

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОРЕКЦІЇ ВИХІДНОЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ ВВЕДЕННЯ СТАТИЧНИХ КОНДЕНСАТОРІВ ПРИ ДИСКРЕТНИХ ЗНАЧЕННЯХ ШВИДКОСТІ ВІТРУ

<sup>1</sup>Чумак В.В., к.т.н., доц., <sup>1</sup>Коваленко М.А., к.т.н., доц., <sup>1</sup>Реуцький М.О., к.т.н., доц., <sup>2</sup>Коваленко І.Я., асп., асист., <sup>1</sup>Ткачук І.В., асп., асист.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, <sup>1</sup>кафедра електромеханіки, <sup>2</sup>кафедра відновлюваних джерел енергії

**Вступ.** Одним із основних складових елементів вітроустановок є електричний генератор. Досвід та розробки зарубіжних та вітчизняних вчених показав, що на даний момент найбільшу ефективність мають генератори вітроустановок, що виконані на базі постійних магнітів із рідкоземельних елементів (SmCo, NdFeB) [1-3].

**Мета дослідження.** Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок вдосконалення конструкції існуючих типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів [1, 2, 4]. Найчастіше використовують генератори циліндричної конструкції із постійними магнітами та генератори торцевого типу з двосторонньою активною поверхнею. Використання саме торцевого генератора модульної конструкції дозволяє підвищити питому потужність установки та покращити використання активних матеріалів генератора (електротехнічної сталі, постійних магнітів, обмотувального проводу).

**Матеріали та результати досліджень.** Торцеві електричні машини виконуються з великим числом пар полюсів, що найбільш вигідно виділяє цей клас для застосування в низько швидкісних або в високочастотних приводах. На рис. 1 наведено порівняння серії електричних машин з аксіальним та радіальним магнітним потоком, тобто циліндричної машини для діапазону потужностей від 0,25 до 10 кВт [5].

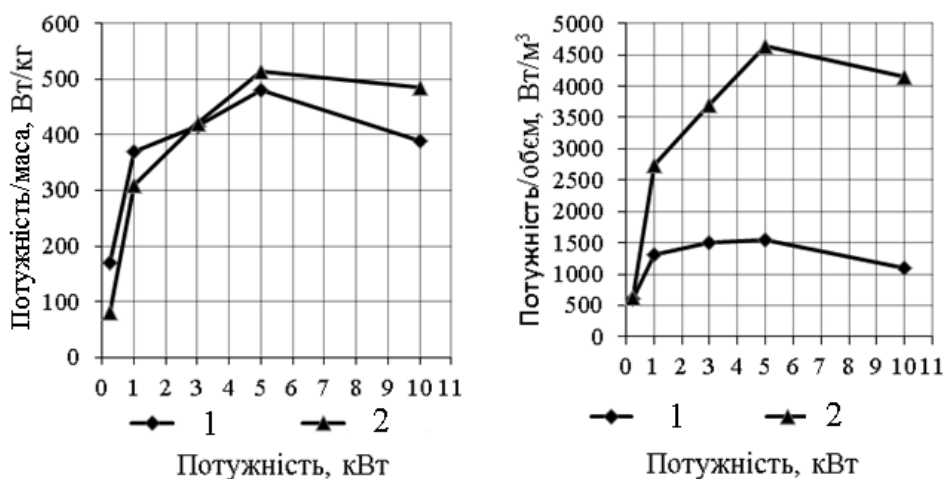


Рисунок 1 – Порівняння характеристик циліндричної (1) машини та торцевої з двосторонньою активною поверхнею (2)

При порівнянні машин близької потужності, машини з аксіальним потоком мають менший об'єм і масу активних матеріалів, ніж машини традиційної циліндричної конструкції. Особливо це стосується співвідношення потужності і об'єму машин в діапазоні потужностей від 0,25 до 10 кВт [6]. Діапазон потужності електричних генераторів з аксіальним магнітним потоком збудження лежить в межах від часток Вт до МВт. При збільшенні вихідної потужності генератора, контактна поверхня з'єднання вала і ротора зменшується непропорційно до загального об'єму машини, що обмежує вихідну потужність машини з точки зору механічної цілісності і міцності валу машини [7].

Одним із способів стабілізації вихідних параметрів вітроелектричного комплексу є підмагнічування електрогенератора сторонньою ємністю. Проте в даний час питання математичного моделювання корекції вихідної потужності генератора за допомогою введення статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру приділялося недостатньо уваги.

Метою роботи є в розробка математичної моделі, що дозволяє отримати необхідну величину вихідної потужності при введенні статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру.

Математична модель корекції вихідної потужності генератора за допомогою статичних конденсаторів при дискретних значеннях швидкості вітру реалізовано із використанням пакету MATLAB-Simulink. В свою чергу, кожен із елементів імітаційної моделі представлені окремим блоком, який в свою чергу, описується системою нелінійних (лінеаризованих) диференціальних рівнянь.

Рівняння, що описують роботи синхронної машини із постійними магнітами та гібридним збудженням наведено нижче. Наявність додаткової підмагнічуючої обмотки враховується в системі рівнянь додатковою складовою:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_d - R_s i_d - L_m \frac{di_f}{dt} + \omega Z_p L_s i_q \right); \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u_q - R_s i_q - \omega Z_p L_s i_d - \omega Z_p L_m i_f - \omega Z_p \psi_0 \right); \\ \frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_f} \left( u_f - R_f i_f + L_m \frac{di_d}{dt} \right); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c); \\ M = \frac{3}{2} Z_p \left[ \psi_0 i_q \pm L_m i_q i_f \right], \end{cases}$$

де  $L_m$  – індуктивність додаткової обмотки;  $R_f$  – реактивний опір додаткової обмотки;  $U_f, i_f$  – напруга та струм додаткової обмотки;  $L_q, L_d$  – індуктивності за осями q та d;  $R$  – активний опір обмотки статора;  $i_q, i_d$  – струми за осями q та d;  $v_q, v_d$  – напруги за осями q та d;  $\omega r$  – кутова швидкість ротора генератора;  $\lambda$  – амплітуда магнітного потоку, що створюється постійними магнітами та додатковою обмоткою;  $p$  – кількість пар полюсів генератора;  $T_e$  – електромагнітний момент досліджуваного генератора.

На рис. 2. наведено вигляд розробленої математичної моделі досліджуваного електрогенератора в складі вітроустановки при підмагнічуванні обмотки якоря сторонньою ємністю.

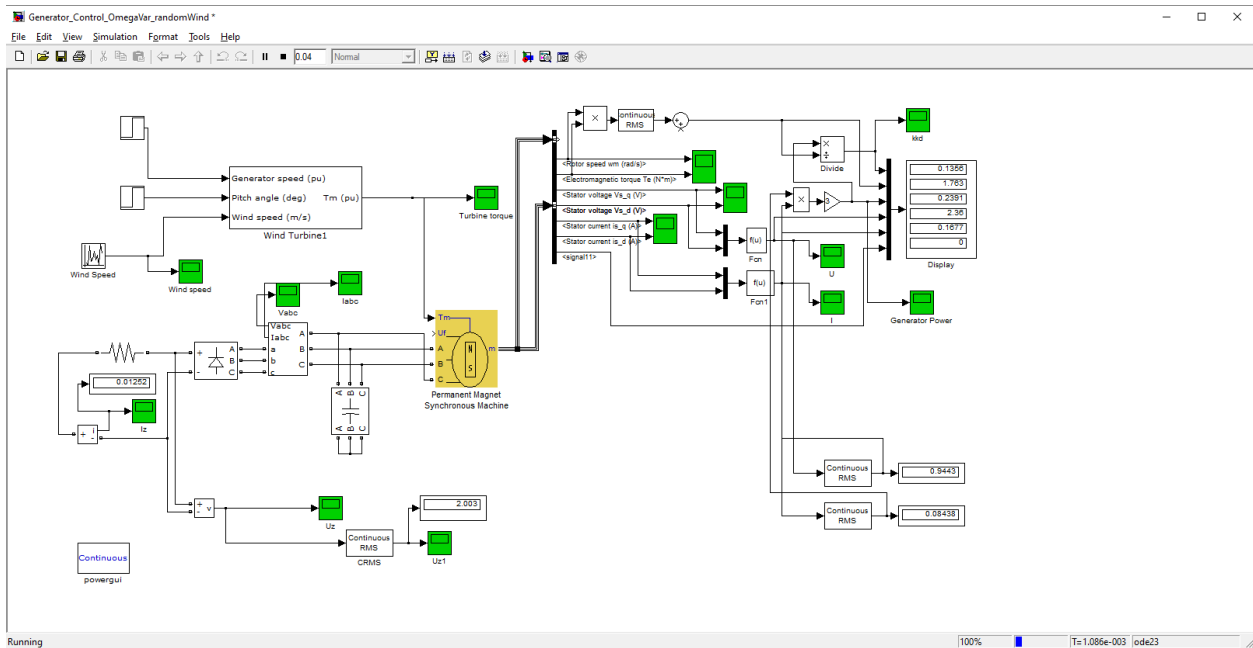


Рисунок 2 – Вигляд імітаційної моделі електрогенератора при підмагнічуванні сторонньою ємністю та дискретних значеннях швидкості вітру

Моделювання проводилось при постійному активному навантаженні генератора (моделювання при зміні швидкості обертання ротора генератора) та при постійній додатковій ємності на затискачах генератора.

Алгоритм розрахунку для даного варіанту імітаційної моделі наступний:

- задається постійний опір навантаження  $R=400$  Ом;
- задаються наступні значення додаткової ємності в обмотці якоря генератора  $C=10$  мФ,  $C=30$  мФ,  $C=100$  мФ;
- розраховується значення струму, напруги та потужності генератора;

Порівняння миттєвого значення напруги з конденсаторами 30 мкФ (верхня крива) та без регулювання (нижня крива) на виході генератора від часу при мінливій швидкості вітру наведено на рис. 3.

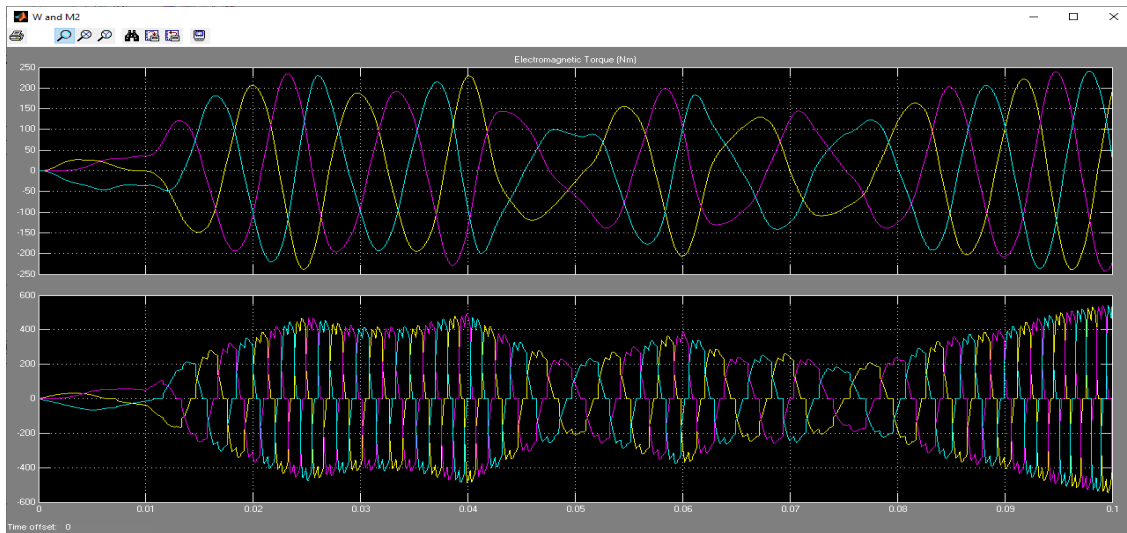


Рисунок 3 – Залежність миттєвої напруги на виході генератора при дискретному вітрі

За результатами моделювання впливає, що миттєве значення напруги на виході генератора при приєднанні додаткової ємності в 30 мкФ та при випадковій швидкості вітру відрізняються від напруги без регулювання. Амплітудне значення напруги при приєднаній ємності менше приблизно в 1,8 рази, що пояснюється збільшенням падіння напруги на додатковій ємності. Крім того, характер кривої при приєднанні додаткової ємності носить більш плавний характер, за рахунок накопиченої в ємності енергії.

#### Перелік посилань

1. Chumack, Vadim and Bazenov, Volodymyr and Tymoshchuk, Oksana and Kovalenko, Mykhailo and Tsyvinskyi, Serhii and Kovalenko, Iryna and Tkachuk, Ihor, Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation (December 21, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. doi:10.15587/1729-4061.2021.246601, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3993765>. DOI: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3993765](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3993765).
2. Vadim Chumack, Serhii Tsyvinskyi, Mykhailo Kovalenko, Alexej Ponomarev, Ihor Tkachuk Mathematical modeling of a Synchronous generator with combined excitation // (2020) Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(5 (103)), 30-36. doi 10.15587/1729-4061.2020.193495.
3. В.М. Головка, М.А.Коваленко, Коваленко І.Я., І. Р.Галасун (2020). Математичне моделювання автономної вітроустановки з синхронним генератором магнітоелектричного типу. Відроджена енергетика, Київ. - 2020. - №4(63), с. 50-58.
4. Коваленко І.Я. (2021). Робота синхронного генератора з постійними магнітами при підмагнічуванні сторонньою ємністю. Відроджена енергетика, Київ. - 2021. - №1(64), с. 50-58
5. F. O. Ribeiro, João A. Vasconcelos Robust Design of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Many-Objective Optimization Approach // IEEE Transactions on Magnetics 2018. - № 54. – P. 12-22.
6. Nedjar, B.; Hlioui, S.; Amara, Y.; Vido, L.; Gabsi, M.; Lécrivain, M. A new parallel double excitation synchronous machine. IEEE Trans. Magn. 2011, 47, 2252–2260.
7. Hua, H., Zhu, Z.Q., Zhan H. Novel Consequent-Pole Hybrid Excited Machine with Separated Excitation Stator // IEEE Trans. Ind. Electron. 2016, 63, 4718–4728.