

УДК 621.548:621.314.21

КВАЗІОПТИМАЛЬНЕ ДИСКРЕТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ В БЕЗКОНТАКТНІЙ КОНТРРОТОРНІЙ АВТОНОМНІЙ ВІТРОУСТАНОВЦІ

І. З. Щур, А. І. Ковальчук

Національний університет "Львівська політехніка"

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна. E-mail: i_shchur@yahoo.co.in, an_box@mail.ru

З метою використання в контрроторній автономній вітроустановці для безконтактної передачі генерованої електроенергії, а також дискретного автоматичного регулювання розроблено комп'ютерну модель спеціального трифазного трансформатора з обертовою частиною. У моделі враховано наявність повітряного проміжку між пів-осередями, втрати в сталі під час його роботи від джерела змінної напруги та частоти, а також дискретне перемикання відпайок вторинної обмотки. Сформовано умову квазіоптимального дискретного регулювання навантаження синхронного генератора з постійними магнітами, який через трансформатор віддає електричну енергію до акумуляторних батарей. Приведено результати комп'ютерного моделювання системи в цілому.

Ключові слова: контрроторна автономна вітроустановка, трансформатор з обертовою частиною, квазіоптимальне дискретне регулювання.

КВАЗІОПТИМАЛЬНОЕ ДИСКРЕТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В БЕСКОНТАКТНОЙ КОНТРРОТОРНОЙ АВТОНОМНОЙ ВЕТРОУСТАНОВКЕ

И. З. Щур, А. И. Ковальчук

Национальный университет "Львовская политехника"

ул. С. Бандеры, 12, г. Львов, 79013, Украина. E-mail: i_shchur@yahoo.co.in, an_box@mail.ru

С целью использования в контрроторной автономной ветроустановке для бесконтактной передачи выработанной электроэнергии, а также дискретного автоматического регулирования разработана компьютерная модель специального трехфазного трансформатора с вращающейся частью. В модели учтены наличие воздушного промежутка между полусердечниками, потери в стали при его работе от источника переменного напряжения и частоты, а также дискретное переключение отводов вторичной обмотки. Сформированы условия квазіоптимального дискретного регулирования нагрузки синхронного генератора с постоянными магнитами, который через трансформатор отдает электрическую энергию в аккумуляторные батареи. Приведены результаты компьютерного моделирования системы в целом.

Ключевые слова: контрроторная автономная ветроустановка, трансформатор с вращающейся частью, квазіоптимальное дискретное регулирование.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Вітроенергетичний потенціал різних територій України характеризується низькими середньорічними швидкостями вітру на рівні 4–5 м/с [1], і цей потенціал на сьогодні можна раціонально використовувати завдяки малопотужним автономним вітроенергоустановкам (ВЕУ), які розташовуються безпосередньо біля споживачів. Такі малопотужні ВЕУ мають працювати з максимальною енергетичною ефективністю, тому для генерування електричної енергії в них доцільно використовувати синхронні генератори з постійними магнітами (СГПМ).

Для ефективного використання енергії вітру на зазначених вище низьких швидкостях застосовуються ВЕУ з вертикальною віссю обертання, які характеризуються низькою перевагою: немає необхідності у пристроях для орієнтації на вітер, спрощується механічна трансмісія через відсутність мультиплікатора, зменшуються гіроскопічні навантаження, що підвищує енергетичну ефективність та надійність генерування електроенергії [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питома вартість СГПМ для ВЕУ (грн/кВт) обернено пропорційна до його номінальної кутової швидкості. Застосування контрроторної ВЕУ з вертикальною віссю обертання дає змогу вдвічі збільшити кутову швидкість СГПМ і, відповідно, зменшити розміри та вартість генератора [3].

Оскільки автономна ВЕУ працює на акумуляторну батарею, напруга якої практично незмінна, то

для узгодження напруги СГПМ, яка змінюється в широких межах зі зміною швидкості вітру, необхідно застосування складних напівпровідникових систем перетворення параметрів електроенергії (активних випрямлячів, DC–DC перетворювачів).

Також у контрроторній ВЕУ виникає проблема у передачі виробленої електричної енергії з якоря генератора, що розміщений на рухомій частині установки (контрроторі). Стандартним вирішенням цієї проблеми є використання контактних кілець, проте вони знижують надійність ВЕУ та зумовлюють нестабільність її параметрів [4].

Для безконтактної передачі та регулювання виробленої електричної енергії з рухомих частин контрроторної ВЕУ з вертикальною віссю обертання пропонується використання трансформатора з обертовою частиною, індуктивність взаємодукції для кожної фази якого не залежить від кута повороту його рухомої частини [5].

Метою роботи є розроблення системи квазіоптимального дискретного регулювання навантаження СГПМ у безконтактній контрроторній автономній вітроустановці та комп'ютерне симулювання її роботи.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. ВЕУ малої потужності складаються з вітроротора (ВР), електричного генератора, пристроїв перетворення і керування параметрами генерованої енергії та споживачів. Функціональна залежність між вихі-

дною потужністю P_{AD} та швидкістю вітру відображається відомою залежністю [2]

$$P_{BP} = 0,5\rho AC_p(\lambda)V^3, \quad (1)$$

де ρ – густина повітря; A – площа омивання ВР; $C_p(\lambda)$ – коефіцієнт потужності ВР, який залежить від конструктивних особливостей ВР та його швидкохідності $\lambda = \omega r/V$; ω – кутова швидкість ВР; r – радіус ВР.

Характеристика $C_p(\lambda)$ для певного ВР є визначальною, а залежність вихідної потужності від кутової швидкості генератора (через відсутність редуктора між генератором та ВР $\omega_{ген} = \omega_{ВР}$) має вигляд сімейства характеристик (рис. 1).

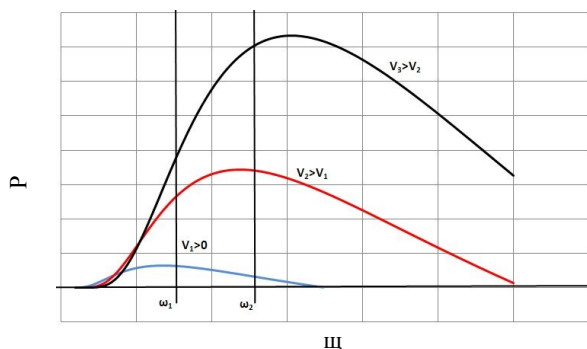


Рисунок 1 – Залежність вихідної потужності ВР від кутової швидкості генератора

Розглядаючи малопотужні автономні ВЕУ, основний наголос ставиться на максимальну енергетичну ефективність їх роботи. Для цього необхідно, щоб робоча точка ВЕУ при зміні швидкості вітру постійно знаходилася в околі максимумів характеристик, показаних на рис. 1.

Попередньо було розроблено математичну модель трансформатора з обертовою частиною, у якій було враховано наявність повітряного проміжку між пів-осередями, а також те, що трансформатор працює від джерела живлення (генератора), напруга та частота якого є змінними [3]. Також було проведено розрахунок раціональних параметрів трансформатора для макетного зразка контрроторної ВЕУ. Трансформатор розрахований таким чином, щоб утримати значення його вихідної напруги у вузьких межах для найбільш ефективного зарядження акумуляторних батарей. Для цього у ньому передбачено низку відводів від трифазної вторинної обмотки, які автоматично перемикаються електронними ключами (симисторами). У табл. 1 приведено номінальні параметри для трьох відпайок вторинної обмотки експериментального трансформатора.

Оскільки трансформатор працює дискретно, то для відбору максимуму потужності він має перемикатися в певному діапазоні кутових швидкостей. Для першої відпайки цей діапазон становить $0 \dots \omega_1$, для другої – $\omega_1 \dots \omega_2$, для третьої – більше ω_2 (рис. 1). Таке перемикання буде забезпечувати квазіоптимальну роботу ВЕУ в околі максимумів характеристик $P_{ВР}(\omega_{ген})$ та її максимальну ефективність.

Таблиця 1 – Номінальні параметри для трьох відпайок вторинної обмотки експериментального трансформатора

Частота напруги живлення, f_1 , Гц	40	80	120
Фазна первинна напруга, U_1 , В	11	22	33
Фазна вторинна напруга, U_2 , В	16	16	16

Побудована за простою схемою з використанням обертового трансформатора (рис. 2) система перетворення та регулювання параметрів електроенергії, що генерується в автономній ВЕУ, є недорогою та надійною в роботі й дає змогу відмовитися від складних імпульсних напівпровідникових систем керування.

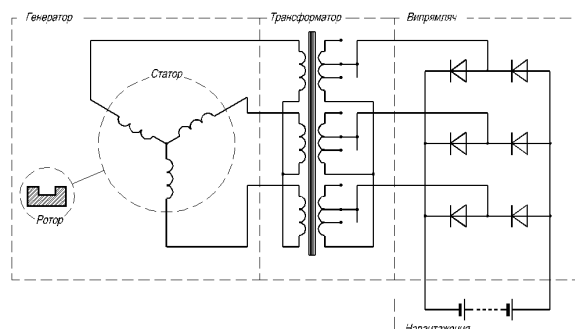


Рисунок 2 – Електрична схема силової частини ВЕУ

За отриманими результатами розрахунків та польового 3D-моделювання електромагнітних процесів у середовищі MatLab/Simulink розроблено комп'ютерну модель однієї фази такого трансформатора на основі заступної схеми з приведенням вторинної обмотки до первинної (рис. 3).

До складу моделі входять такі підсистеми:

- Iron loss – підсистема для врахування втрат у сталі залежно від частоти напруги генератора;
- Secondary winding – підсистема, що враховує втрати, а також потоки розсіювання у вторинній обмотці при роботі на різних відпайках;
- Subsystem Signal winding – підсистема, яка подає сигнал на підімкнення певної відпайки залежно від частоти обертання генератора;
- Subsystem Nomer – підсистема, що формує інформацію про те, на якій відпайці працює трансформатор;
- Subsystem bringing – підсистема для зв'язку приведених параметрів електричного кола вторинної обмотки з реальним навантаженням.

Для досліджень роботи трансформатора було складено комп'ютерну модель цілої електромеханічної системи ВЕУ: СГПМ → трансформатор → силові ключі → навантаження (рис. 4).

Для моделювання СГПМ вибрано багатополосну ($p = 12$) синхронну машину з постійними магнітами з наступними параметрами: $R = 0,3$ Ом; $L_d = L_q = 1$ мГн; $\Phi = 0,4$ Вб. Момент інерції макетної ВЕУ прийнятий $J = 0,5$ кг·м².

На виході генератора підімкнено три однофазні трансформатори (рис. 3) з обертовою частиною.

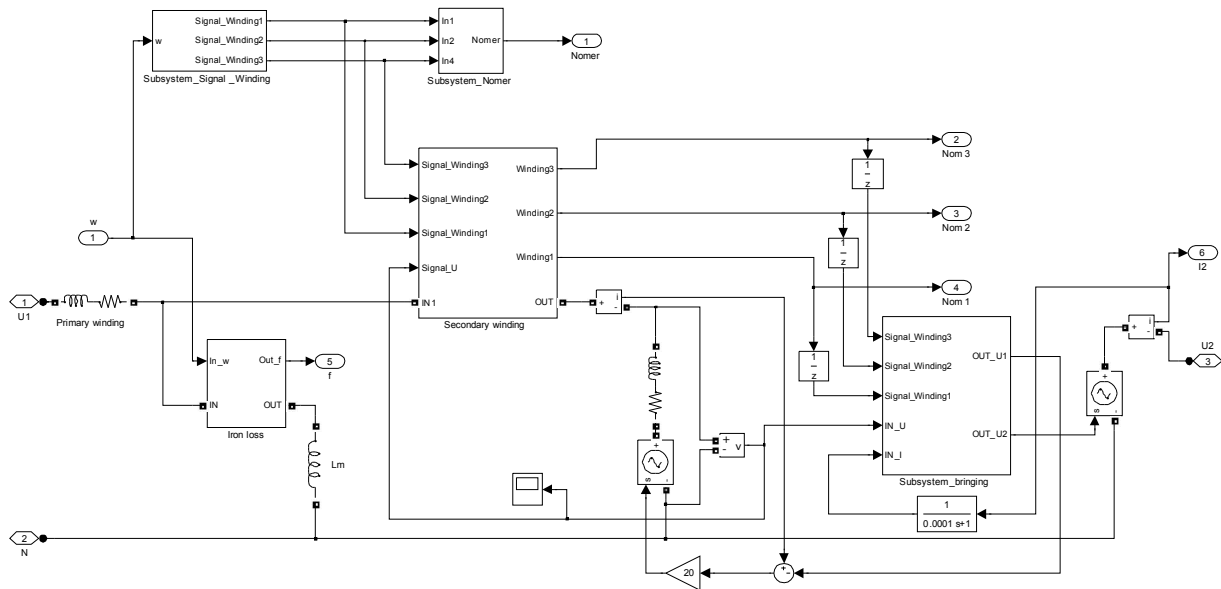


Рисунок 3 – Комп’ютерна модель однієї фази трансформатора

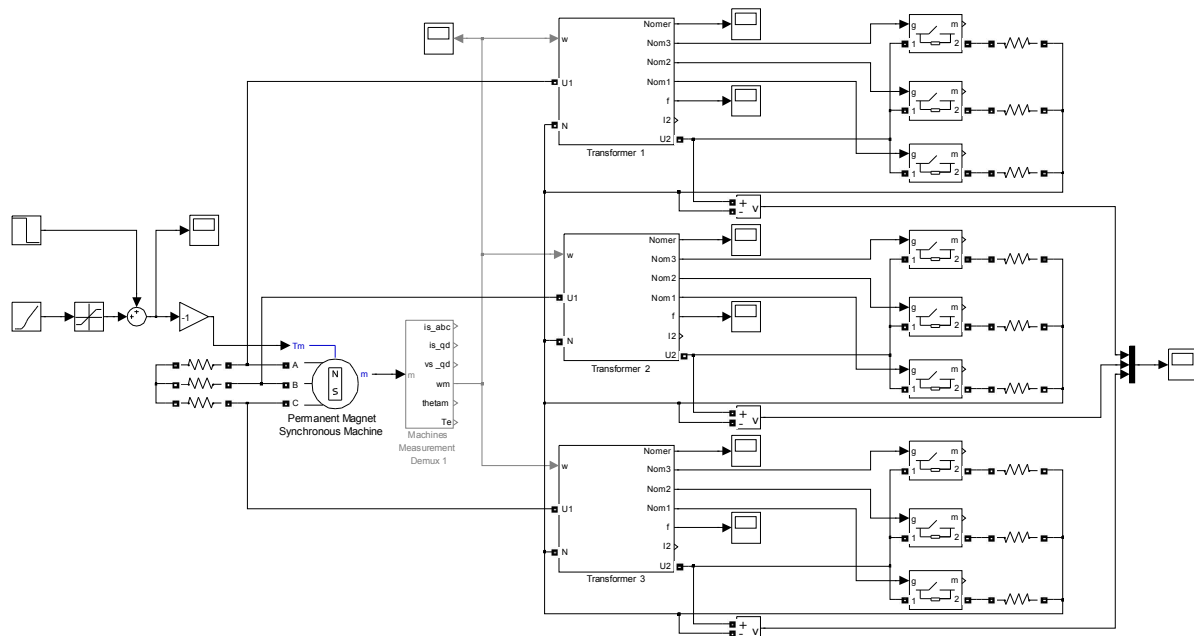


Рисунок 4 – Комп’ютерна модель електромеханічної системи ВЕУ

Величини оптимальних опорів трифазного навантаження, які на даному етапі досліджень замінюють акумуляторну батарею, розраховано для номінальних параметрів кожної відпайки вторинної обмотки трансформатора і мають такі значення: для $U_1 = 11$ В опір $R_n = 64,08$ Ом; для $U_1 = 22$ В – $R_n = 7,39$ Ом; для $U_1 = 33$ В – $R_n = 2,06$ Ом. Для підключення опорів навантаження використовуються ключі, що керуються сигналами з моделі трансформатора, які формує підсистема Subsystem Signal winding залежно від кутової швидкості генератора.

Варто відзначити, що підсистема Subsystem Signal winding подає сигнал на підімкнення певної відпайки в момент переходу напруги через 0, що дає можливість здійснити перемикання силових ключів у міжструмовій паузі (рис. 5).

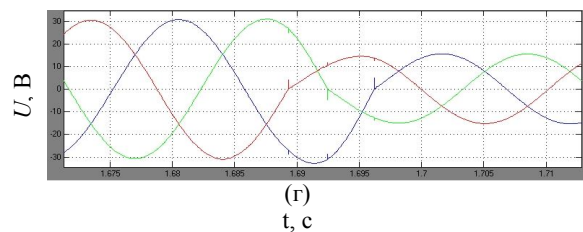


Рисунок 5 – Перемикання відпайок трансформатора під час безструмової паузи

Результати комп’ютерного моделювання приведено на рис. 6. До генератора плавно підводиться рушійний момент від 0 до 15 Нм, а в момент часу 7 с відбувається скидання навантаження до величини 6 Нм (рис. 6,а). При цьому кутова швидкість СГПМ змінюється (рис. 6,б) і, відповідно до неї, здійсню-

ється перемикання відпайок трансформатора (рис. 6,в) таким чином, щоб вихідна трифазна напруга трансформатора мінімально відхилялася від заданого значення (рис. 6,г).

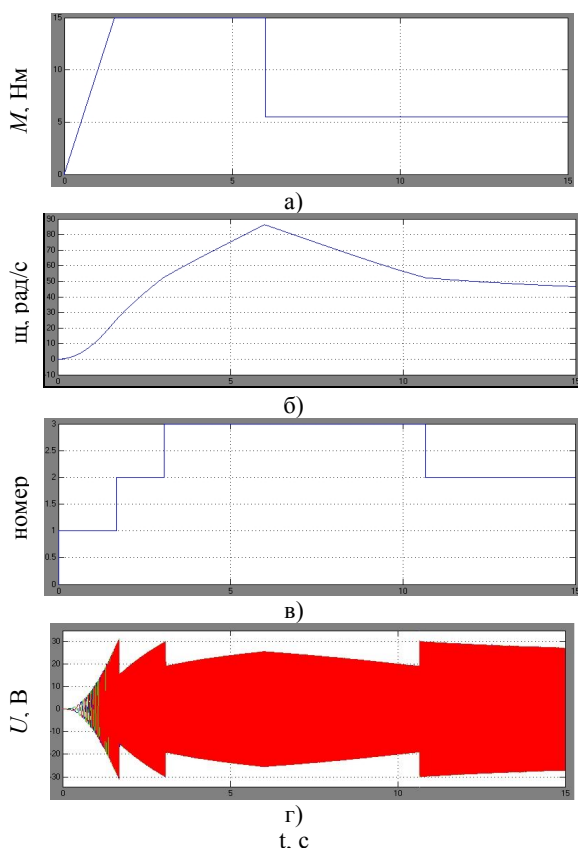


Рисунок 6 – Результати моделювання:
 а) момент на валу генератора; б) кутова швидкість генератора; в) номер відпайки; г) напруга на навантаженні

QUASI-OPTIMAL DISCRETE CONTROL OF LOAD OF SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS IN CONTACTLESS KONTRRORATOR AUTONOMOUS WIND TURBINE

I. Schur, A. Kovalchuk

National University "Lviv Polytechnic"

vul. St. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine. E-mail: i_shchur@yahoo.co.in, an_box@mail.ru

In order to use in counter-rotor autonomous wind turbine for contactless transmission of generated electric power and discrete automatic control, the computer model of specifically three-phase transformer with a rotating part was developed. The model takes into account the presence of an air gap between the semi-core iron loss during its operation from AC voltage and frequency, and discrete re-switch of taps of the secondary winding. It was formed the condition of discrete quasi-optimal regulation of load of the synchronous generator with permanent magnets, which through a transformer gives electrical energy to the batteries. The results of computer modeling of whole system was shown.

Key words: counter-rotor autonomous wind turbine, transformer with a rotating part, quasi-optimal discrete control.

REFERENCES

1. Richard T., Kalinichenko V. *Renewable energy sources (experience of Poland in Ukraine): Manual-nickname*. – Warsaw, 2010. – 532 p. [in Ukrainian]
2. Schur I., Turlenko O. Energy efficiency of different methods of taking off of power from synchronous generator with permanent magnets in wind turbine // *Bulletin of the NU "Lviv Polytechnic" Electromechanic and electroenergetic systems*. – Lviv, 2009. – Iss. 654. – PP. 272–277. [in Ukrainian]
3. Kovalchuk A. Transformer for counter-rotor wind turbine with vertical axis of rotation // *Bulletin of the NU "Lviv Polytechnic" Electromechanic and electro-energetic systems*. – Lviv, 2012. – (in print). [in Ukrainian]
4. Yatsun M.A. *Electric machines: teach. aids for students*. – Lviv: NU "Lviv Polytechnic", 2004. – 440 p. [in Ukrainian]
5. Kovalchuk A. Rotary transformer for counter-rotor wind turbine with vertical axis of rotation // *Collected Works of X Intern. scientific-technical conf. of young scientists and specialists in Kremenchug, 28–29 March 2012*. – Kremenchuk, KrNU, 2012. – PP. 122–123. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 15.06.2012.

Рекомендовано до друку
 к.т.н., доц. Сергіємком С.А.