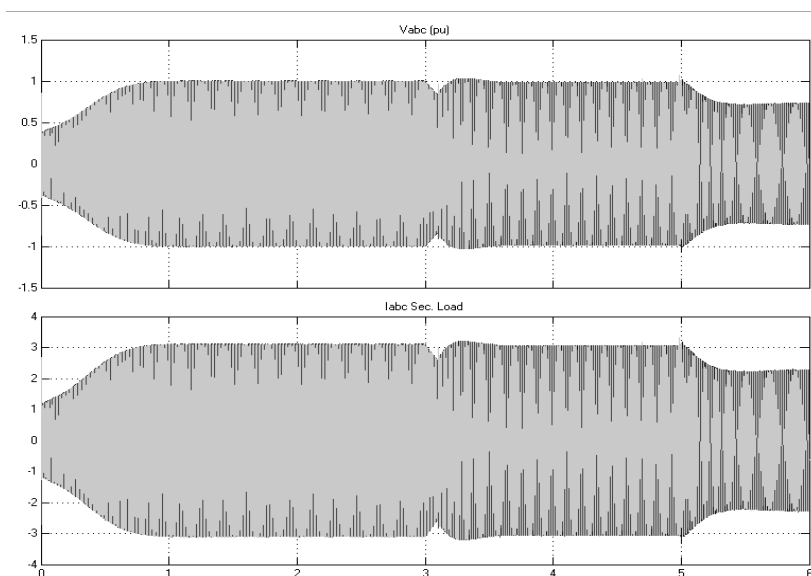


Рис. 8. Характеристики АВЕС з АГ з використанням ІП (при частоті 4 Гц, час вмикання $t_1 = 10\%$, $C = 25$ мкФ):

а) – напруга на виході БЕУ; в) – струм на виході БЕУ.

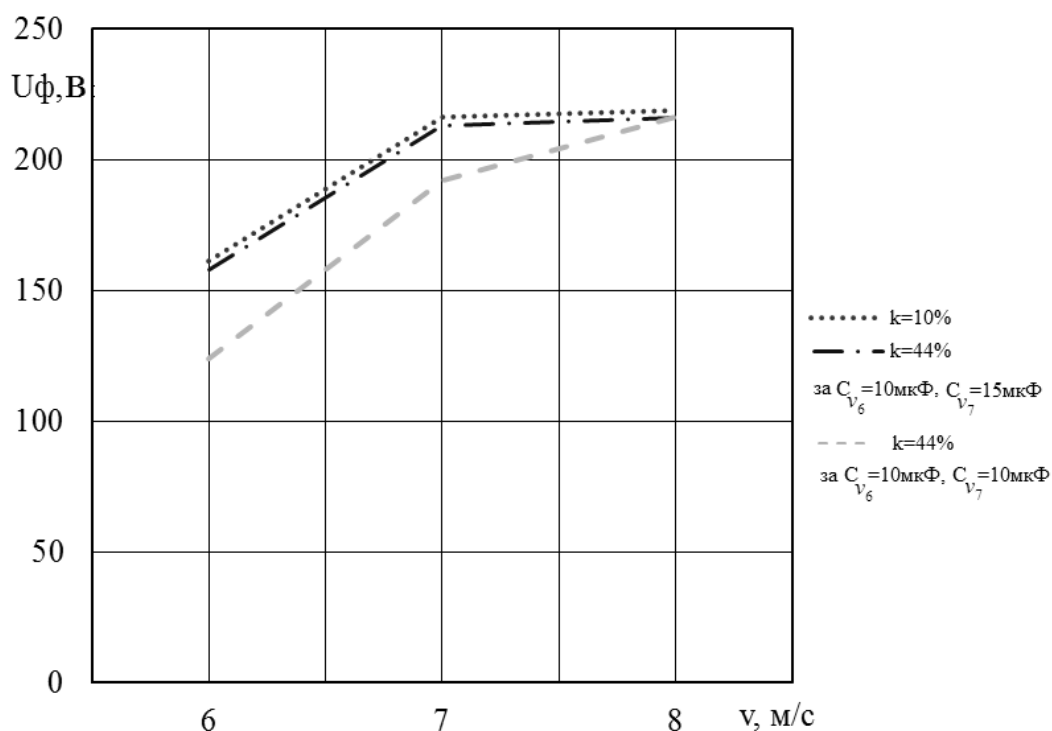


Рис. 9. Залежності вихідної напруги системи від зміни швидкості вітру при різних коефіцієнтах заповнення імпульсів.

У випадку зниження швидкості вітру до 6 м/с фазна напруга падає приблизно до 158 В відповідно до кривої (2). Тоді шляхом регулювання тривалості часу вмикання до 10% напруга підвищується до 161 В. Тобто зі збільшенням тривалості часу вимикання (час паузи) скидається навантаження до АВЕС. Зі зменшенням навантаження підтримується режим роботи та існує можливість зменшення величини додаткової компенсації реактивної потужності від блоку конденсаторів.

Даний приклад демонструє, що замість додаткового збільшення ємності конденсаторів, коли швидкість вітру знижується, слід регулювати час паузи для відновлення попереднього значення напруги.

Під час проведення аналізу було виявлено, що поки не втрачається режим роботи генератора асинхронної машини, можна використовувати його максимальну вироблену енергію, що отримується через імпульсний генератор, який заряджає акумуляторну батарею.

Висновки. Проведено аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки при застосуванні імпульсного перетворювача для

зарядження акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання. Встановлено, що під час регулювання шпаруватості сигналу від 0,1 до 0,9 можливе максимальне використання енергії вітру, що перетворюється асинхронним генератором.

1. G. Raina, O.P. Malik. Wind energy conversion using a self-excited induction generators. IEE Proc. Part-C 129 (6) (1982) 260–265.

2. S.K. Goyal, D. K. Palwalia. Analysis of performance parameters and estimation of optimum capacitance for the asynchronous generator. Eng. Sci. Tech. Int. J. – 2016.

3. A. Abbou, M. Barara, A. Ouchatti. Capacitance required analysis for self-excited induction generator. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 55. No.3. PP. 382–389.

4. C. Chakraborty, S.N. Bhadra, A.K. Chattopadhyay. 'Excitation requirements for standalone three phase induction generator', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.13, No. 4, 1998, pp 358–365.

5. E. Muljadi, P. W. Carlin, R. M. Osgood. Circle Diagram Approach for Self-Excited Induction Generators. North America Power Symposium Howard University. 1993.

6. Muljadi, E. Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Applications / E. Muljadi, J. Sallan, M. Sanz, C.P Butterfield // National Renewable Energy Laboratory. – 2000. – P.1–9.

7. D. Giribabu, M. Das, A. Kumar. Comparative study of

control strategies for the induction generators in wind energy conversion system. *Wind and Structures*. 2016, Vol. 22, No. 6, pp. 635–662.

8. В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. – Учебник. – Харьков: Нац. Аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", Севаст. 2003. – 400 с.

9. S. Kumar, S. Sehgal, S. Bhosle. Voltage and frequency control of SEIG in small wind power plant using VFC. *IJA-REEIE*. 2013. Vol.2, No.8. pp.4098–4106.

10. Jose Antonio Barrado, Robert Griño. Analysis of voltage control for a self-excited induction generator using a three-phase four –wire electronic converter.

11. Khaled S. Sakkoury, Safaa Emara. Analysis of wind driven self-excited induction generator supplying isolated DC loads / *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. – 2016.

12. Vellapatchi Nayanar, Natarajan Kumaresan. Wind-driven Seig supplying DC microgrid through a single-stage power converter / *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2016.

13. Mohd. Tariq, Yuvarajan S. Simulink Based Modeling Analysis and Simulation of self-excited induction generator for use in remote areas / *IU-JEEE*. – 2013. – Vol.13. – PP. 1623–1629.

14. K. Suresh, R. Arulmozhiyal. Design and implementation of bi-directional dc-dc converter for wind energy system. *Circuits and Systems*. 2016. Pp. 3705–3722.

15. В.І. Сенько, М.В. Панасенко. С31 Електроніка і мікросхемотехніка: У 4-х т. Том 4. Книга 1. Смова електроніка: Нав. Посібник / За ред. В.І. Сенька.- К.: Каравела, 2012. – 640 с.

16. W.R. Erickson, D. Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics-Second Edition*. Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. – p 883.

17. Кудря С. О. Дослідження роботи зарядного пристрою акумуляторної батареї від вітроагрегату / С. О. Кудря, В. І. Будько, В. Б. Павлов, А. В. Попов, В. Є. Павленко // *Відновлюв. енергетика*. – 2010. – № 4. – С. 5–10.

18. В.М Головка, В.П Коханевич. Аналіз компоновки автономних вітроелектричних систем з асинхронним генератором / *Відновлювана Енергетика* // Головка В. М, Коханевич В.П. – 2015. – Vol. 1. – № 43. – 37–40 с.

19. Мхитарян Н.М. Анализ некоторых особенностей синхронных и асинхронных генераторов, используемых в качестве автономных источников энергии / Н. М. Мхитарян, С. А. Кудря, Ю. Н. Перминов, В. Ф. Буденный // *Відновлюв. енергетика*. – 2010. – № 2. – С. 7–9.

REFERENCES

1. G. Raina, O.P. Malik. Wind energy conversion using a self-excited induction generators. *IEE Proc. Part-C* 129 (6) (1982) 260-265.

2. S. K. Goyal, D. K. Palwalia. Analysis of performance parameters and estimation of optimum capacitance for the asynchronous generator. *Eng. Sci. Tech. Int. J.* – 2016.

3. A. Abbou, M. Barara, A. Ouchatti. Capacitance required analysis for self-excited induction generator. *Journal of Theo-*

retical and Applied Information Technology. 2013. Vol. 55. No.3. PP. 382-389.

4. C. Chakraborty, S.N. Bhadra, A.K. Chattopadhyay 'Excitation requirements for standalone three phase induction generator', *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.13, No. 4, 1998, pp 358-365.

5. E. Muljadi, P. W. Carlin, R. M. Osgood. Circle Diagram Approach for Self-Excited Induction Generators. *North America Power Symposium Howard University*. 1993.

6. Muljadi, E. Investigation of Self-Excited Induction Generators for Wind Turbine Applications / E. Muljadi, J. Sallan, M. Sanz, C.P Butterfield // *National Renewable Energy Laboratory*. – 2000. – P.1-9.

7. D. Giribabu, M. Das, A. Kumar. Comparative study of control strategies for the induction generators in wind energy conversion system. *Wind and Structures*. 2016, Vol. 22, No.6 , pp 635-662.

8. В. Кривцов, А. Олейников, А.И. Яковлев. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы. – Учебник. – Харьков: Нац. Аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т" Севаст. 2003. – 400 с.

9. S. Kumar, S. Sehgal, S. Bhosle. Voltage and frequency control of SEIG in small wind power plant using VFC. *IJA-REEIE*. 2013. Vol.2, No.8. pp.4098-4106.

10. Jose Antonio Barrado, Robert Griño. Analysis of voltage control for a self-excited induction generator using a three-phase four –wire electronic converter.

11. Khaled S. Sakkoury, Safaa Emara. Analysis of wind driven self-excited induction generator supplying isolated DC loads / *Journal of Electrical Systems and Information Technology*. – 2016.

12. Vellapatchi Nayanar, Natarajan Kumaresan. Wind-driven Seig supplying DC microgrid through a single-stage power converter / *Engineering Science and Technology, an International Journal*. – 2016.

13. Mohd. Tariq, Yuvarajan S. Simulink Based Modeling Analysis and Simulation of self-excited induction generator for use in remote areas / *IU-JEEE*. – 2013. – Vol.13. – PP. 1623–1629.

14. K. Suresh, R. Arulmozhiyal. Design and implementation of bi-directional dc-dc converter for wind energy system. *Circuits and Systems*. 2016. Pp. 3705-3722.

15. В. Сенко, В.П Панасенко. С31 Електроніка і мікросхемотехніка: У 4 т. Том 4. Книга 1. Смова електроніка: Нав. Посібник / За ред. В.І. Сенька.- К.: Каравела, 2012. – 640 с.

16. W. R. Erickson, D. Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics-Second Edition*. Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. – p 883.

17. Kudrya S. Study of the battery charger from the wind turbine / SA Kudrya, VI Bud'ko, VB Pavlov, AV Popov VE // *Vidnovlyuv Pavlenko. energy*. – 2010. – № 4. – P. 5–10.

18. В.М. Головка, В.П. Коханевич. Анализ layout independent wind power systems with asynchronous generator / *Renewable Energy* // Golovko V.M., Kohanyevych V.P. – 2015. – Vol. 1. – № 43. – 37–40 с.

19. Мхитарян Н.М. Analysis Features некоторых синхронных и асинхронных генераторов USED IN kachestve

avtonomnih sources of energy / N.M. Mkhitarian, S.A. Kudrya, N. Permyanov, V.F. Budennyi // Vidnovlyuv. energy. – 2010. – № 2. – С. 7–9.

В.М.Головко, докт.техн.наук, **В.П.Коханевич**, канд.техн.наук, **Н.А.Шихайлов** (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев), **К.Сандовал** (Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", Киев)

Анализ режимов работы автономной ветроэлектрической установки с асинхронным генератором с использованием импульсного устройства для зарядки аккумуляторных батарей на базе имитационного моделирования

В статье анализируется режим работы автономной ветроэлектрической установки с асинхронным генератором с использованием импульсного преобразователя для зарядки аккумуляторных батарей при различной скорости ветра. При помощи моделирования определено влияние ширины импульса на выходные показатели автономной системы. Модель разработана на базе программного пакета Matlab/Simulink. Библ. 19, рис. 9.

Ключевые слова: ветроэнергетика, ветроустановка, импульсный преобразователь, зарядка аккумуляторной батареи.

Holovko V., prof., dokt.tekhn.nauk, **Kokhanievych V.**, kand.tekhn.nauk, **Shykhaylov M.** (Institute of Renewable Energy National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv), **Sandoval K.** (National Technical University of Ukraine "Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv)

Analyz the mode operation of a stand-alone wind turbine with induction generator using pulse converter for charging batteries based on simulation

The present article analyzes the mode operation of a stand-alone wind turbine with induction generator using pulse converter for charging batteries under different wind speeds. Using the simulation model could be determined the influence of the pulse with onto output characteristics of the stand-alone system. The model was developed based on the software package Matlab / Simulink. References 19, pictures 9.

Keywords: windenergi, wind turbines, pulse transformer, charging the battery.

SYNOPSIS

Stand-alone wind turbine systems with induction generator can be used to supply power to remote areas from central system consumer as having a relatively simple design, high reliability, and not complicated scheme connection to work in parallel with the electrical grid. At the same time, the induction generator requires supplying reactive power to stator winding for self-excitation, which is often supplied from capacitors block.

The most difficult task for the performance of wind turbine with induction generator is the regulation of the tension and frequency, which are influenced by the variations of wind speed and keeping the indices of quality of electrical energy within mode operation.

The present article analyzes the efficiency and performance of the stand-alone wind turbine system with induction generator and pulse converter for charging battery system through simulation model. The model was developed with software Matlab/Simulink program. Found that adjusting the duty cycle signal between 0.1 up to 0.9 is possible to use the maximum wind energy, which is transformed by the induction generator.

Стаття надійшла до редакції 23.05.17

Остаточна версія 09.06.17

Х МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА
ЕНЕРГЕОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2017
 ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ, АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

7-9
листопада

ОРГАНІЗАТОР:
 Міжнародний виставковий центр
 ЗА ПІДТРИМКИ:
 Міністерства регіонального розвитку, будівництва
 та житлово-комунального господарства України
 Державного агентства з енергоефективності
 та енергозбереження України
 Технічний партнер: *RenetMedia*

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
 Україна, Київ, Броварський пр-т, 15
 "Лівобережна"
 ☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86
 e-mail: energo@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.mvc.ukr
www.tech-expo.com.ua