



УДК 621.313.32+621.313.8

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-43

ПОРІВНЯННЯ СИНХРОННИХ МАШИН ГІБРИДНОГО ЗБУДЖЕННЯ З МАШИНАМИ МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗБУДЖЕННЯ

Чумак В. В., к. т. н.,

<http://orcid.org/0000-0001-8401-7931>

Монахов Є. А., інженер,

<http://orcid.org/0000-0001-8408-8051>

Стуліщенко А. С., інженер

<http://orcid.org/0000-0001-9982-9246>*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*e-mail: chumack_kpi@ukr.net

Анотація – синхронні машини з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням отримали широке застосування в якості двигунів та генераторів в різноманітних сферах експлуатації в залежності від поставлених задач. Машинам з електромагнітним збудженням притаманні широкі регульовальні властивості, в той час як машини зі збудженням від постійних магнітів мають високі питомі показники та надійність, однак у них відсутня можливість регулювання основного магнітного потоку. Аналіз існуючих методів регулювання магнітного потоку, які розглянуті у вітчизняних наукових джерелах показав неефективність даних методів. Аналіз зарубіжних наукових джерел показав широкий інтерес до машин з гібридним збудженням, які є проміжною ланкою між класом машин з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням. По суті, машини з гібридним збудженням об'єднують два типи збудження: збудження від постійних магнітів та обмотки збудження.

В даній статті представлено порівняння машин різного типу збудження, а саме: проведено аналіз існуючих серійних машин діапазону потужностей з електромагнітним, магнітоелектричним та гібридним збудженням по критеріям питомої потужності та коефіцієнту корисної дії. Розрахунок машин з гібридним збудженням проведено на основі відомих методик розрахунку машин зі збудженням від постійних магнітів та залученням чисельних методів розв'язання електромагнітних рівнянь поля. Завдяки польовому аналізу було розраховано низку машин з гібридним збудженням потужністю до 75 кВт та проведено їх порівняння з відомими серійними машинами. Встановлено доцільне використання машин з гібридним збудженням при забезпеченні регулювання магнітного потоку в межах до 40% в порівнянні з машинами інших типів збудження.

Ключові слова: синхронні машини, електромагнітне збудження, магнітоелектричне збудження, гібридне збудження, питома потужність, ККД.

Постановка проблеми. Синхронні машини виконуються як з електромагнітним, так і з магнітоелектричним збудженням. Останні мають вищий коефіцієнт корисної дії, надійність та масогабаритні показники. Однак, основним недоліком машин з магнітоелектричним є неможливість регулювання основного магнітного потоку в



повітряному проміжку. Існує ряд методів та способів, які забезпечують регулювання магнітного потоку, такі як підмагнічування, шунтування і т.д. Так, відомо що в машинах з магнітним шунтуванням [1, 2, 3] об'єм постійних магнітів розраховується на випадок максимально допустимого перевантаження, при цьому при номінальному режимі роботи машина використовується недоцільно, що збільшує масогабаритні показники, за рахунок збільшення маси матеріалів активних частин та встановлення додаткового магнітопроводу. В основі відомого методу підмагнічування спинки якоря [1, 3] лежить зміна магнітного опору ділянки по якій проходить основний магнітний потік. Перевагою методу є простота, але при цьому підвищується габарит, збільшується витрати активних матеріалів (збільшується висота спинки якоря та використовується додаткова обмотка). Даний метод має обмежений діапазон регулювання порядку до 30% [3].

Проміжною ланкою між машинами з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням є машини з гібридним збудженням, які мають в певному діапазоні регулюванні переваги обох класів машин.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз вітчизняних наукових джерел показав відсутність відповідних досліджень, в той час як аналіз зарубіжних наукових праць вказує на широкий інтерес в останні десятиріччя до машин з гібридним збудженням [4-7]. В роботах [4, 5, 7, 8] машини з гібридним збудженням розглядаються в якості синхронних двигунів, що дозволяє розширити зону регулювання частоти обертання та оптимізувати режими роботи. Автори робіт [7] проводять оцінку глибини регулювання вихідної напруги машин з гібридним збудженням у режимах синхронного генератора. Однак, в роботах [9, 10] не приводиться аналіз ефективності та питомих показників даних машин в порівнянні з машинами з електромагнітним та магнітоелектричним збудженням.

Формулювання цілей статті. Метою статті є порівняння основних показників машин різного типу збудження, а саме питомої потужності та ККД.

Основна частина. Оскільки машини з гібридним збудженням є несерійними машинами та їх дослідження почалось декілька десятирічч тому, на даний момент часу не існує єдиної методики розрахунку таких машин, як по суті і машин з магнітоелектричним збудженням. При розрахунках машин зі збудженням від постійних магнітів допускається похибка до 10%, оскільки характеристики постійних магнітів залежать від багатьох факторів. Тому розрахунок машин з гібридним збудженням проводився на основі відомих [11-13] та авторських методик розрахунку з залученням польового аналізу.

Порівняння проводилось між серійними генераторами типу ЕСС5, магнітоелектричним генераторами серії БГ та розрахованими синхронними генераторами з гібридним збудженням. Питомі показники машин з магнітоелектричним та електромагнітним збудженням приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні показники машин з електромагнітним (ЕСС5) та магнітоелектричним (БГ) збудженням

	Р, кВт	Маса, кг	Рпит, Вт/кг	n, об/хв	ККД, %
ЕСС5-61-4У2	8	160	50	1500	84,7
ЕСС5-62-4У2	12	189	63,49	1500	85
ЕСС5-81-4У2	20	300	66,66	1000	86
ЕСС5-82-4У2	30	340	88,23	1500	88,2
ЕСС5-91-4У2	50	490	102,04	1500	89,3
ЕСС5-92-4У2	60	495	121,21	1000	89,6
ЕСС5-93-4У2	75	544	137,86	1500	90,5
БГ-10М-4	10	179	55,86	1500	83
БГ-16М-4	16	185	86,48	1500	85
БГ-30М-4	30	250	120	1500	88,5
БГ-75М-4	75	465	161,29	1500	90,5

Побудована математична польова модель є тривимірною, оскільки двовимірна модель не дозволяє враховувати аксіальний магнітний потік, крайові ефекти та ін. Детально конструкція та принцип дії машини з гібридним збудженням описана в роботі [14-15]. В загальному випадку в машині суміщено магнітоелектричне та електромагнітне збудження. Обмотка збудження виконується концентричною та розміщується співвісно зі статором і ротором. Для проведення потоку збудження необхідне магнітне коло, яке утворюється за допомогою магнітом`яких осердь, які чергуються по колу з постійними магнітами однієї полярності відносно феромагнітного диску ротора. Таким чином, постійні магніти створюють магнітний потік однієї полярності, а обмотка збудження – протилежної полярності.

Тривимірний ескіз досліджуваного синхронного генератора з гібридним збудженням зображено на рисунку 1, на якому позначено: 1 – статор, 2 – обмотка статора, 3 – постійні магніти, 4 – осердя, 5 – індуктор ротора, 6 – маточина, 7 – обмотка збудження.

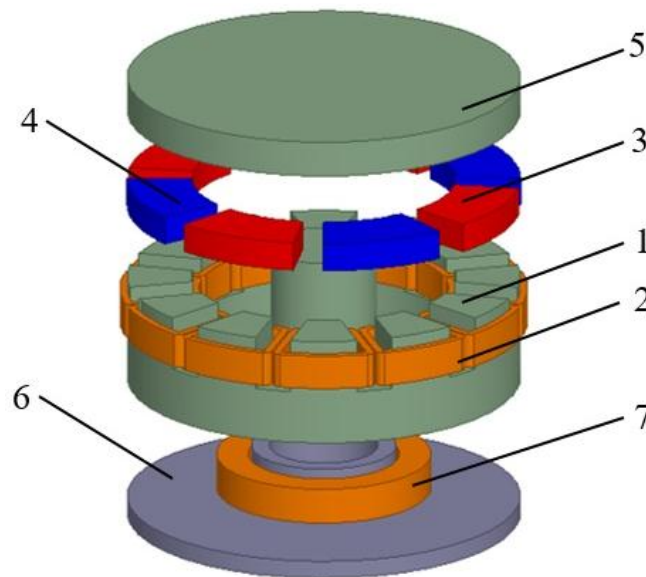


Рис. 1. Тривимірний ескіз досліджуваного генератора

Система рівнянь тривимірного електромагнітного поля, відносно комплексної амплітуди векторного магнітного потенціалу $\vec{A} = \vec{e}_x \cdot A_x + \vec{e}_y \cdot A_y + \vec{e}_z \cdot A_z$ і скалярного електричного потенціалу φ записується в наступному вигляді:

$$\Delta \times \left(\frac{1}{\mu} \Delta \times \vec{A} \right) + j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \Delta \varphi = \vec{J}_c, \Delta \cdot \left(j\omega\sigma \vec{A} + \sigma \Delta \varphi - \vec{J}_c \right) = 0 \quad (1)$$

де μ , σ – магнітна проникність і електропровідність, ω – кутова частота, $\vec{J}_c = \vec{e}_x \cdot J_{cx} + \vec{e}_y \cdot J_{cy} + \vec{e}_z \cdot J_{cz}$ – вектор густини сторонніх струмів, який задається в обмотці збудження і має три просторові складові. Складові вектору магнітної індукції визначаються через вектор магнітного потенціалу

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \quad (2)$$

Тоді, модуль вектор магнітної індукції розраховується за виразом

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3)$$

На рисунку 2 зображена залежність питомої потужності (Вт/кг) для машин різної потужності та типу збудження.

Аналізуючи залежність приведену на рис. 2 видно, що застосування машин з гібридним збудженням доцільно лише до деякої межі, а саме по попереднім розрахункам – до 45 кВт. Даний клас машин забезпечує регулювання магнітного потоку в межах до 40%.

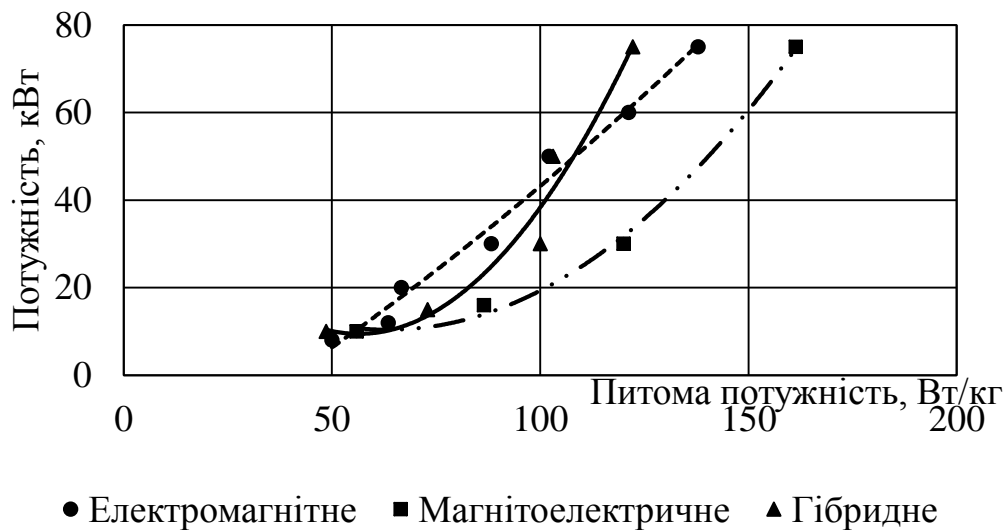


Рис. 2. Залежність питомої потужності від потужності машини в залежності від типу збудження

Для оцінки ефективності машини було розраховано значення ККД машини з гібридним збудженням. При цьому слід зазначити, що коефіцієнт корисної дії залежить від режиму роботи, навантаження, величини струму збудження. В загальному випадку ККД визначається за наступною формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} \quad (4)$$

де $\sum p$ - сумарні втрати

P_2 - корисна потужність генератора.

Сумарні втрати визначаються як

$$\sum p = p_{\text{оя}} + p_{\text{оз}} + p_{\text{магн}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{дод}} \quad (5)$$

Електричні втрати в обмотках якоря та збудження визначаються за класичними формулами

$$p_{\text{оя}} = 3 \cdot I_a^2 \cdot r_a \quad (6)$$

$$p_{\text{оз}} = I_f^2 \cdot r_f \quad (7)$$

де I_a та I_f - струм обмотки якоря та збудження відповідно

r_a та r_f - опори обмотки якоря та збудження відповідно

Механічні втрати залежать від діаметру та частоти обертання ротора. Оскільки прийнято, що частота обертання ротора не залежить від навантаження, то механічні втрати залишаються постійними і розраховуються за формулою

$$p_{\text{мех}} = 6 \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (0.01 \cdot D_{\text{зовн}})^3 \quad (8)$$

Додаткові втрати приймаються рівними 5% від вихідної потужності генератора при нульовому значенні МРС ОЗ

$$p_{\text{дод}} = 0,05 \cdot P_2 \quad (9)$$

В загальному випадку втрати в магнітоелектричних машинах можливо розраховувати за формулою

$$p_{\text{магн}} = k_d \cdot p_{\text{пит}} \cdot B_i^2 \cdot m_i \quad (10)$$

де k_d - коефіцієнт, який враховує збільшення втрат;

$p_{\text{пит}}$ - питомі втрати для обраної сталі;

B_i - індукція в i -му елементі;

m_i - маса i -го елемента.

Розрахунок магнітних втрат проведено з врахуванням отриманих значень індукції в результаті аналізу польової моделі. Залежність ККД від потужності машини представлено на рис. 3.

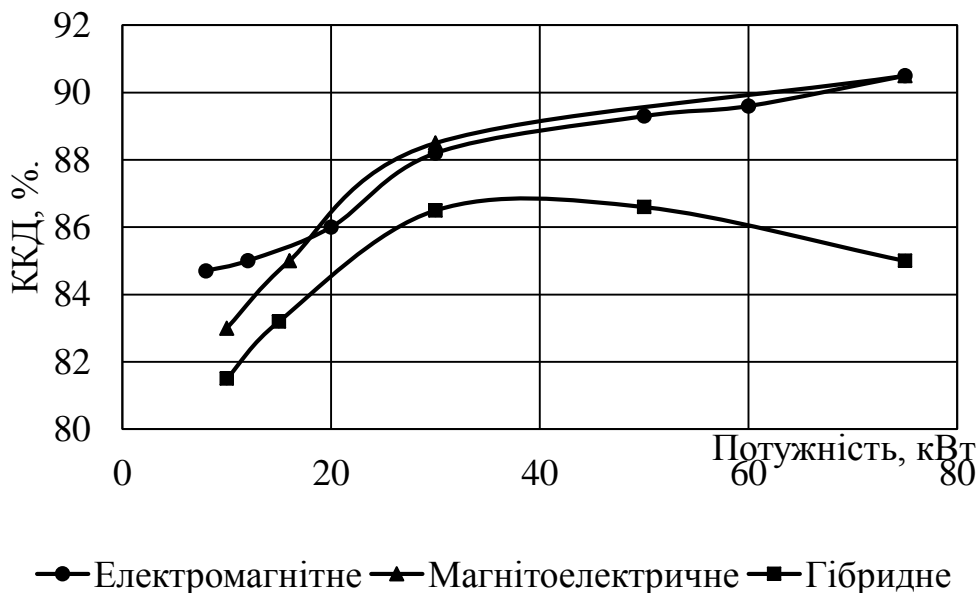


Рис. 3. Залежність ККД від потужності машини при різних типах збудження

З графіку залежності ККД від потужності машини видно, що граничне значення потужності машини з максимальним ККД становить до 40 кВт. При подальшому збільшенні потужності ККД машини з гібридним збудженням зменшується через збільшення магнітних та електричних втрат, оскільки зі збільшенням потужності зростає довжина активної зони, магнітом'яких осердь та МРС обмотки збудження.

Висновки.

В роботі показано порівняння синхронних машин з різними типами збудження та різною магнітною системою. Показано до якого



значення потужності машина з гібридним збудженням є ефективною і доцільною до використання в порівнянні з машиною з магнітоелектричним чи електромагнітним збудженням.

Список використаних джерел

1. Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 279 с.
2. Бертинов А. И. Авиационные электрические генераторы. Москва: Государственное издательство оборонной промышленности, 1959. 594 с.
3. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины. Москва: Высшая школа, 1990. 416 с.
4. Brown N. L., Haydock L. New Brushless Synchronous Alternator. *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*. 2003. Vol. 150. P. 629-635.
5. Delhasse F., Biais F. High power starter generators for airliners. Changes in Aeronautical and space systems. *Challenges for on-board energy*. (June 26-28, 2006, Avignon, France). P. 1-3.
6. Design and test of an axial flux permanent-magnet machine with field control capability / A. D. Gonzalez-Lopez [et al.]. *IEEE Transactions on magnetics*. 2008. Vol. 44. № 9. P. 2168-2173. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2000543.
7. Hybrid excitation synchronous generators for island operation / K. Kamiev [et al.]. *IET Power application*. 2012. Vol. 6. № 1. P. 1 – 11. DOI:10.1049/iet-epa.2010.0226.
8. Mohd M. S., Aziz A. R., Mohd M. S. Investigation of mechanical field weakening of axial flux permanent magnet motor. *3rd International conference of Mechanical engineering research (ICMER 2015)*. (Kuantan, Malaysia, 18-19 August 2015). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 100, № 1. P. 1 – 9. DOI:10.1088/1757-899X/100/1/012026.
9. Hoang E., Lécrivain M., Gabsi M. A new structure of a switching flux synchronous polyphase machine with hybrid excitation. *European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007*, 2007. p. 1–8.
10. Basic principles of hybrid excitation synchronous machine / T. Mizuno [et al.]. *Electrical engineering in Japan*. 1996. Vol. 117. №. 5. P. 110 - 123
11. Кудря С. А., Перминов Ю. Н., Буденный В. Ф. О методах расчета магнитных систем с постоянными магнитами. *Відновлювана енергетика*. 2009. № 4. С. 40-43.



12. Кудря С. А., Перминов Ю. Н., Буденный В. Ф. Особенности проектирования синхронного ветрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов. *Відновлювана енергетика*. 2010. № 1. С. 51-53.

14. Чумак В. В., Монахов Е. А. Управление магнитоэлектрическим генератором с аксиальным потоком. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 2. С. 55–57.

15. Ostroverkhov M., Chumack V., Monakhov E. Axial Flux Permanent Magnet Controlled Generator. *2018 IEEE 3rd Conference Proceedings on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 10-14 вересня 2018 р.). Харків, 2018. С. 353-357.

СРАВНЕНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН ГИБРИДНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С МАШИНАМИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Чумак В. В., Монахов Е. А., Стулишенко А. С.

Аннотация – синхронные машины с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением получили широкое применение в качестве двигателей и генераторов в различных сферах эксплуатации в зависимости от поставленных задач. Машинам с электромагнитным возбуждением свойственны широкие регулировочные свойства в то время, как машины с возбуждением от постоянных магнитов имеют высокие удельные показатели и надежность, однако у них отсутствует возможность регулировать основной магнитный поток. Анализ существующих методов регулирования магнитного потока, которые рассмотрены в отечественных научных источниках показал неэффективность данных методов. Анализ иностранных научных источников показал широкий интерес к машинам с гибридным возбуждением, которые являются промежуточным звеном между классом машин магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением. По существу, машины с гибридным возбуждением объединяют два типа возбуждения одновременно: возбуждение от постоянных магнитов и обмотки возбуждения.

В данной статье представлено сравнение машин разного типа возбуждения, а именно: проведено анализ существующих серийных машин диапазона мощностей с электромагнитным, магнитоэлектрическим и гибридным возбуждением по критериям удельной мощности и коэффициента полезного действия. Расчет машин с гибридным возбуждением был проведен на основе существующих известных методик расчета машин с возбуждением от постоянных магнитов и численных методов решения электромагнитных уравнений поля. Благодаря полевому анализу было рассчитано ряд машин с гибридным возбуждением мощность до 75 кВт и проведено их сравнение с известными серийными машинами. Установлено целесообразное использование машин с гибридным возбуждением при обеспечении регулирования магнитного потока в пределах до 40% в сравнении с машинами других типов возбуждения.

Ключевые слова: синхронные машины, электромагнитное возбуждение, магнитоэлектрическое возбуждение, гибридное возбуждение, удельная мощность, КПД.



COMPARISON OF SYNCHRONOUS HYBRID EXCITED MACHINES WITH MACHINES OF PERMANENT MAGNET AND ELECTROMAGNETIC EXCITATION

V. Chumak, E. Monakhov, A. Stulishenko

Summary

Synchronous machines with permanent magnet and electromagnetic excitation are widely used as motors and generators in various fields of operation, depending on the tasks. Machines with electromagnetic excitation are characterized by wide adjustment properties, while machines with permanent magnet excitation have high power-to-weight ratio, efficiency, reliability, but there is no possibility to regulate the main magnetic flux in airgap. Analysis of existing methods of control the magnetic flux, which are reviewed in national scientific sources, showed the ineffectiveness of these methods. The analysis of foreign scientific papers showed a wide interest to the machines with hybrid excitation, which are an intermediate link between the class of permanent magnet machines and machines with field excitation winding. In essence, hybrid excitation machines combine two types of excitation at the same time: excitation from permanent magnets and excitation windings.

This article presents a comparison of machines of different types of excitation, namely: an analysis of the existing serial machines of the different power range with electromagnetic, permanent magnet and hybrid excitation according to the criteria of power-to weight ratio and efficiency is carried out. The calculation of machines with hybrid excitation was carried out on the basis of well-known methods for calculating machines with permanent magnet excitation and numerical methods for solving electromagnetic field equations. Thanks to the field analysis, a number of machines with hybrid excitation power up to 75 kW was calculated and compared with known serial machines. It has been found the expedient usage of machines with hybrid excitation while ensuring regulation of the magnetic flux up to 40% in comparison with machines of other types of excitation.

Keywords: synchronous machines, electromagnetic excitation, permanent magnet excitation, hybrid excitation, power density, power-to-weight ratio, efficiency.