

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛТЕРНАТОР С ПОСТОЯННИ МАГНИТИ

Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров

***Резюме:** Целта на работата е създаването на автомобилен алтернатор с редкоземни магнити, който е изследван експериментално и е характеризирани. На базата на определените от изследването параметри е разработен устойчив математически модел на алтернатора чрез уравненията на обобщената теория на електрическите машини. Изготвеният модел ще бъде използван в бъдещи изследвания на работата на автомобилни алтернатори в малки ветроенергийни преобразователни системи. Сравнени са получените експериментални данни с резултатите от симулациите, проведени в средата Matlab/Simulink.*

***Ключови думи:** ветроенергийни преобразователни системи, ВЕПС, автомобилни алтернатори, постоянни магнити, синхронен генератор с постоянни магнити*

EXPERIMENTAL STUDY OF ALTERNATOR WITH PERMANENT MAGNETS

Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov

***Abstract:** The purpose of the work is to create an automobile alternator with rare earth permanent magnets. An experimental study is carried out for the characterization of the machine. On the base of the experimental results is developed a stable mathematical model of the alternator with the generalized theory of the electrical machines. The model will be used in future study of small wind energy conversion systems (WECS) using permanent magnet alternators. The obtained experimental results are compared with the simulations of the machine in Matlab/Simulink.*

***Keywords:** wind energy conversion systems, WECS, automobile alternators, permanent magnets, PMSG*

1. Въведение

В съвременните ветроенергийни преобразователни системи се забелязва увеличаващ се дял на вятърни турбини, използващи синхронни генератори с постоянни магнити. Този вид генератори се използват както в големи така и в малки ВЕПС, работещи с променлива скорост на въртене [1], [2]. Автомобилният алтернатор е малък (от 0.5 kW до 5kW) и сравнително евтин синхронен генератор с нокътовиден ротор и възбудителна намотка. Поради необходимостта от изразходване на част от произведената енергия за възбуждане на алтернатора, за

работата му в малка ВЕПС е целесъобразно възбудителната намотка да бъде заменена с постоянни магнити. Такива опити са правени от авторите в [3] и [4], както и [5]. Все по-намаляващата цена и подобряващите се качества на редкоземните магнити ги прави подходящи за целта [6].

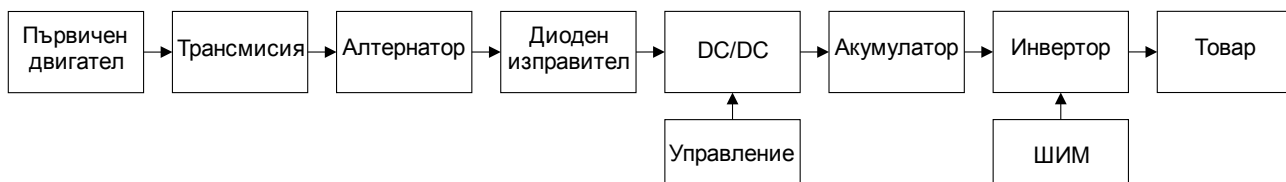
2. Цел на изследването

Целта на настоящото изследване е създаване на автомобилен алтернатор с пръстеновиден постоянен магнит от редкоземни материали (Nd, Fe, В) на базата на генератор Г221, произведен от „Динамо – Сливен“ (фиг. 1). Замяната на възбудителната намотка на алтернатора води до намаляване на загубите в машината, поради премахване на четковия апарат и премахване на нуждата от възбуждане, което може да достигне загуби, равни на 10% от полезната мощност на машината. Освен това, премахването на четковия апарат намалява нуждата от поддръжка на алтернатора, удължавайки живота, намалявайки необходимите разходи и увеличавайки производителността на ветроенергийната преобразователна система, като в същото време позволява работата на системата с променливи скорости на въртене. [7], [8].



Фиг.1 Модифициран ротор на алтернатора.

Най-общо една ВЕПС с алтернатор с постоянни магнити може да бъде представена с блоковата схема от фиг. 2. DC/DC преобразувателят може да бъде повишаващ или неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател, които са сред най-често срещаните топологии [9], [10].



Фиг.2 ВЕПС с алтернатор с постоянни магнити.

Поради замяната на възбудителната намотка на алтернатора с постоянни магнити се губи възможността за регулиране на изходното напрежение чрез възбудителния ток. Това налага използването на силови електронни преобразуватели, които да регулират напрежението на изхода на машината по

такъв начин, че то да е подходящо за зареждане на акумулатор или за използване от потребителите. Наличието на силови електронни преобразуватели дава възможност за работа на ВЕПС в широк диапазон на скорости на вятъра, което спомага за увеличаване на производителността [9], [10].

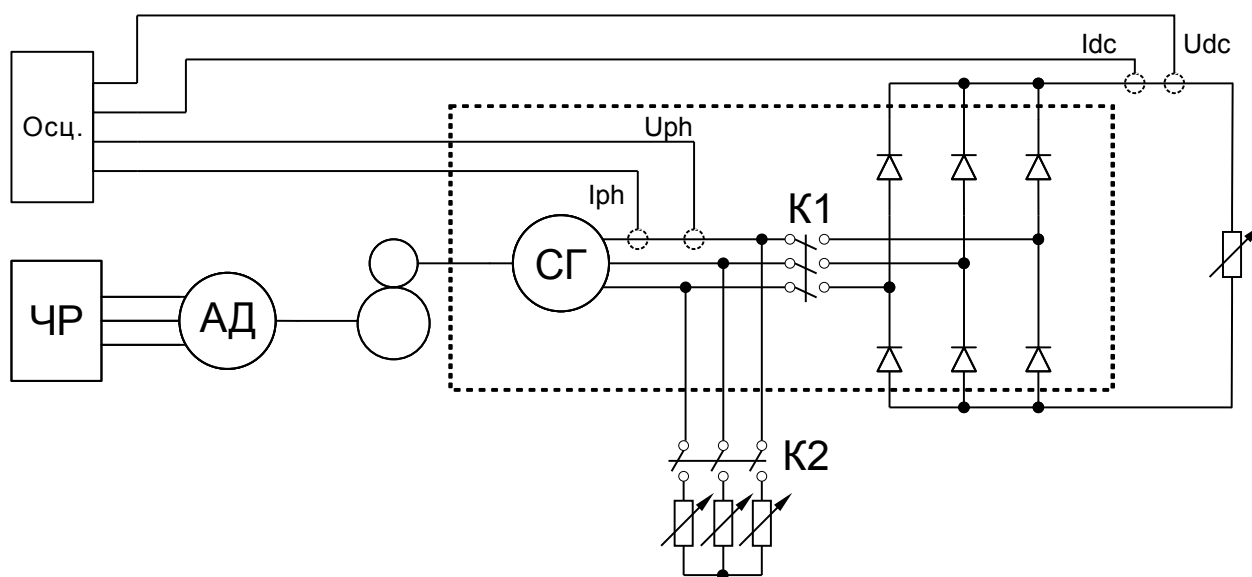
3. Опитна постановка

За целта на изследването в Лабораторията по Възобновяеми източници на енергия“ към катедра „Електрически машини“ в ТУ-София е изработен лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатор Г221 – фиг. 3.



Фиг.3 Опитна постановка за изследване на алтернатори.

Принципна схема на стенда е показана на фиг. 4. Алтернаторът се задвижва от асинхронен двигател (АД) с номинална мощност 3,3kW, посредством ремъчна предавка с предавателно число 2,29. По този начин чрез честотно регулиране (ЧР) на скоростта на асинхронния двигател се осигурява широк диапазон от скорости на въртене на изследвания алтернатор, достигащи до 5300 min^{-1} . Токовете и напреженията се регистрират с цифров осцилоскоп (Осц.). При включен прекъсвач К1 и изключен К2 алтернаторът работи в режим на променливотоков генератор, което позволява експерименталното снемане на някои важни за синхронната машина параметри. При включен К2 и изключен К1 алтернаторът работи съвместно с неуправляем диоден токоизправител, позволяващ запасяване на произведената енергия и регулирането на напрежението посредством постояннотокови преобразуватели.



Фиг.4 Принципна схема на стенда за изследване на алтернатори.

3.1 Експериментални резултати и характеристики

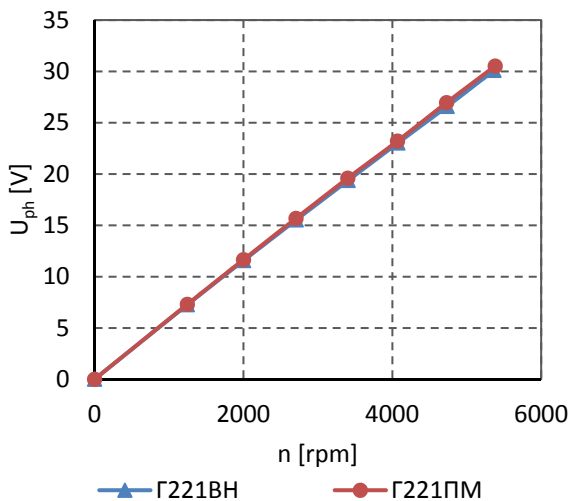
Изпитванията на модифицирания алтернатор с постоянен магнит са проведени съгласно стандарта за изпитване на синхронни машини IEC-60034-4 [11], както и [12], [13], [14].

За да бъдат определени важни за синхронния генератор параметри, които ще бъдат използвани при математическото моделиране на машината, е необходимо измерванията да бъдат направени без диодния токоизправител.

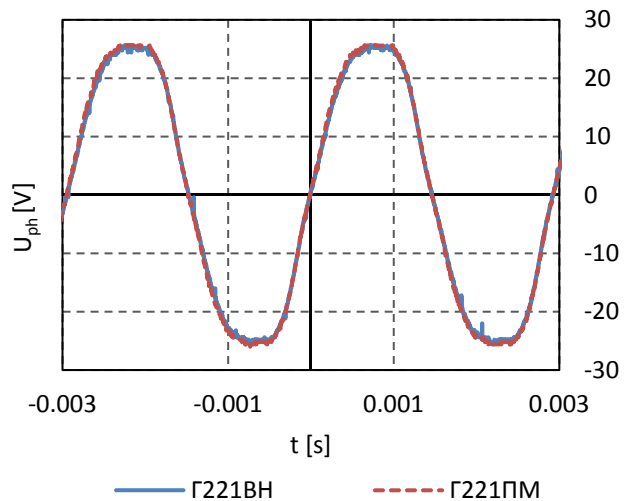
Поради невъзможността за снемане на характеристика на празен ход, дължаща се на постоянния поток от магнита, опитно е снета характеристиката на фазовото напрежение във функция от скоростта на въртене – $U_{ph}=f(n)$, която е сравнена със същата характеристика на алтернатора с електромагнитно възбуждане (фиг.5). Вижда се доброто съвпадение в характеристиките на напреженията на двете изследвани машини. Трябва да се отбележи, че възбудителният ток на алтернатора с електромагнитно възбуждане в случая е 4А, което е с 0,7А повече от номиналния възбудителен ток на машината.

На фиг. 6 е показано сравнение на фазовите напрежения на двете машини при една и съща скорост на въртене. Може да се забележи доброто съвпадение в синусоидите на напреженията на двете машини.

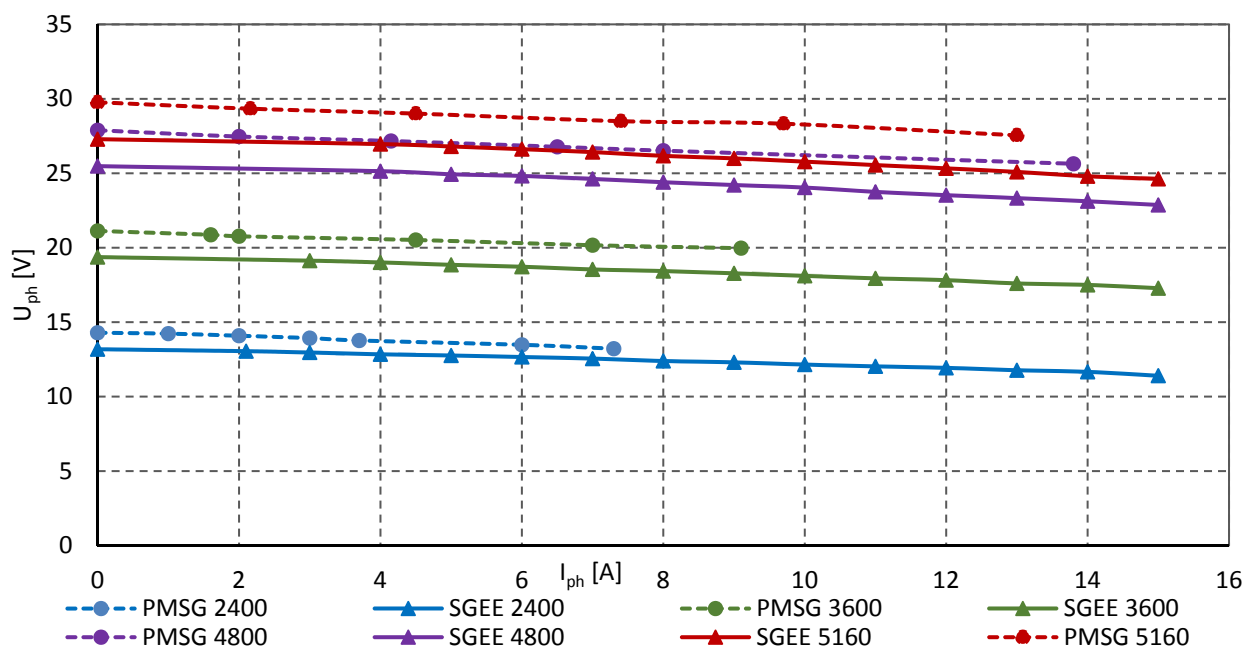
Също така са снети външни характеристики на модифицирания алтернатор при различни скорости на въртене, като е сравнено поведението на алтернатора с възбудителна намотка и на алтернатора с постоянни магнити (фиг. 7). Забелязва се, че при по-високи скорости на въртене алтернаторът с постоянни магнити може да има по-високи напрежения за даден товарен ток в сравнение с алтернатора с възбудителна намотка. Това се дължи на по-големия магнитен поток, създаден от избрания редкоземен магнит.



Фиг.5 Сравнение на характеристиките на фазовото напрежение във функция от скоростта $U=f(n)$ за алтернатора с възбудителна намотка при $I_f=4A$ и за модифицирания алтернатор с постоянен магнит.



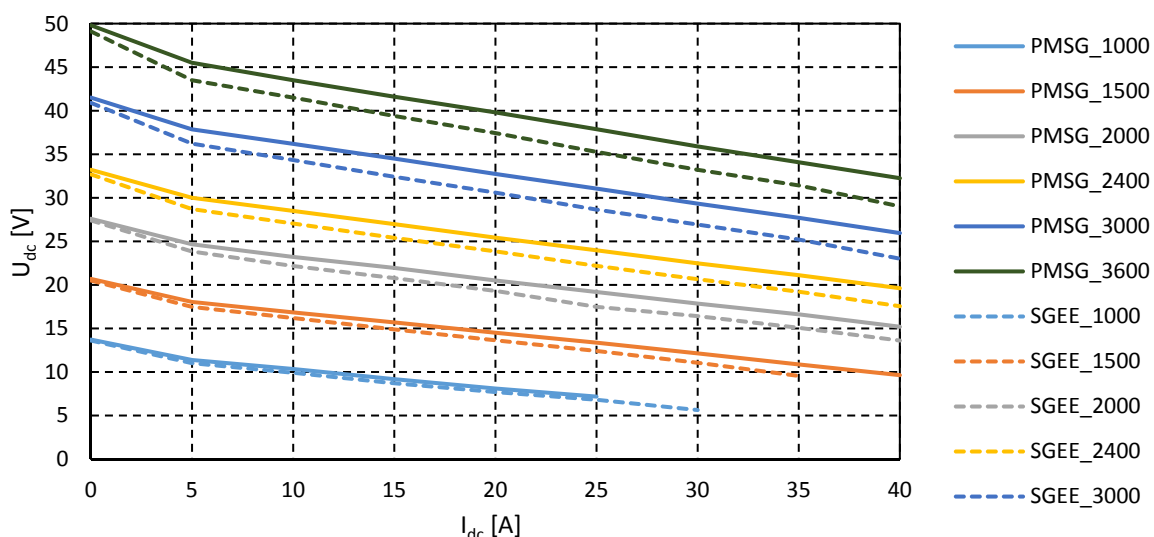
Фиг.6 Сравнение на осцилограми на фазовите напрежения на двата алтернатора при еднакви скорости на въртене.



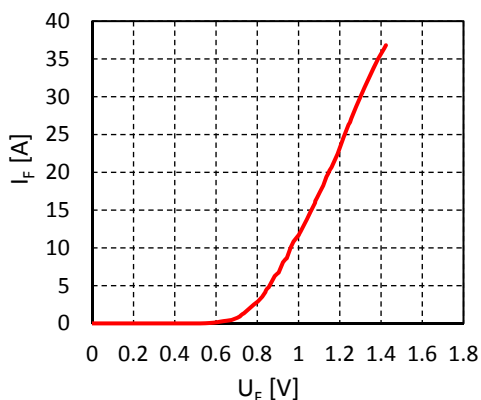
Фиг.7 Сравнение на външните характеристики на двата алтернатора при различни скорости на въртене.

3.3 Съвместна работа на алтернатора с диоден токоизправител

След получаването на основните параметри на алтернатора с постоянен магнит е изследвано и поведението на машината с включен диоден токоизправител. Външните характеристики на алтернатора с възбудителна намотка и на модифицирания алтернатор с постоянен магнит са сравнени на фиг.8. Също както при работата на алтернаторите без диоден токоизправител и тук може да се види по-голямата производителност на алтернатора с постоянен магнит, която се увеличава с увеличаване на скоростта на въртене.



Фиг.8 Сравнение на външните характеристики на двата алтернатора при съвместна работа с неуправляем диоден токоизправител и различни скорости на въртене.



Фиг.9 ВАХ на диодите в токоизправителя.

Леката нелинейност в началото на външните характеристики (от $I_{dc}=0A$ до $I_{dc}=5A$) се дължи на пада на напрежение в диодите на токоизправителя, който е определен експериментално – фиг. 9.

От външните характеристики на фиг.8 се вижда, че при постоянното възбуждане, осигурено от редкоземните магнити и различни скорости на въртене, постоянното напрежение, което се получава от неуправляемия диоден токоизправител варира в много широки граници. Това дава предпоставка за използване на различни

управляеми силови електронни преобразуватели, които да дадат възможност за регулиране на изходното напрежение на алтернатора. Някои от най-подходящите топологии, срещани в литературата са повишаващ преобразувател и неинвертиращ понижаващо-повишаващ преобразувател [9], [10], [14], [15].

4. Уравнения от обобщената теория на електрическите машини

На основата на получените резултати е разработен математически модел на алтернатор посредством уравненията от обобщената теория на електрическите машини [16]. В синхронните машини с постоянни магнити липсва възбудителна намотка, а често липсват и успокоителни намотки, което свежда добре познатата система от уравнения на статорните напрежения до:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_d}{dt} = U_d + \omega_r \Psi_q - R_s \frac{\Psi_d - L_{pm} i_{pm}}{L_d} \\ \frac{d\Psi_q}{dt} = U_q + \omega_r \Psi_d - R_s \frac{\Psi_q}{L_q} \end{cases} \quad (1)$$

където U_d и U_q са статорните напрежения по надлъжната ос d и по напречната ос q , R_s е съпротивлението на статора, а постоянният магнит е представен чрез еквивалентната индуктивност L_{pm} и еквивалентния намагнитващ ток i_{pm} , които са приведени към статора.

Токовете на синхронната машина се изразяват чрез потокосцепленията в намотките:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\Psi_d - L_{pm} i_{pm}}{L_d} \\ i_q = \frac{\Psi_q}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

Тук i_d и Ψ_d са проекциите на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста d , i_q и Ψ_q са проекциите на на пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста q , L_d и L_q са индуктивностите на статора по осите d и q .

Уравнението за електромагнитния момент на синхронната машина в координатна система, свързана с ротора е:

$$T_e = \frac{3}{2} p_p (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} p_p L_{pm} i_{pm} i_q \quad (3)$$

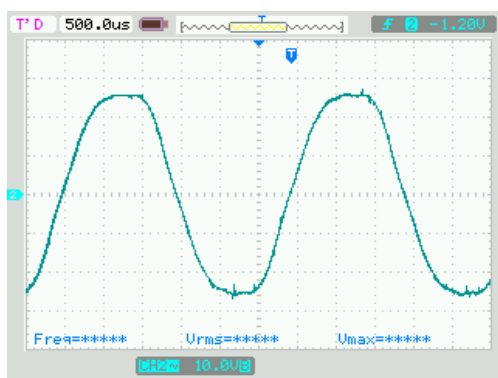
където T_e е електромагнитният момент, p_p е броят на двойките полюси.

Първият член на уравнението за движение представлява реактивният момент, създаден от разликата на индуктивностите L_d и L_q , а вторият член представлява момента, създаден от магнитното поле на постоянните магнити.

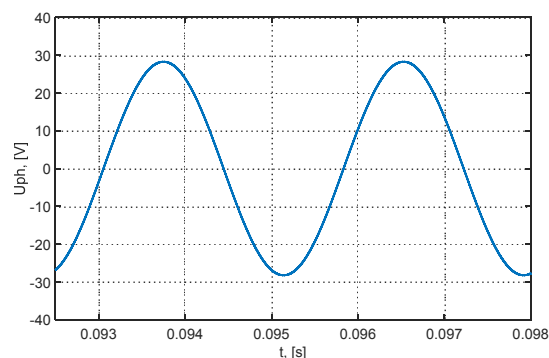
5. Сравнение симулационните и експерименталните резултати

Резултатите от проведените симулации са сравнени с експерименталните данни, като се вижда, че те съвпадат със задоволителна точност.

На фиг.10 е показана осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор с постоянни магнити, а на фиг. 11 е показан резултат от симулация в Matlab/Simulink.

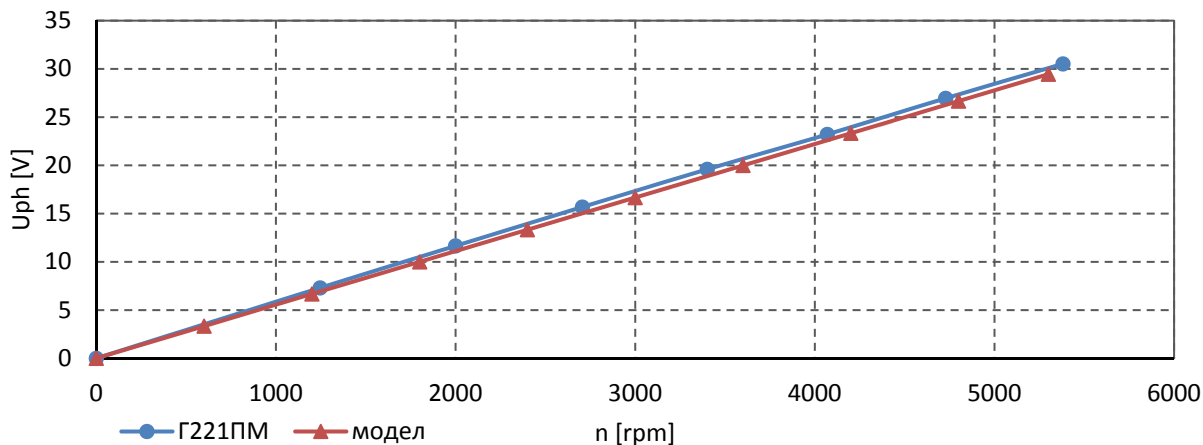


Фиг.10 Осцилограма на фазовото напрежение на алтернатора с ПМ



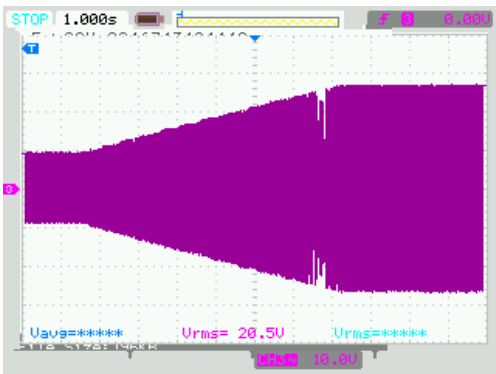
Фиг.11 Фазово напрежение на модела в Matlab/Simulink

На фиг. 12 са показани фазовите напрежения на алтернатора и на модела във функция от скоростта на въртене на машината – $U_{ph}=f(n)$. Както се вижда, характеристиките на напреженията на алтернатора с постоянни магнити и модела съвпадат със задоволителна точност.

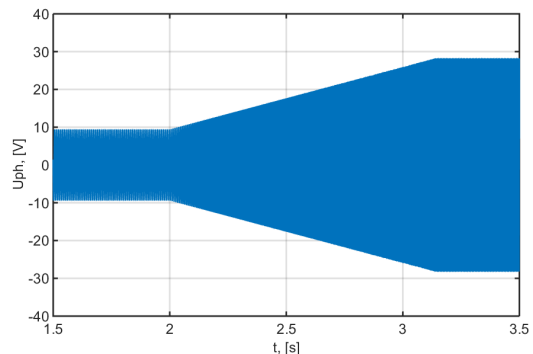


Фиг.12 Сравнение на характеристиките на напрежението на празен ход във функция от скоростта $U_{ph}=f(n)$ на алтернатора с ПМ и на модела.

На фиг. 13 и фиг. 14 е показано изменение на напрежението на машината и модела при промяна на скоростта на въртене, което показва устойчивостта на модела при промяна на скоростта, което е характерно за работата на съвременните ВЕПС.

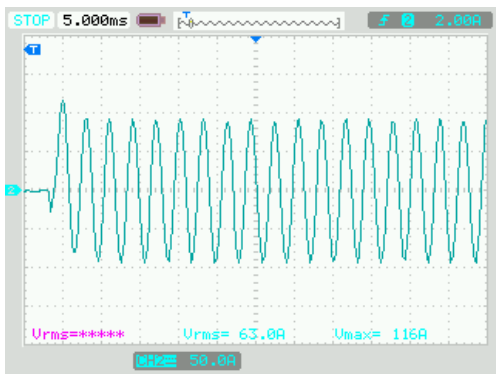


Фиг.13 Напрежение на празен ход при промяна на скоростта от 1200rpm до 3600rpm.

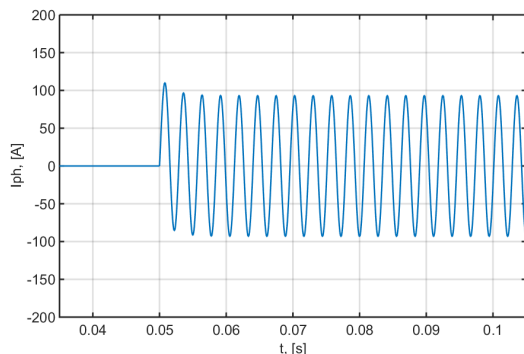


Фиг.14 Напрежение на празен ход при промяна на скоростта от 1200rpm до 3600rpm.

На фиг. 15 и фиг. 16 е сравнена осцилограма от внезапно трифазно късо съединение с реакцията на модела при идентични условия.

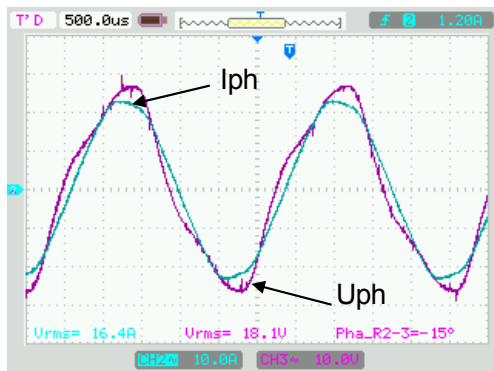


Фиг.15 Ток на внезапно късо съединение на алтернатора с ПМ.

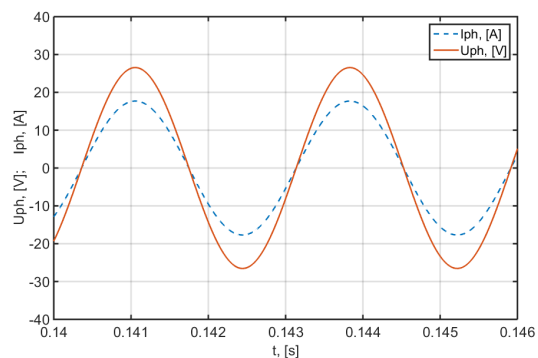


Фиг.16 Ток на внезапно късо съединение на модела.

На фиг. 17 и фиг. 18 е представено поведението на модела и алтернатора при натоварване с активен товар.



Фиг.17 Фазов ток и напрежение на алтернатора при работа с активен товар.



Фиг.18 Фазов ток и напрежение на модела при работа с активен товар.

6. Заключение

Модифициран е автомобилен алтернатор, като възбудителната му намотка е заменена с пръстеновиден постоянен магнит от редкоземни материали (Nd, Fe, В). Доказана е работоспособността на създадения алтернатор с постоянен магнит. Проведено е експериментално изследване на модифицирания алтернатор, който е характеризирани и е проучена възможността за работата му във ВЕПС с малка мощност. Сравнени са основни характеристики на алтернатора с възбудителна намотка и алтернатора с редкоземен магнит, като се забелязва голямо сходство между тях. На базата на експерименталните данни и обобщената теория на електрическите машини е разработен математически модел на алтернатор с постоянни магнити, който да бъде използван в последващи изследвания на ВЕПС с малка мощност. Очаква се замяната на възбудителната намотка да доведе до повишаване на коефициента на полезно действие на алтернатора поради премахването на загубите за възбуждане, като това ще бъде проверено в по-нататъшно изследване.

Благодарности

Изследванията в статията са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София - 2016г. по дог. № 162ПД0010-01, за научен проект в помощ на докторант.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cao W., Xie Y., Tan Z. (2012) *Chapter 7 - Wind Turbine Generator Technologies*, Advances in Wind Power, InTech, 2012.
- [2] Van Hertem D., Gomis-Bellmunt O., Liang J. (2016) *Chapter 5 - Wind Turbine Technologies*, HVDC Grids For Offshore and Supergrid of the Future, Wiley-IEEE Press, 2016.
- [3] Marinov M., Streblau M., Penev T., Aprahamian B. (2015) *Study of the Electromagnetic Characteristics of Synchronous Generator by Replacement of Excitation Winding with Permanent Magnets*, Proceedings of Fourteenth International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems - ELMA 2015, pp. 14-17, 2-3 October 2015, Varna, Bulgaria.
- [4] Jurca N. F. (2009) *Claw Pole Synchronous Generaotr for Small Electric Systems*, PhD Thesis, Technical University of Cluj-Napoca, 2009
- [5] **WindBlue Power**, http://www.windbluepower.com/category_s/1.htm
- [6] **Kitco Metals Inc.**, <http://www.kitco.com/strategic-metals/>
- [7] Tasneem Z., Sheikh M. R. I. (2015) *Comprehensive modeling and analysis of Variable Speed Wind Turbine using Permanent Magnet Synchronous Generator*, 2015 International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE), Rajshahi, 2015, pp. 133-136.
- [8] Kumar A. V. P., Parimi A. M., Rao K. U. (2015) *Investigation of small PMSG based wind turbine for variable wind speed*, Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE), 2015 International Conference on, Noida, 2015, pp. 107-112.

- [9] Sivakumar S., Jagabar Sathik M., Manoj P.S., Sundararajan G. (2016) *An assessment on performance of DC–DC converters for renewable energy applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, May 2016, pp. 1475–1485.
- [10] Du Y., Bhat A. K. S. (2016) *Power Converter Schemes for Small Scale Wind Energy Conversion Systems - Review, a Systematic Classification Based on Isolation Transformer and Generator Side Rectifier*, 2016 Second International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology (CICT), Ghaziabad, 2016, pp. 338-344.
- [11] IEC-60034-4:2008, “*Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*” .
- [12] Abdessemed R. (2011) *Modélisation et simulation des machines électriques*, Ellipses Marketing, 2011
- [13] Biró K. Á., Szabó L., Iancu V., Hedesiu H.C., Barz V. (2001) *On the Synchronous Machine Parameter Identification*, Workshop on Electrical Machines' Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, 26 May 2001.
- [14] Orlando N. A., Liserre M., Monopoli V. G., Mastromauro R. A., Dell'Aquila A. (2008) *Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system*, 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, 2008, pp. 2359-2364.
- [15] Kortabarria I., Ibarra E., Martínez de Alegría I., Andreu J., Ascarza A. (2010) *Power Converters Used in Grid Connected Small Wind Turbines: Analisis of Alternatives*, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010).
- [16] Lazarov V. *Theoretical and practical problems of the modeling of wind-power generators*, E+E, 11-12, 2012, pp.53-61

Автори: Захари Зарков, доцент, д-р в Технически университет - София, email: zzza@tu-sofia.bg; Иван Бачев, докторант в Технически университет - София, email: iv.bachev@tu-sofia.bg; Борис Демирков, докторант в Технически университет - София, email: demirkov@tu-sofia.bg; Владимир Лазаров, проф. д-р в Технически университет - София, email: vl_lazarov@tu-sofia.bg.



Варна, 12.09 - 15.09.2016 г.

ПОТВЪРЖДЕНИЕ ЗА ПРЕДСТАВЕН ДОКЛАД

С този документ Организационният комитет на „ЕФ 2016“ потвърждава, че маг. инж. Иван Бачев е представил статиите:

- "Експериментално изследване на алтернатори за приложения във ветроенергийни преобразувателни системи", с автори: З. Зарков, И. Бачев, Б. Демирков, В. Лазаров;
- "Експериментално изследване на алтернатор с постоянни магнити", с автори: З. Зарков, И. Бачев, Б. Демирков, В. Лазаров.

Двете статии са предадени за рецензиране с цел отпечатване в "Годишника на ТУ-София".

София,
7.11.2016г.

Научен секретар:

/доц. д-р Н. Матанов/