

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛТЕРНАТОРИ ЗА ПРИЛОЖЕНИЯ ВЪВ ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛНИ СИСТЕМИ

Захари Зарков, Иван Бачев, Борис Демирков, Владимир Лазаров

Резюме: *Работата представя резултатите от експериментално изследване на автомобилен алтернатор. На базата на получените от изследването характеристики и параметри е разработен устойчив математически модел на алтернатора чрез уравненията на обобщената теория на електрическите машини. Разработен е и симулационен компютърен модел в среда Matlab/Simulink. Експерименталните данни са сравнени с резултатите от симулациите и е получено добро съвпадение. Разработеният модел ще бъде използван в бъдещи изследвания на работата на автомобилни алтернатори в малки ветроенергийни преобразователни системи.*

Ключови думи: *ветроенергийни преобразователни системи, ВЕПС, автомобилни алтернатори*

EXPERIMENTAL STUDY OF ALTERNATORS FOR APPLICATIONS IN WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

Zahari Zarkov, Ivan Bachev, Boris Demirkov, Vladimir Lazarov

Abstract: *The work presents the results from an experimental study of an automobile alternator. On the base of the obtained characteristics and parameters is developed a stable mathematical model of the alternator using the equations of the generalized theory of the electrical machines. A simulation model in Matlab/Simulink environment is also developed. The comparison between the simulations results and experimental data shows good agreement. The developed model will be used in further studies of operation of automobile alternators in small wind energy conversion systems (WECS).*

Keywords: *wind energy conversion systems, WECS, automobile alternators*

1. Въведение

Общата инсталирана мощност на вятърни турбини в света през 2015 година е достигнала 433GW [1], като от тях 830MW се падат на над 1 милион инсталирани малки вятърни турбини [2]. Според стандарта IEC-61400-2 като малки ветрогенератори могат да бъдат класифицирани генератори с ометена площ на турбината до 200 m² и напрежения до 1000V AC или до 1500V DC [3]. Според [2] мощността на малките вятърни турбини е до 100kW. През последните години

средната мощност на малките ветрогенератори непрекъснато се увеличава, като за 2014 година тя е достигнала 0,87kW. Прогнозите са, че до 2020 година инсталираните малки ветрогенератори ще достигнат обща мощност 1,5GW [2].

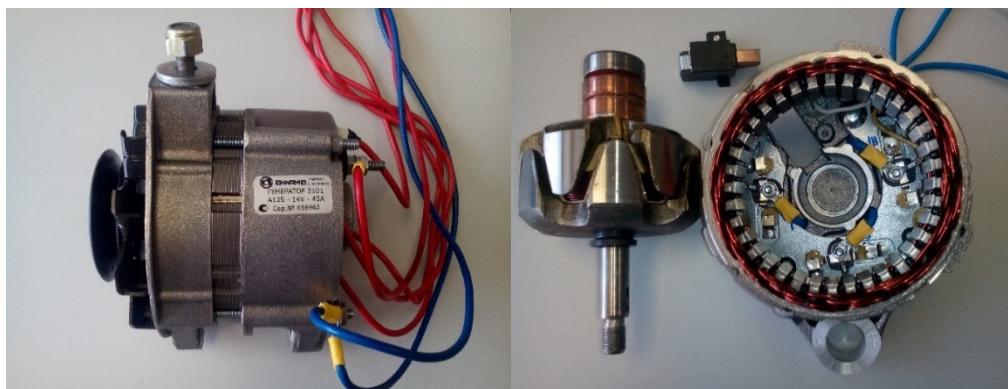
Едно добро решение в областта на ветроенергийните преобразователни системи (ВЕПС) с малка мощност, предназначени за автономна работа, е използването на автомобилен алтернатор като генератор на електрическа енергия. Автомобилният алтернатор е малък (от 0.5 kW до 5 kW) и сравнително евтин синхронен генератор с ротор с нокътовидни полюси. Технологиите на изработването на автомобилния алтернатор е добре известна, но въпреки това дава възможности за усъвършенстване, като в последните 10-15 години се забелязва сериозно увеличаване на мощностите и производителността на автомобилните алтернатори [4], [5], [6].

Подобряващите се показатели и ниската цена на автомобилните алтернатори ги прави подходящи за използване в малки ветрогенератори.

2. Цел на изследването

Целта на настоящата работа е да бъдат получени характеристиките на автомобилен алтернатор чрез експериментално изследване. След експерименталното снемане на характеристиките и параметрите на алтернатора, резултатите от изследването на машината ще бъдат използвани в математически модел, разработен в средата Matlab/Simulink. Този модел ще бъде използван впоследствие за симулиране на работата на цяла ветроенергийна преобразователна система.

След проучване на пазара е избран алтернатор тип Г221, произведен от „Динамо-Сливен“ (фиг.1). Този генератор може да работи в тежки условия – високи температури и влажност, както и при широк диапазон от скорости на въртене. Различните скорости, при които автомобилният алтернатор може да работи устойчиво, позволяват използването му във ветрогенератори, функциониращи с променлива скорост на въртене при различни скорости на вятъра, което позволява по-добро извличане на енергията на вятъра [7], [8].

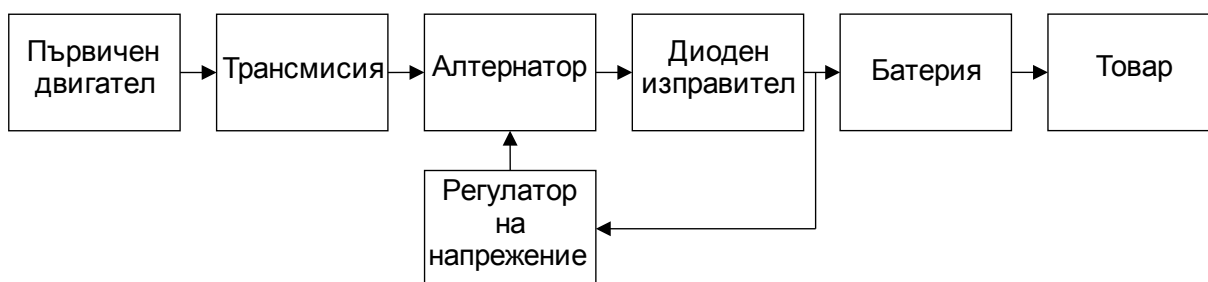


Фиг.1 Външен вид и разглобен алтернатор тип Г221.

Поради необходимостта от постоянно напрежение в автомобилите, алтернаторите са снабдени с неуправляем диоден изправител, който е интегриран в

корпуса на машината. Напрежението на изводите на токоизправителя се управлява от електронен регулатор. Съществуват множество решения за такива регулатори на напрежение, които се използват в автомобилната индустрия и осигуряват на изводите на диодния токоизправител постоянно напрежение около 14V, което е необходимо за зареждането на автомобилния акумулатор. Регулирането на напрежението посредством регулирането на възбудителния ток на алтернатора позволява нормалната работа на машината в широк обхват от скорости – от около 1000min^{-1} до над 6000min^{-1} .

Блокова схема на система за генериране на електрическа енергия с алтернатор и регулатор на напрежение е представена на фиг. 2.



Фиг.2 Блокова схема на система с алтернатор и регулатор на напрежение.

3. Експериментално изследване

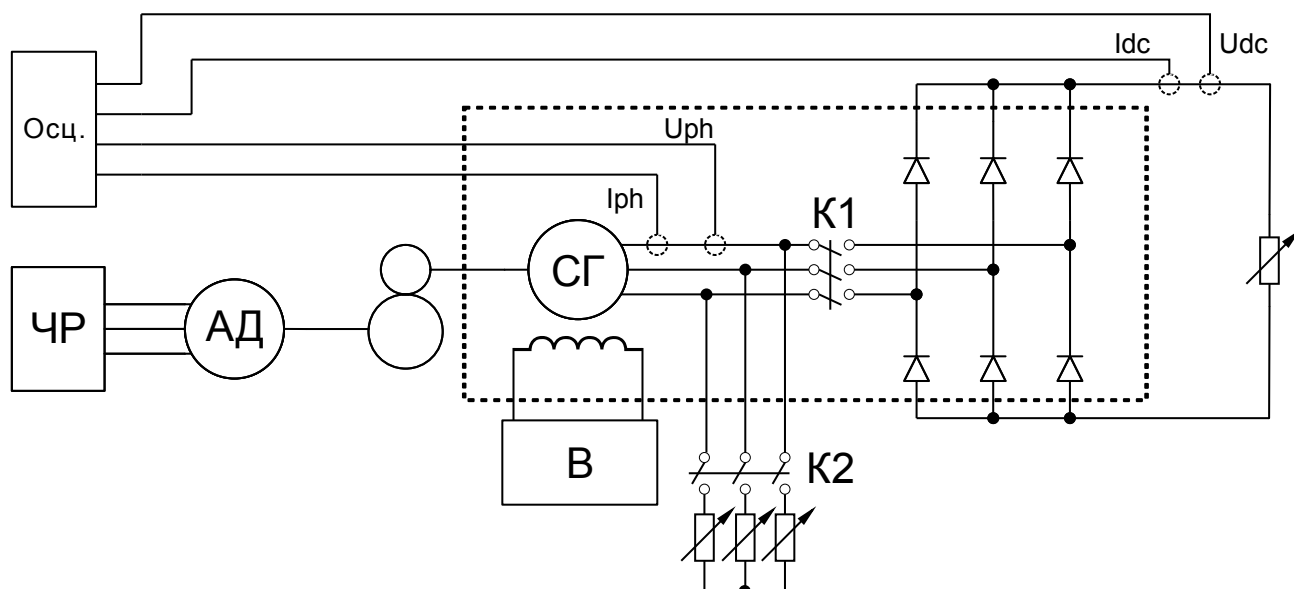
За целта на изследването в Лабораторията по Възобновяеми източници на енергия“ към катедра „Електрически машини“ в ТУ-София е разработен лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатори – фиг. 3.

Принципна схема на стенда е показана на фиг. 4. Алтернаторът се задвижва от асинхронен двигател (АД) посредством ремъчна предавка с предавателно число 2,29. Чрез честотно регулиране (ЧР) на скоростта на асинхронния двигател се осигурява широк обхват от скорости на въртене на изследвания алтернатор. Възбудителната намотка на алтернатора е захранена от независим управляем токоиз-



Фиг.3 Лабораторен стенд за експериментално изследване на алтернатори.

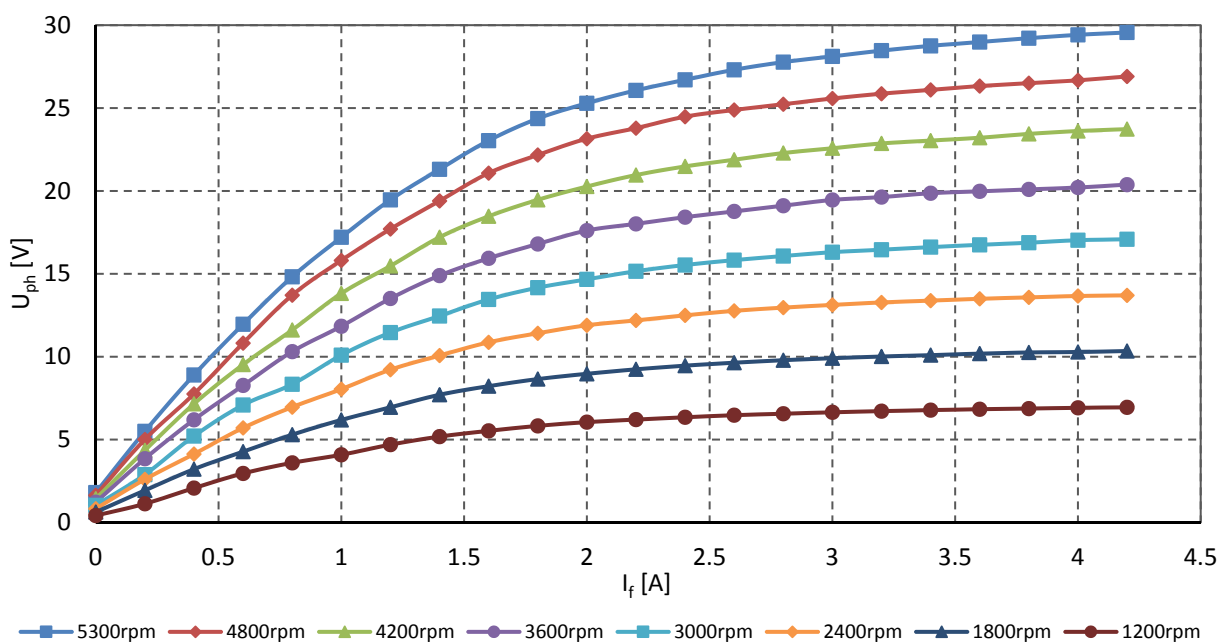
правител (В), което дава повече свобода при експерименталното изследване на машината. Токовете и напреженията се измерват с подходящи сонди и се регистрират с цифров осцилоскоп (Осц.). Преминаването между режимите на работа на изследвания алтернатор се извършва чрез превключване на контакторите K1 и K2. При включен K1 алтернаторът работи като променливотоков генератор, а при включен K2 се изследва работата на алтернатора съвместно с неуправляем диоден изправител.



Фиг.4 Схема на стенда за експериментално изследване на алтернатори.

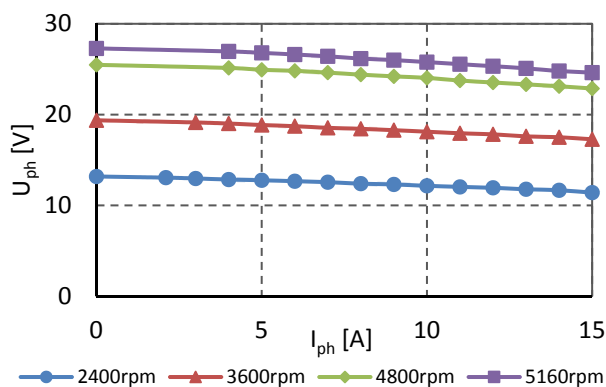
3.1 Изследване на алтернатора като променливотоков генератор

Изпитванията на алтернатора са проведени съгласно стандарта за изпитване на синхронни машини IEC-60034-4 [9]. Опитно са снети различни характеристики на машината, като някои от тях са представени по-долу. Характеристиките на празен ход за различни скорости на въртене са показани на фиг.5.

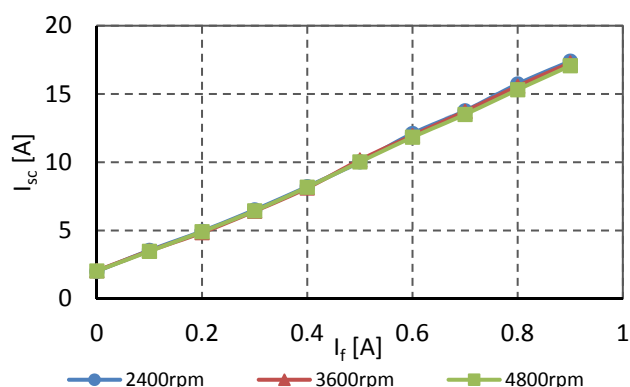


Фиг.5 Характеристики на празен ход при различни скорости на въртене.

Също така са снети външни характеристики на алтернатора за различни скорости на въртене при номинален възбудителен ток $I_f = I_{f_{nom}} = 3,3\text{A}$ (фиг.6) и характеристики на късо съединение при различни скорости на въртене (фиг.7).



Фиг.6 Външни характеристики на алтернатора за различни скорости на въртене и $I_f = I_{f_nom} = 3,3A$.



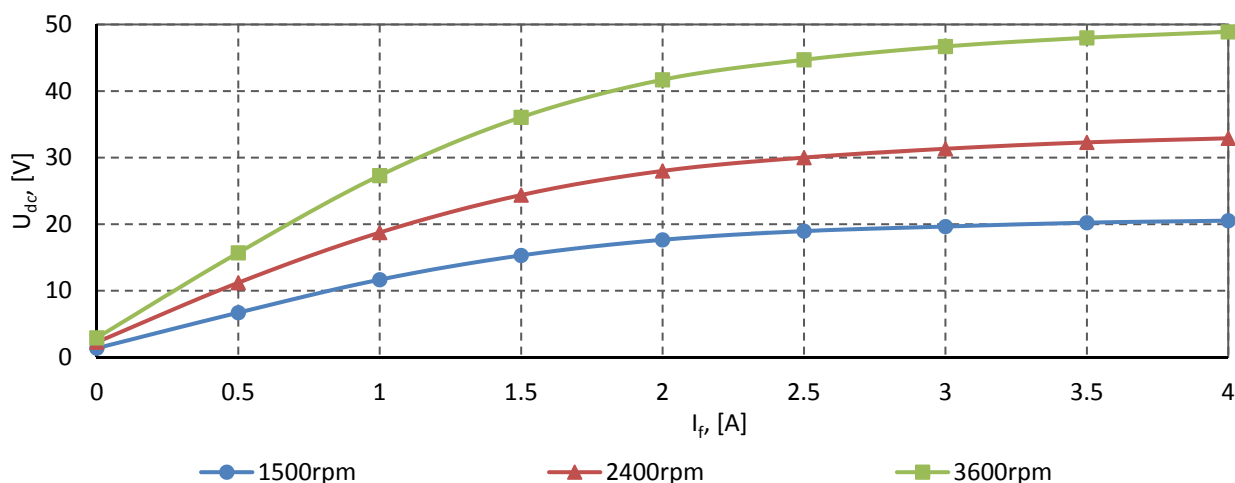
Фиг.7 Характеристики на късо съединение на алтернатора за различни скорости на въртене.

Индуктивностите на алтернатора са определени опитно чрез класически методи като: триъгълник на Потие, тест в режим на малко хлъзгане на ротора и графично - чрез характеристиките на празен ход и късо съединение. След като са определени наситените и ненаситените стойности на синхронната индуктивност по надлъжната ос L_d , е прието, че тя е еднаква с тази по напречната ос или $L_q = L_d = 150\mu H$. Това приемане е основано на информация от литературни източници, където е показано, че въпреки явнополюсната природа на ротора на алтернатора, той може да бъде разглеждан като неявнополюсна синхронна машина [10], [11].

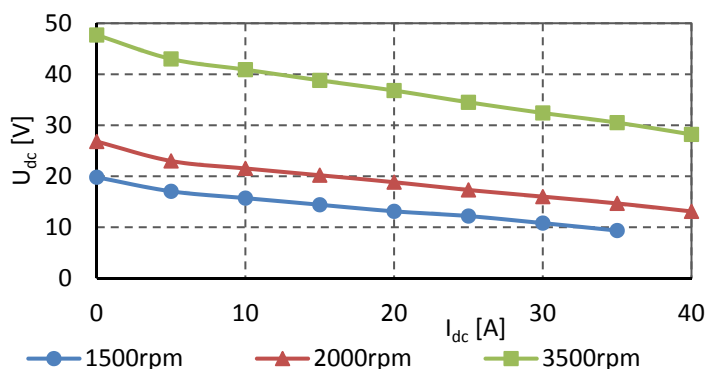
По-точното определяне на тези индуктивности ще представлява обект на по-нататъшно изследване.

3.2 Изследване на алтернатора съвместно с диоден токоизправител

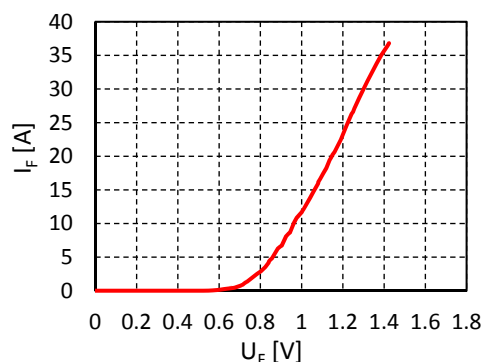
След получаването на основните параметри на алтернатора е изследвано и поведението на машината при съвместна работа с неуправляем диоден изправител. Експериментално са снети основни характеристики на алтернатора, като някои от тях са представени по-долу. На фиг.8 са показани характеристиките на празен ход, а на фиг. 9 - външни характеристики за различни скорости на въртене.



Фиг.8 Характеристики на празен ход на Г221 с диоден изправител при различни скорости на въртене и възбудителен ток $I_f = 3.3A$.



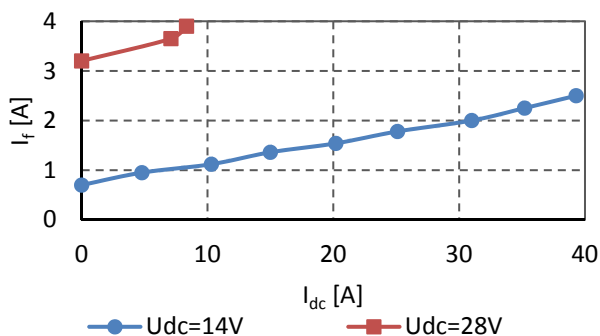
Фиг.9 Външни характеристики на алтернатора с диоден токоизправител при различни скорости на въртене, $I_f=3.3A$.



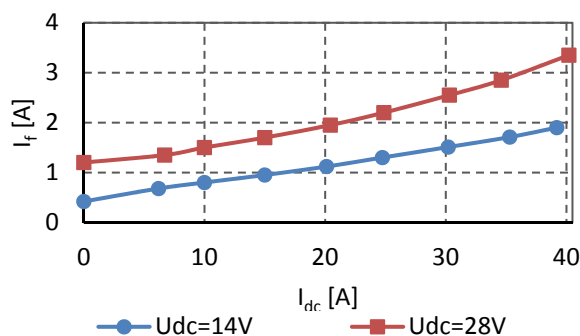
Фиг.10 ВАХ на диодите в токоизправителя.

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. Волт-амперната характеристика (ВАХ) на диодите е снета експериментално – фиг. 10.

Снети са и регулировъчните характеристики на алтернатора при съвместната му работа с диоден изправител за две различни скорости на въртене и две различни изходни напрежения - фиг. 11 и фиг. 12.



Фиг.11 Регулировъчна характеристика при $n=2400rpm$.



Фиг.12 Регулировъчна характеристика при $n=3600rpm$.

4. Математически модел на алтернатора

На основата на получените резултати е разработен математически модел на алтернатора посредством уравненията от обобщената теория на електрическите машини [12]. Уравненията на напреженията на алтернатора са:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_d}{dt} &= U_d + \omega_r \Psi_q + R_s \frac{\Psi_{md} - \Psi_d}{L_{\sigma s}} \\
 \frac{d\Psi_q}{dt} &= U_q + \omega_r \Psi_d + R_s \frac{\Psi_{mq} - \Psi_q}{L_{\sigma s}} \\
 \frac{d\Psi_f}{dt} &= U_f + R_f \frac{\Psi_{md} - \Psi_f}{L_{\sigma f}} \\
 \frac{d\Psi_{kd}}{dt} &= R_{kd} \frac{\Psi_{md} - \Psi_{kd}}{L_{\sigma kq}} \\
 \frac{d\Psi_{kq}}{dt} &= R_{kq} \frac{\Psi_{md} - \Psi_{kq}}{L_{\sigma kq}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

където U_d и U_q са статорните напрежения по надлъжната ос d и по напречната ос q, U_f - напрежението на възбудителната намотка, R_s - съпротивлението на статора, R_f - съпротивлението на ротора, R_{kd} , R_{kq} - съпротивленията на успокоителната намотка на ротора по осите d и q.

Токовете на синхронната машина могат да бъдат представени чрез потокосцепленията в нея:

$$\begin{cases} i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{md}}{L_{\sigma s}} \\ i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{mq}}{L_{\sigma s}} \\ i_f = \frac{\Psi_f - \Psi_{md}}{L_{\sigma f}} \\ i_{kd} = \frac{\Psi_{kd} - \Psi_{md}}{L_{\sigma kd}} \\ i_{kq} = \frac{\Psi_{kq} - \Psi_{mq}}{L_{\sigma kq}} \end{cases} \quad (2)$$

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 пространствените вектори на тока и потокосцеплението по оста q; i_f и Ψ_f са токът и потокосцеплението на възбудителната намотка; i_{kd} , Ψ_{kd} , i_{kq} и Ψ_{kq} са токовете и потокосцепленията на успокоителната намотка на ротора; $L_{\sigma s}$, $L_{\sigma f}$, $L_{\sigma kd}$, $L_{\sigma kq}$ са индуктивностите на разсейване съответно на статора, възбудителната намотка и успокоителните намотки на ротора по осите d и q; Ψ_{md} и Ψ_{mq} са потокосцепленията на взаимна индукция, определени от:

$$\begin{aligned} \Psi_{md} &= LMD \left(\frac{\Psi_d}{L_{\sigma s}} + \frac{\Psi_f}{L_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{kd}}{L_{\sigma kd}} \right) \\ \Psi_{mq} &= LMQ \left(\frac{\Psi_q}{L_{\sigma s}} + \frac{\Psi_{kq}}{L_{\sigma kq}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

където LMD и LMQ са еквивалентните индуктивности на паралелно свързаните индуктивности по надлъжната и напречната ос:

$$\begin{aligned} LMD &= \frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{\sigma s}} + \frac{1}{L_{\sigma f}} + \frac{1}{L_{\sigma kd}} \\ LMQ &= \frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_{\sigma s}} + \frac{1}{L_{\sigma kq}} \end{aligned} \quad (4)$$

където L_{md} и L_{mq} са намагнитващите индуктивности по осите d и q.

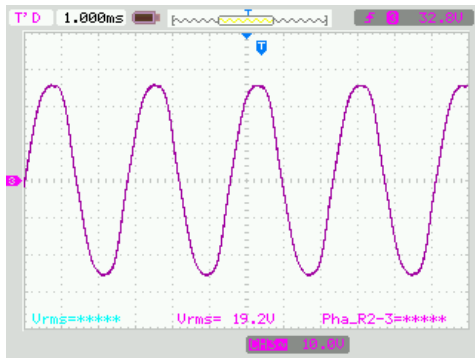
Уравнението за движение на синхронната машина е:

$$T_e = \frac{J}{p_p} \frac{d\omega_r}{dt} + T_m + k_D \omega_r + T_{add} \quad (5)$$

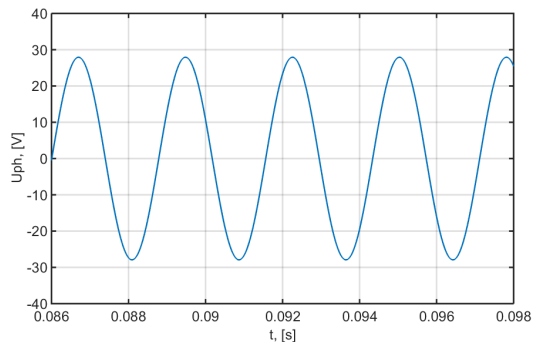
където T_e е електромагнитният момент, J - инерционният момент, p_p - броят на двойките полюси, T_m - външният момент, действащ върху вала на машината, k_D - коефициент на демпфериране, T_{add} - допълнителен момент, дължащ се на загубите в стоманата и механичните загуби в машината. Успокоителният и допълнителният момент са пренебрегнати, поради трудното им определяне.

5. Сравнение между симулационните и експерименталните резултати

Резултатите от проведените симулации са сравнени с експерименталните данни, като се вижда, че те съвпадат със задоволителна точност. На фиг.13 е показана осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор, а на фиг. 14 е показан резултат от симулация в Matlab/Simulink.

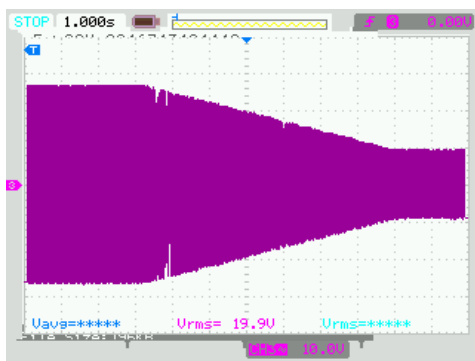


Фиг.13 Осцилограма на фазовото напрежение на изследвания алтернатор.

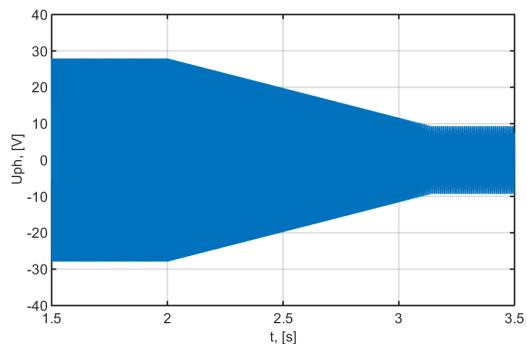


Фиг.14 Фазово напрежение на модела на алтернатора.

На фиг. 16 и фиг. 17 е показано изменението на напрежението на машината и на модела с изменение на скоростта на въртене при постоянен възбудителен ток, което показва устойчивостта на модела при промяна на скоростта, каквато би могла да се очаква в една ВЕПС.

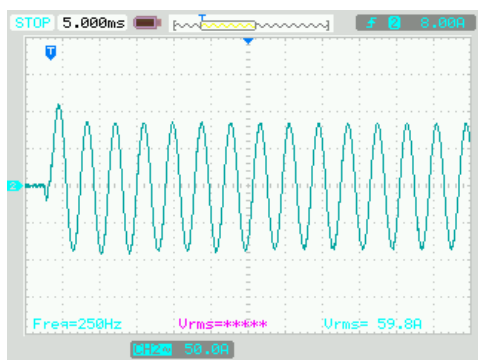


Фиг. 16 Осцилограма на напрежението на празен ход при изменение на скоростта на въртене от 3600 до 1200rpm.

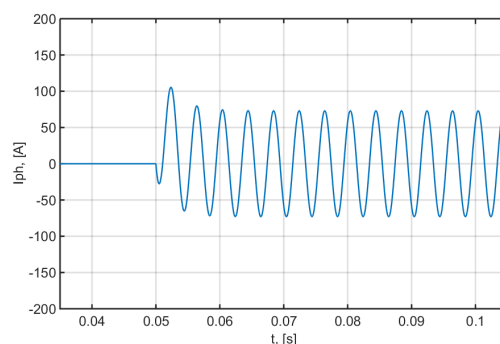


Фиг. 17 Напрежение на празен ход при изменение на скоростта на въртене от 3600 до 1200rpm на модела в Matlab/Simulink.

На фиг. 18 и фиг. 19 е сравнена осцилограма от внезапно трифазно късо съединение на алтернатора с реакцията на модела при идентични условия.

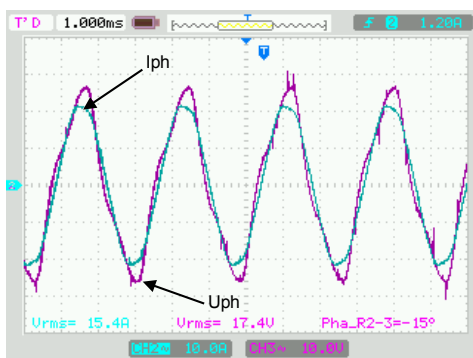


Фиг.18 Осцилограма на фазовия ток при внезапно късо съединение.

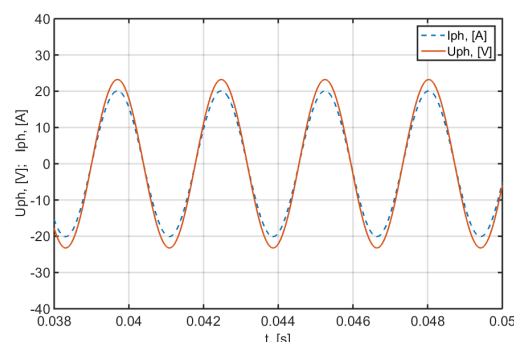


Фиг.19 Фазов ток на модела при внезапно късо съединение.

На фиг. 20 е показана осцилограма на фазовия ток и напрежение на изследвания алтернатор при натоварване с активен товар, а на фиг. 21 са показани изчислените форми на тока и напрежението при същите условия с помощта на разработения модел на алтернатора в Matlab/Simulink.



Фиг.20 Осцилограма на фазовия ток и напрежение на алтернатора при работа с активен товар.



Фиг.21 Фазов ток и напрежение на при натоварване с активен товар на модела в Matlab/Simulink.

6. Заключение

Проведено е експериментално изследване на алтернатор с електромагнитно възбуждане. Получени са характеристиките и параметрите на машината и е проучена възможността за работата ѝ във ВЕПС с малка мощност. На базата на експерименталните данни и обобщената теория на електрическите машини е създаден математически модел на алтернатор в средата Matlab/Simulink. Теоретичните резултати имат добро съвпадение с експерименталните, което показва адекватността на разработения математически и симулационен модел. Моделът ще бъде използван в по-нататъшно изследване на ВЕПС с малка мощност.

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] Global Wind Energy Council (GWEC), *Wind Report*, 2016, http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf.
- [2] World Wind Energy Association (WWEA), *Small Wind World Report*, 2016, http://www.wwindea.org/download/small_wind_/SWWR2016-SUMMARYR_2.pdf
- [3] IEC-61400-2:2013, “*Wind turbines - Part 2: Small wind turbines*” - <https://webstore.iec.ch/publication/5433>.
- [4] Shrud M. A., Bousbaine A., Elazrag A., Benamrouche N. (2009), *Analysis and simulation of a 42V power system for automotive applications*, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International, Glasgow, 2009, pp. 1-5.
- [5] Perreault D. J., Caliskan V. (2000), *A new design for automotive alternators*, Proceedings of International Congress on Transportation Electronics (Convergence 2000), Oct. 2000, SAE Paper 2000-01-C084, pp. 583–594.
- [6] Perreault D. J., Caliskan V. (2004) *Automotive power generation and control*, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 618-630, May 2004.
- [7] Muljadi E., Butterfield C. P. (2002) *Pitch-controlled variable wind turbine generators*, IEEE Trans, Ind, Appl, vol. 37, pp. 240-246, Jan./Feb 2002.
- [8] Mesbahi A., Saad A., Khafallah M., Bouattane O., Raihani A. (2013) *Boost converter analysis to optimise variable speed PMSG wind generation system*, Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2013 International, Ouarzazate, 2013, pp. 275-280.
- [9] IEC-60034-4:2008, “*Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests*” - <https://webstore.iec.ch/publication/138>.
- [10] Gimeno A. (2011) *Contribution à l'étude d'alternateurs automobiles: caractérisation des pertes en vue d'un dimensionnement optimal*, Thèse, Université de Technologie de Compiègne, 2011.
- [11] Whaley D. M., Soong W. L., Ertugrul N. (2004) *Extracting More Power from the Lundell Car Alternator*, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004), 26-29 September 2004, Brisbane, Australia.
- [12] Lazarov V. (2012) *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 преобразователни 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/