

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-285-5-44-49>

УДК 621.313.332

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ ПРИ УРАХУВАННІ АКТИВНОГО ОПОРУ У КОНТУРІ КОМУТАЦІЇ РОТОРНОГО ВИПРЯМЛЯЧА

Стрункін Г.М.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR WITH A PHASE ROTOR TAKING INTO ACCOUNT THE ACTIVE RESISTANCE IN THE ROTOR RECTIFIER COMMUTATION CIRCUIT

Strunkin H.M.

*У статті наведено відомості про принципи урахування активного опору у контурі комутації роторного випрямляча асинхронного генератора з фазним ротором для машин малої та середньої потужності. Доводиться, що при використанні у якості генератора серійної асинхронної машини – кранового двигуна – при нехтуванні впливу активного опору ротора на процес комутації роторного випрямляча виникає похибка при розрахунку його механічної характеристики. Дано посилання на авторську методику розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням змінного активного опору ротора від ковзання. Висвітлено мету та план експериментального дослідження. Описано експериментальний стенд для зняття механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором. Для створення проти-ЕРС роторного випрямляча використано послідовно ввімкнені діоди. Надані відомості про вимірвальні прилади, які використано в експерименті. Розкрито методику вимірювання кутової швидкості обертання вала асинхронного генератора. Описується методика обчислення моменту генератора, виходячи з моменту гонного двигуна та моменту втрат агрегату, яку апроксимовано за експериментальними даними. Наводяться результати експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного генератора та порівняння з розрахунковими залежностями, отриманими за авторською методикою. Експеримент проведено для зменшеного значення статорної напруги для зменшення струму намагнічування генератора. Пояснено деяке відхилення експериментальних даних від теоретично розрахованих у зоні малих ковзань. Розповсюджується припущення Булгакова О.О. про вплив на*

*процес комутації випрямляча лише параметрів вторинної обмотки трансформатора на випадок з роторним випрямлячем асинхронного генератора з фазним ротором – лише параметрів ротора. Висновок містить інформацію про підтвердження механічних характеристик асинхронного генератора з фазним ротором, які отримано за теоретичними розрахунками, експериментальними даними.*

**Ключові слова:** асинхронний генератор з фазним ротором, механічна характеристика, активний опір ротора, роторний випрямляч, комутація.

**Вступ.** З розвитком малої та середньої автономної вітроенергетики все більше уваги приділяється системам на базі асинхронного генератора з фазним ротором (АГФР), або doubly-fed induction generator (DFIG) [1, 2], де більшість потужності знімається безпосередньо зі затискачів статора. Встановлена потужність перетворювача в ланцюзі ротора, призначеного для регулювання робочих режимів генератора, визначається, відповідно, потужністю ковзання [3]. Додаткове зниження вартості такої установки може бути досягнуто застосуванням серійного асинхронного двигуна, що використовується в генераторному режимі, що виключає витрати на розробку та впровадження спеціалізованих машин [4]. Аналіз існуючого ринку електричних машин із фазним ротором (малої та середньої потужності) [5] показав, що їх асортимент

вичерпується лише асинхронними двигунами краново-металургійної серії.

У даний час в літературі при аналізі електромагнітних процесів комутації у роторному випрямлячі не враховується вплив активного опору ротора [1, 6], що допустимо лише для великих машин, що працюють при відносно великих ковзаннях. Для кранових електроприводів узгодженого обертання, навпаки, враховують лише активний опір у контурі комутації [7]. А для випрямлячів у теорії комутації відношення активного опору первинного джерела (трансформатора) до реактивного прийнято постійним [8], тоді як у АГФР воно є функцією ковзання. У зв'язку з цим у машинах малої та середньої потужності, де активний опір досить великий, при розрахунку механічної характеристики виникає похибка.

Автором була презентована методика розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням впливу активного опору ротора за допомогою регресійних моделей [9].

**Метою роботи** є експериментальне підтвердження методики розрахунку механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором з урахуванням впливу активного опору ротора.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- розробка експериментального стенду;
- виготовлення експериментального стенду для зняття механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором;
- безпосереднє проведення експериментальних робіт.

План експерименту передбачає наступний обсяг робіт:

- зняття показників втрат;
- зняття механічних характеристик асинхронного генератора з фазним ротором.

Для повноцінного зіставлення розрахункових та експериментальних характеристик бажано мати результати вимірювань у діапазоні ковзань не менш критичного. Очевидно, що такі режими важко реалізувати при номінальній напрузі на обмотках статора, оскільки і струм в обмотках машини, і момент на валу будуть у кілька разів більшими за номінальні величини. Тому,

для подолання апаратних ускладнень та забезпечення нормального теплового режиму випробуваної машини, експериментальні характеристики генератора були зняті при напрузі на статичних обмотках рівній 55 В (1/4 від номінальної).

Для зняття характеристик генератора розроблено спеціалізований стенд, схема якого представлена на рис. 1.

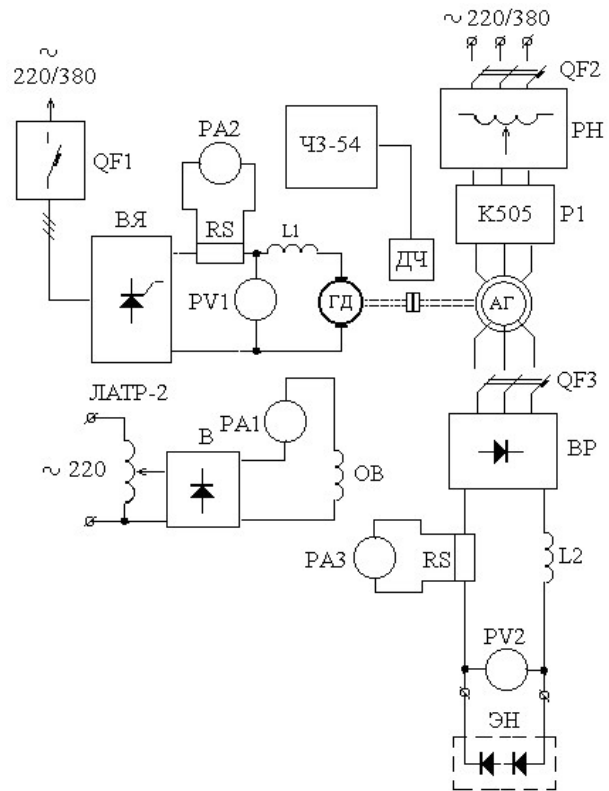


Рис. 1. Структурна схема випробувального стенду

Стенд містить генератор АГ, що випробовується, типу МТФ-111-6, який механічно зістикуваний з двигуном постійного струму (гонний двигун) ГД (типу ПН-52-2, потужністю 7,4 кВт, при 3000 об/хв). Статор АГ підключений до мережі промислової частоти через регулятор напруги РН (три автотрансформатори типу РНО-250-25). Вимірювальний комплект К505 дозволяє вимірювати струм, напругу та активну потужність у будь-якій з фаз генератора. У ланцюг ротора генератора включений діодний трифазний мостовий випрямляч ВР, на виході якого встановлені згладжуючий реактор L2, і еквівалент навантаження ЕН, який складається з 20 послідовно включених діодів типу ВД-10. Вихідний струм випрямляча та напруга на навантаженні вимірювалися відповідними

вимірювальними приладами магнітоелектричної системи (PV2, PA3).

Живлення обмотки збудження двигуна постійного струму ВВ здійснювалося від допоміжного випрямляча, вхідну напругу якого можна змінювати за допомогою регульовального автотрансформатора ЛАТР-2. Струм збудження двигуна вимірювався амперметром PA1 і під час проведення експерименту підтримувався постійним (1А).

Якір двигуна постійного струму живився від тиристорного випрямляча ВЯ, на виході якого встановлені згладжуючий реактор L1 і необхідні вимірювальні прилади (PA2, PV1). Крім того, стенд обладнаний належною захисною та комутаційною апаратурою.

Схему вимірювання швидкості обертання валу генератора наведено на рис. 2.

Вона складається з:

- диска, що обертається (поз. 1), який закріплений на сполучній муфті (поз. 2);
- інфрачервоного датчика ПЛТ1Д-0,25/3 з апертурою 0.25 мм (поз. 3), закріпленого на нерухомій платформі;
- пристрою сполучення (поз. 4);
- частотоміра ЧЗ-54 (поз. 5).

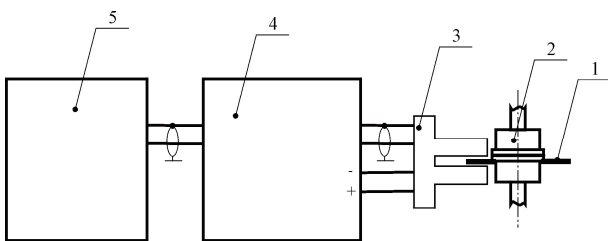


Рис. 2. Схема вимірювання швидкості обертання валу генератора

Зовнішнім краєм диск, що обертається, входить у проріз інфрачервоного датчика на глибину 8 мм і перетинає світловий потік від джерела до приймача випромінювання.

На зовнішній стороні диска розташований проріз у вигляді сектора з кутом  $3^\circ$  і глибиною 10 мм.

При обертанні диска проріз поєднується з прорізом датчика. У цей момент випромінювання від джерела потрапляє на фотоприймач, у результаті з'являється електричний сигнал на виході датчика. Сигнал датчика, після посилення та інвертування у пристрої сполучення, передається на частотомір ЧЗ-54. Частота

проходження імпульсів  $f$  відповідає частоті обертання валу генератора. Відносна похибка частотоміра  $\delta_\omega = \delta_f = \pm 0.031\%$ . Кутова частота обертання визначається формулою:

$$\omega = 2\pi f. \quad (1)$$

Електромагнітний момент генератора визначається через механічну потужність на валу:

$$M_{em} = \frac{P_{mex}}{\omega}, \quad (2)$$

де  $P_{mex}$  - механічна потужність генератора,  $\omega$  - кутова швидкість валу генератора.

Механічна потужність може бути визначена з електричної потужності двигуна за відомих втрат в агрегаті. Позначимо ці втрати через загальні втрати  $\Delta P_\gamma$ .

Таким чином, механічна потужність може бути визначена з виразу:

$$P_{mex} = P_{e.d.} - \Delta P_\gamma, \quad (3)$$

де  $\Delta P_\gamma = I_\gamma^2 R_\gamma$  - втрати в обмотці якоря;  $I_\gamma$  - струм якоря,  $R_\gamma$  - опір обмотки якоря.

Електрична потужність двигуна визначається:

$$P_{e.d.} = U_\gamma \cdot I_\gamma, \quad (4)$$

де  $U_\gamma$  - напруга на якорі.

Таким чином, електромагнітний момент визначається з виразу:

$$M_{em.g.} = \frac{P_{mex}}{\omega} - M_\Pi, \quad (5)$$

де  $M_\Pi$  - момент втрат.

Момент втрат був знятий експериментально, після чого апроксимований залежністю:

$$M_\Pi = 1,589 + 0,00765\omega. \quad (6)$$

Механічна характеристика АГФР знімається шляхом вимірювання швидкості обертання валу генератора з подальшим розрахунком моменту.

Експеримент проводився у такому порядку:

1. Подається живлення обмотки збудження двигуна постійного струму.

2. Увімкнувши QF2, QF3, здійснити пуск асинхронної машини в руховому режимі.

3. Включити систему управління випрямляча ВЯ, встановивши кути управління 90 градусів, а також його напругу живлення (автоматичний вимикач QF1).

4. Збільшуючи напругу на обмотці якоря, встановити заданий струм якоря ГД, контролюючи його значення за амперметром РА2.

5. Зняти значення напруги якоря за приладом РВ1.

6. Зняти значення частоти обертання за показаннями частотоміра.

7. Зняти значення струму у ланці постійного струму за приладом РА3.

8. Встановити наступне значення струму якоря. Повторити виміри за пунктами 5...7.

9. Повторити пункти 4...8 під час замикання еквівалента навантаження (роторний випрямляч навантажений лише на реактор).

10. Вимкнути напругу живлення випрямляча ВЯ вимикачем QF1.

11. Вимкнути асинхронну машину вимикачами QF2, QF3.

12. Вимкнути живлення обмотки збудження.

На рис. 3 показані механічні характеристики асинхронного генератора, побудовані за методикою, представленою в [9], при припущенні, що було висунуто Булгаковим О.О. [8] про те, що опір ланцюга комутації визначається параметрами лише ланцюга ротора, тобто  $X_a = X_2$  і  $R_a = R_2$ . На цьому рисунку точками нанесені результати експериментальних вимірювань, виконаних на стенді за описаною вище методикою.

Як видно з представленого рисунка, розрахункові та експериментальні результати досить близькі. Деяке відхилення експериментальних даних від розрахункових кривих, яке спостерігається при малих моментах, пояснюється зниженням напруги у ланці постійного струму роторного випрямляча, пов'язане зі зменшенням падіння напруги на діодах еквівалента навантаження при зменшенні струму.

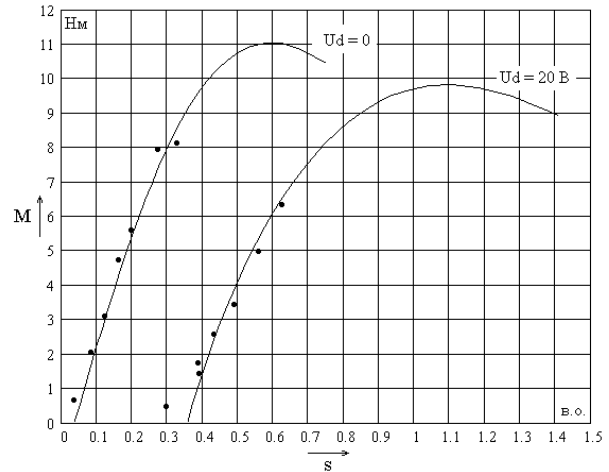


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень та зіставлення їх із розрахунком

Відсутність експериментальних точок з моментами, близькими до величини критичного моменту, пов'язана з апаратними обмеженнями (недостатня потужність узгоджуючого трансформатора на вході тиристорного випрямляча).

На рис. 4 показані механічні характеристики асинхронного генератора, побудовані при припущенні, що опір ланцюга комутації визначається параметрами ланцюга короткого замикання машини, тобто  $X_a = X_2 + X_1'$  і  $R_a = R_2 + R_1'$ .

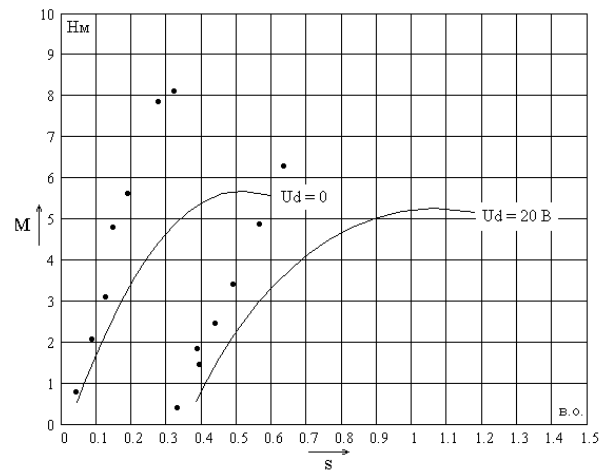


Рис. 4. Результати експериментальних досліджень та зіставлення їх з розрахунком при допущенні

$$X_a = X_2 + X_1' \text{ і } R_a = R_2 + R_1'$$

Порівняння представлених результатів дозволяє зробити висновок про те, що облік параметрів обмотки статора в процесах комутації роторного випрямляча призводить до істотного відхилення розрахункових результатів від результатів, які спостерігалися в експерименті.

**Висновки.** Експериментальне дослідження механічної характеристики асинхронного генератора з фазним ротором підтвердило методику її розрахунку з урахуванням впливу роторного опору на процес комутації роторного випрямляча.

Експеримент розповсюдив припущення Булгакова О.О. про вплив на процес комутації випрямляча лише вторинної обмотки трансформатора, для випадка з АГФР – лише роторного ланцюга генератора.

### Література

1. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.
2. Chakraborty, Subhadip & Singh, Bhim & Panigrahi, Bijaya & Roy, Suvom & Das, Souvik & Modi, Gaurav & Kumar, Arjun. Design, Modelling and Seamless Control of an Offgrid DFIG-Battery Energy Storage Based Wind Energy Conversion System for Remote Dwellings. 2024. 547-552. DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474928.
3. Patel M.R. Wind and solar power systems. CRC Press, Boca Raton, 1999. 283p.
4. Лесник В.А., Мазуренко Л.И., Шуруб Ю.В., Джура А.В. Габаритная мощность асинхронной машины в генераторном режиме работы. / Техническая электродинамика. 2004. №2. С. 32-35.
5. Галузевий портал присвячений ринку електродвигунів. – URL: <http://dvigatel.info>, (дата звернення 12.06.2023).
6. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. - М.: Энергия, 1979. 200 с.
7. Андрієнко Д.С. Асинхронний електропривід узгодженого обертання з імпульсно-струмовим обмеженням в колі електрично пов'язаних роторних випрямлячів – Дис. ... кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя, 2020. 189 с.
8. Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970. 320 с.
9. Переверзев А.В., Алексеевский Д.Г., Семенов В.В., Стрункин Г.Н., Таранец А.В. Влияние активного сопротивления ротора на механические характеристики асинхронной машины в генераторном режиме. / Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. Кременчук: КДПУ, 2009. Вип. 3/2009 (56) Частина 1. С107-110.

### References

1. Abadi, G.; Lopez, J.; Rodriguez, M.; Marroyo, L.; Iwanski, G. Doubly Fed Induction Machine:

Modeling and Control for Wind Energy Generation, 1st ed.; John Wiley and Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2011.

2. Chakraborty, Subhadip & Singh, Bhim & Panigrahi, Bijaya & Roy, Suvom & Das, Souvik & Modi, Gaurav & Kumar, Arjun. Design, Modelling and Seamless Control of an Offgrid DFIG-Battery Energy Storage Based Wind Energy Conversion System for Remote Dwellings. 2024. 547-552. DOI: 10.1109/ICPC2T60072.2024.10474928.
3. Patel M.R. Wind and solar power systems. CRC Press, Boca Raton, 1999. 283p.
4. Lesnik V.A., Mazurenko L.I., Shurub Yu.V., Dzhura A.V. Overall power of an asynchronous machine in generator mode of operation. / Technical Electrodynamics. 2004. No. 2. P. 32-35.
5. Industry portal of dedication to the market of electric motors. – URL: <http://dvigatel.info>, (date of publication 06/12/2023).
6. Onishchenko G.B., Lokteva I.L. Asynchronous valve cascades and double-supply motors. М.: Energia, 1979. 200 p.
7. Andrienko D.S. Asynchronous electric drive of mismatched rotation with pulse-current limitation in the circuit of electrically coupled rotor rectifiers. PhD sci. diss. Zaporizhzhya, 2020. 189p.
8. Bulgakov A.A. New theory of controlled rectifiers. – М.: Nauka, 1970. 320 p.
9. Pereverzev A.V., Alekseevsky D.G., Semenov V.V., Strunkin G.N., Taranets A.V. The influence of active rotor resistance on the mechanical characteristics of an asynchronous machine in generator mode. / Bulletin of the Kremenchutsk State Polytechnic University named after. M. Ostrogradsky. Kremenchuk: KDPU, 2009. VIP. 3/2009 (56) Part 1. C107-110.

### **Strunkin H.M. Experimental study of the mechanical characteristics of the asynchronous generator with a phase rotor taking into account the active resistance in the rotor rectifier commutation circuit**

*The article provides information about the principles of maintaining the active support in the commutation circuit of the rotor rectifier of an asynchronous generator with a phase rotor for machines of low and medium load. It is proven that when using a serial asynchronous machine as a generator - a crane motor - while neglecting the influence of the active resistance of the rotor on the commutation process of the rotary rectifier, an error occurs in the calculation of its mechanical characteristics. The author's method for developing the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a phase rotor with a changeable active support for the rotor is given. The purpose and plan of the experimental study are highlighted. An experimental stand for measuring the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a wound rotor is described. To create an anti-EMF rotary rectifier, diodes switched on in series were used. Information about the measuring devices used in the experiment is provided. The method of measuring the*

*angular speed of rotation of the shaft of an asynchronous generator is disclosed. The method of calculating the generator moment is described, based on the moment of the driving engine and the moment of losses of the unit, which is approximated by experimental data. The results of the experimental investigation of the mechanical characteristics of the asynchronous generator and the leveling of the deposits, which are attributed to the author's methodology, are presented. The experiment was carried out for a reduced value of the stator voltage to reduce the magnetizing current of the generator. Some deviation of the experimental data from the theoretically calculated ones in the zone of small slips is explained. The assumption of O.O. Bulgakov is spreading on the effect on the rectifier commutation process of only the parameters of the secondary winding of the transformer in the case of a rotor rectifier of an asynchronous generator with a phase*

*rotor - only the parameters of the rotor. The conclusion contains information about the confirmation of the mechanical characteristics of an asynchronous generator with a phase rotor, which were obtained according to theoretical calculations and experimental data.*

**Key words:** *asynchronous generator with phase rotor, mechanical characteristics, active rotor support, rotary rectifier, commutation.*

**Стрункін Гліб Миколайович** – старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії «Промислова електроніка», Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. 69006, Запоріжжя, проспект Соборний, 226, e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Стаття подана 15.10.2024.