

ЛАБОРАТОРНА СИСТЕМА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА БЕЗЧЕТКОВИ ПОСТОЯННОТОКОВИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МАШИНИ

Петко Костадинов, Васил Димитров
petko_kostadinov@abv.bg, vdimitroff@abv.bg

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“
1574 София, ул. „Гео Милев“ № 158
БЪЛГАРИЯ*

Ключови думи: *електрозадвижване, безчеткови електродвигатели BLDC, широчинно-импулсна модулация (ШИМ), рекулперация, енергийна ефективност*

Резюме: *Съвременните електрозадвижвания притежават висока ефективност благодарение на прецизно микропроцесорно управление и използването на най-нови и качествени материали за производство на електродвигатели. Ето защо за постигане на все по-голяма ефективност на системите за задвижване, вниманието се насочва към електрозадвижвания на механизми с голям инерционен момент и режим на работа, съпроводен с честа промяна на скоростта на движение. При тях, по време на работа, в задвижвания механизъм се натрупва голямо количество кинетична енергия, която при спиране се преобразува в топлина и бива безвъзвратно загубена. За да бъде оползотворена тази енергия, е необходимо електродвигателят да премине в генераторен режим и да отдаде електроенергия в захранващата мрежа. Поради тази причина към съвременните електрозадвижвания се изисква висока ефективност в генераторен режим. Необходимостта от такъв тип електрозадвижвания поставя по-високи изисквания към научноизследователската дейност и качеството на обучение. В настоящия доклад е разработена система за изследване на безчеткова постояннотокова машина, работеща в генераторен режим. Осигурено е микропроцесорно управление за реализация на широчинно-импулсно регулиране на товарния ток. Наличието на система за измерване на въртящ момент, както и апаратура с висока точност за отчитане на напрежение и ток, създава възможност за изследване на товарните характеристики и ефективността на безчетков постояннотоков електродвигател в генераторен режим.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Изследването на електрозадвижванията в генераторен режим чрез измерване на входните и изходните величини (скорост на въртене, въртящ момент, генерирано напрежение и отдаван ток към товара) при различни режими на работа създава възможност за построяване на основните им характеристики в генераторен режим. Чрез анализ на получените характеристики може да бъде изчислено количеството енергия, която е възможно да бъде върната в мрежата от задвижващия механизъм при промяна на скоростта или в частния случай при неговото спиране. На базата на получените резултати е възможно да бъде направена оценка на възможностите за повишаване на

енергийната ефективност чрез въвеждане на система за рекуперация на енергията [1, 7, 8, 9]. Доброто познаване характеристиките на електрозадвижванията, в първия случай като система за консумация на електроенергия и извършване на механична работа, а във втория – като система за обратно получаване на електроенергия от натрупана механична енергия в задвижващия механизъм, е задължително условие за постигане максимална ефективност на електрозадвижването. Това с особена сила е валидно при механизми с голям инерционен момент и режим на работа, съпроводен с честа промяна на скоростта на движение [1, 8]. В тези случаи в задвижвания механизъм се натрупва голямо количество кинетична енергия по време на работа и при спиране бива безвъзвратно загубена, тъй като се преобразува в топлина.

В доклада е проектирана система за изследване на безчетков постояннотоков генератор, задвижван от механично куплиран електродвигател с възможност за плавна промяна скоростта на въртене. Системата за натоварване се състои резистор и дросел с възможност за регулиране на тока чрез широчинно-импулсна модулация (ШИМ) и микропроцесорна система за управление. Предвидена е контролно-измервателна апаратура с висока точност, както и механизъм за измерване на въртящия момент.

ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ НА СИСТЕМАТА ЗА НАТОВАРВАНЕ

Основни елементи на лабораторната система са:

- Система за задвижване: постояннотоков електродвигател с постоянни магнити, импулсен регулатор и блок за управление със следните параметри:

$n_{min} = 100 \text{ rpm}$ - Минимална скорост на въртене;

$n_{max} = 2000 \text{ rpm}$ - Максимална скорост на въртене;

$M_N = 2.7 \text{ N.m}$ - Номинален въртящ момент.

- Изпитван постояннотоков безчетков електродвигател (Brushless DC motor – BLDC) със следните параметри:

$n_{max} = 1600 \text{ rpm}$ - Максимална скорост на въртене;

$U_N = 310 \text{ V}$ – Номинално захранващо напрежение;

$p = 36$ – брой полюси ($m=3$ – брой фази);

$r_{\text{вѐтр}} = 5,1 \ \Omega$ и $L_{\text{вѐтр}} = 15 \text{ mH}$ – измерени фазни съпротивление и индуктивност на генератора.

Избрана е схема на системата за натоварване на генератора, показана на фиг. 1. Състои се от следните основни функционални блокове:

- ✓ Трифазен токоизправител ТИ по схема Ларионов (вграден в генератора).

- ✓ Филтриращ кондензатор С1 – създадена е възможност за изследване характеристиките при различен коефициент на пулсации чрез ключа К1 (с и без филтър).

- ✓ Товар, реализиран с резистор R_T и дросел L_T .

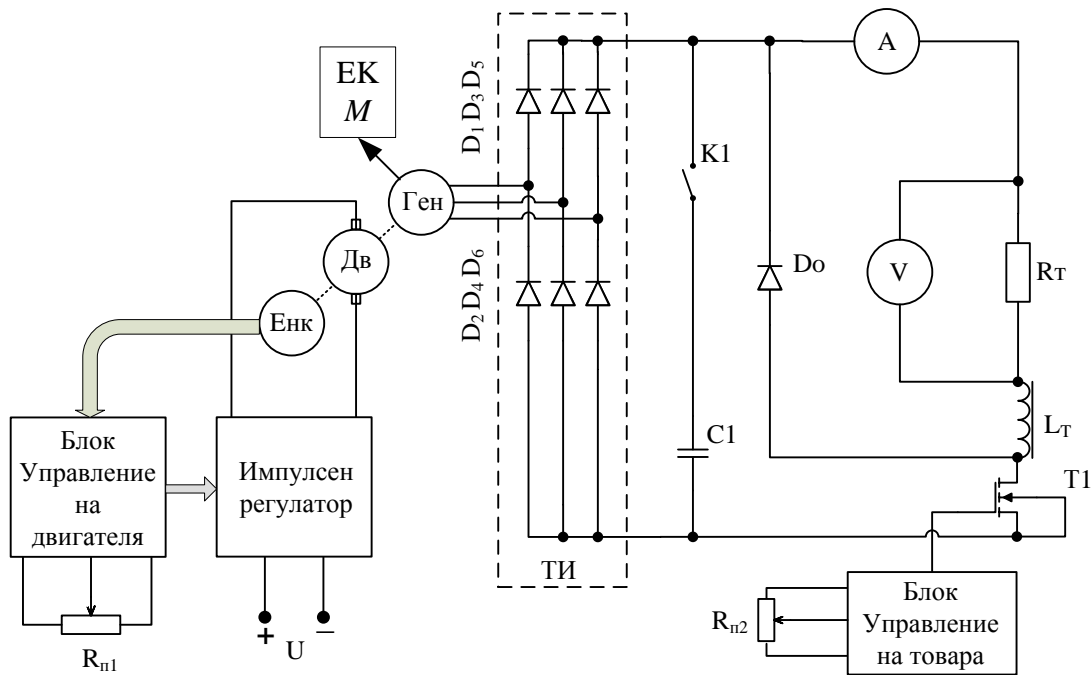
- ✓ Мощен MOSFET транзистор Т1 за управление силата на тока през товарния резистор и диод за обратен ток D_o .

- ✓ Електронен микропроцесорен блок за управление на Т1, генериращ правоъгълното напрежение за ШИМ с носеща честота $f_p = 1000 \text{ Hz}$.

- ✓ Контролно-измервателна апаратура: цифрови уреди с висок клас на точност (волтметър и амперметър). Осигурена е възможност и за измерване на въртящ момент M (чрез силата, измерена в kg и визуализирана на дисплея на електронен кантар ЕК).

Поради по-ниската максимална скорост на въртене на електродвигателя, работещ в генераторен режим, системата ще бъде оразмерена за 1600 rpm. В резултат на това механичната мощност P_M , предавана към генератора, може да се изчисли с формулата:

$$(1) \quad P_M = M_N \cdot \omega = M_N \cdot (\pi \cdot n / 30), W$$



Фиг. 1 Схема на лабораторен стенд за изследване на BLDC

Минималната и максималната ъглова скорост се определят съобразно данните на системата за задвижване:

$$(2) \quad \omega_{\min} = \pi \cdot n_{\min} / 30 = 3,14 \cdot 100 / 30 = 10,47 \text{ rad/s}$$

$$(3) \quad \omega_{\max} = \pi \cdot n_{\max} / 30 = 3,14 \cdot 1600 / 30 = 167,47 \text{ rad/s}$$

Чрез заместване във формула (1) се получава съответно минималната P_{Mmin} и максималната P_{Mmax} механична мощност, предавана към генератора:

$$(4) \quad P_{Mmin} = M_N \cdot \omega_{\min} = 2,7 \cdot 10,47 = 25,13 \text{ W}$$

$$(5) \quad P_{Mmax} = M_N \cdot \omega_{\max} = 2,7 \cdot 167,47 = 402,12 \text{ W}$$

Ако се предположи, че генерираното напрежение при номинални обороти на въртене е близко по стойност до напрежението, необходимо за развъртането до същите обороти в двигателен режим, то:

$$(6) \quad U_{ГЕН1600} \approx U_N = 310 \text{ V}$$

Електромагнитната константа $K_E = C_E \cdot \Phi$ се намира по изрза [1]:

$$(7) \quad K_E = U_{ГЕН1600} / \omega_{\max} = 310 / 167,47 = 1,85 \text{ Vs/rad}$$

Генерираното напрежение при минимална скорост на въртене е:

$$(8) \quad U_{ГЕН100} = \omega_{\min} \cdot K_E = 10,47 \cdot 1,85 = 19,37 \text{ V}$$

Определяне стойността на товарното съпротивление

Ако се приеме, че цялата механична мощност ще се преобразува в електрическа, то тогава сумарното товарно съпротивление $R_{T\Sigma}$ може да се намери по изрза:

$$(9) \quad R_{T\Sigma} = (U_{ГЕН})^2 / P_M, \Omega$$

Оттук се получава необходимата стойност на $R_{T\Sigma}$ за минимална и максимална скорост на въртене:

$$(10) \quad R_{T\Sigma 100} = (19,37)^2 / 25,13 = 375,2 / 25,13 = 14,9 \Omega$$

$$(11) \quad R_{T\Sigma 1600} = (310)^2 / 402,12 = 96100 / 402,12 = 238,98 \Omega$$

С цел осигуряване на максимално натоварване в целия работен обхват е необходимо да се избере резултатът от изрза (10). Сумарното товарно съпротивление е сума от външното товарно съпротивление R_T и вътрешното съпротивление на генератора. Следователно необходимата стойност на външното товарно съпротивление е:

$$(12) \quad R_T = R_{T\Sigma 100} - 2 \cdot r_{в\text{в}\text{т}\text{р}} = 14,9 - 10,2 = 4,7 \Omega$$

Избор на кондензатор

Определянето на капацитета на филтриращия кондензатор С1 зависи в голяма степен от честотата на първия хармоник във филтрираното напрежение. Тъй като постигнатата филтрация е минимална при ниска честота, изборът ще бъде извършен за минималната скорост на въртене от 100 rpm. Честотата f при тази скорост се определя по формулата [2, 4]:

$$(13) \quad f = 30 \cdot p / n_{\min} = 30 \cdot 36 / 100 = 10,8 \text{ Hz}$$

Определянето на необходимия капацитет се извършва по формулата [2, 3, 4]:

$$(14) \quad C \geq \frac{1}{k_n \cdot r} \cdot H, \mu F$$

където:

C – капацитет на филтриращия кондензатор;

k_n – необходим коефициент на пулсациите след филтъра $k_n = 0,05$

H – е функция на броя на фазите на генератора, на ъгъла на отсечка и на честотата на генерираното напрежение и се изчислява по формулата:

$$(15) \quad H = \frac{10^6 \cdot 2 \cdot (\sin(p_i \cdot \gamma) \cdot \cos(\gamma) - p_i \cdot \cos(p_i \cdot \gamma) \cdot \sin(\gamma))}{p_i \cdot \omega_{\text{изпр}} \cdot \pi \cdot (p_i^2 - 1) \cdot \cos(\gamma)}$$

където:

p_i – брой фази на изправителя, в случая $p_i = 6$;

γ – ъгъл на отсечка на токовия импулс;

$\omega_{\text{изпр}}$ – кръгова честота на напрежението, подавано към изправителя.

Кръгова честота се изчислява по формулата:

$$(16) \quad \omega_{\text{изпр}} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 10,8 = 67,8 \text{ rad/s}$$

Ъгълът на отсечка на токовия импулс се определя по формулата:

$$(17) \quad \gamma = 2 \cdot \pi / 2p_i = 2 \cdot 3,14 / 12 = 0,52 \text{ rad}$$

Получената стойност се замества във формула (15) и се получава:

$$(18) \quad H = \frac{10^6 \cdot 2 \cdot (\sin(6 \cdot 0,52) \cdot \cos(0,52) - 6 \cdot \cos(6 \cdot 0,52) \cdot \sin(0,52))}{6 \cdot 67,8 \cdot 3,14 \cdot (6^2 - 1) \cdot \cos(0,52)} = \frac{10^6 \cdot 2 \cdot (0 \cdot 0,866 - 6 \cdot (-1) \cdot 0,5)}{6 \cdot 67,8 \cdot 3,14 \cdot 35 \cdot 0,866}$$
$$H = \frac{6 \cdot 10^6}{38717} = 155$$

След заместване във формула (14) се получава:

$$(19) \quad C1 \geq \frac{1}{0,05 \cdot 5,1} \cdot 155 = 607 \mu F$$

Избрани са 2 бр. кондензатори, работещи в паралел, с номинален капацитет 330 μ F и номинално работно напрежение 400V.

Определяне стойността на индуктивността във веригата на товара

За да бъде осигурена максимална ефективност на генератора, е необходимо пулсациите на тока през него и товарния резистор да бъдат сведени до минимум. Тази задача се изпълнява от товарната индуктивност L_T . Липсата на точни методики за определянето на необходимата индуктивност наложи да бъде избрана някаква стойност и да бъде проверена чрез симулиране процеса на ШИМ. Резултат, при който пулсациите на тока са прекалено големи, ще бъде причина за съответно увеличаване на избраната стойност на товарната индуктивност и обратно – прекалено добрата филтрация ще е критерий за ненужно голяма стойност на L_T .

Разглежда се случаят, при който ключ К1 е в позиция „Отворен” и по този начин е изключен филтриращия кондензатор С. При максимална скорост на въртене и постоянно отпушен транзистор Т1 (коефициентът на запълване на ШИМ е 100%) във веригата на товарния резистор R_T би протекъл ток, който ще предизвика разсейване на мощност P в размер на:

$$(20) \quad P = (U_{\text{ГЕН}1600})^2 / (R_T + 2 \cdot r_{\text{вЪТР}}) = (310)^2 / (4,7 + 10,2) = 310 / 14,9 = 6449 \text{ W},$$

която многократно надвишава максималната входна механична мощност P_{Mmax} .

Това се дължи на факта, че съпротивлението във веригата е значително по-ниско от необходимото за тази скорост на въртене и в резултат на това протича многократно по-голям ток. Токът във веригата и неговите пулсации може да бъдат намалени чрез включване на индуктивността L_T , като се спази следното условие [3]:

$$(21) \quad (R_T + r_{в\ddot{u}тp} + X_{L_{\Sigma}})^2 = (R_{T_{\Sigma 1600}})^2$$

От израз (21) за сумарното индуктивното съпротивление се получава:

$$(22) \quad X_{L_{T_{\Sigma}}} = \sqrt{(R_{T_{\Sigma 1600}})^2 - (R_T + 2 \cdot r_{в\ddot{u}тp})^2} = \sqrt{238,98^2 - (4,7 + 2 \cdot 2,5,1)^2} = 238,51 \Omega$$

За необходимата сумарна индуктивност $L_{T_{\Sigma}}$ получаваме:

$$(23) \quad L_{\Sigma} = X_{L_{\Sigma}} / (2 \cdot \pi \cdot f_p) = 238,51 / (2 \cdot 3,14 \cdot 1000) = 0,038 \text{ H}$$

При направената симулация чрез Excel за сумарна индуктивност $L_{\Sigma} = 38 \text{ mH}$ и коефициент на запълване на ШИМ, при който се изпълнява условието:

$$(24) \quad P_T + \Delta P_{gen} = P_{Mmax}$$

не се получи достатъчно добър коефициент на пулсации и се наложи увеличаване на стойността ѝ до $L_{\Sigma} = 76 \text{ mH}$. В резултат на това се достигна приемлив коефициент на пулсации на тока в товара:

Коефициент на запълване на ШИМ	k_{pwm}	16,4	%
Максимална стойност на тока през товара	I_{max}	8,18	A
Минимална стойност на тока през товара	I_{min}	7,78	A
Среден ток през товара	I_{avg}	7,98	A
Разсейвана мощност в товара	P_T	299,17	W
Разсейвана мощност във вътрешното съпротивление на генератора	ΔP_{gen}	106,54	W
Коефициент на пулсации на тока в товара	k_{π}	0,05	

* Загубите в изправителя не са взети под внимание.

Симулацията е направена по метода на последователните итерации, като получената стойност на тока в последната клетка на таблицата се залага като начален ток за първата клетка. Достигането на равенство между стойностите на двете клетки е критерий, че симулирания процес се отнася за установен режим на ШИМ регулатора.

Формата на тока през товара при направената симулация е показана на фиг. 2, а моментните мощности, разсейвани във вътрешното съпротивление на генератора и в товарното съпротивление – на фиг. 3. Получената сумарна индуктивност на веригата $L_{\Sigma} = 76 \text{ mH}$ е оптималната за разглеждания случай. Товарната индуктивност L_T се определя, като от получената стойност за L_{Σ} се извади индуктивността на намотките на двигателя (измерената стойност е $L_{в\ddot{u}тp} = 15 \text{ mH}$):

$$(25) \quad L_T = L_{\Sigma} - 2 \cdot L_{в\ddot{u}тp} = 76 - 2 \cdot 15 = 46 \text{ mH}$$

Избор на елементите на изправителя

Максималния среден ток I_{Fav} през диодите се изчислява по формулата [1, 3, 4]:

$$(26) \quad I_{1,2} = I_{3,4} = I_{5,6} = \frac{1}{3} \cdot I_{avg} = \frac{1}{3} \cdot 7,98 = 2,66 \text{ A}$$

Максимално обратно напрежение U_{RWM} върху диодите е [1, 3, 4]:

$$(27) \quad U_{RWM} = 1,1 \cdot U_{ГЕН1600} = 1,1 \cdot 310 = 341 \text{ V}$$

Избрани са по финансови съображения два броя модули КВРС3510 (диоден токоизправител по схема Греп) със следните параметри, като едното рамо на единия модул няма да се използва:

$$U_{RMS} = 700 \text{ V}; \quad I_{Fav} = 35 \text{ A.}$$

Избор на управляващ транзистор

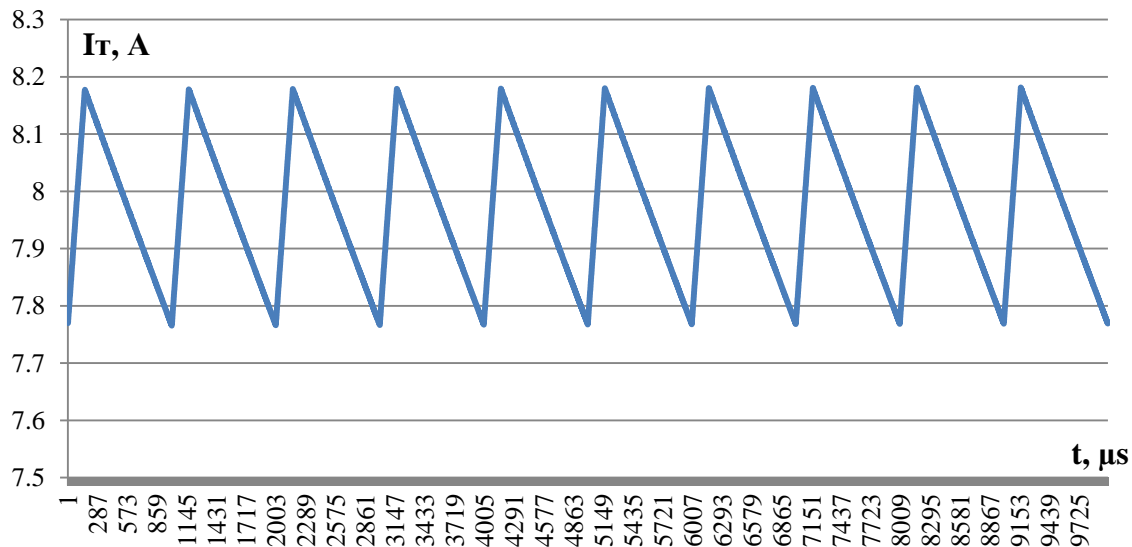
Изборът на MOSFET транзистор се извършва по максимално напрежение и максимален товарен ток. При използването на импулсен регулатор с токоограничение се използват изразите [1, 3, 7]:

$$(28) \quad U_{DS} \geq 1,2 \cdot U_{ГЕН1600} = 1,2 \cdot 310 = 372 \text{ V}$$

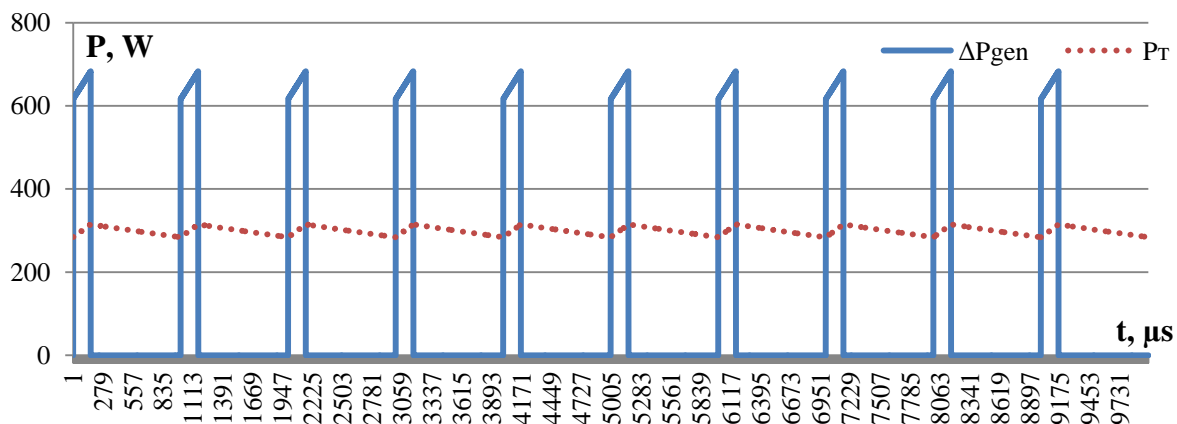
$$(29) \quad I_D \geq 1,5 \cdot I_{max} = 1,5 \cdot 8,44 = 12,66 \text{ A}$$

Избран е транзистор MOSFET IRF640 със следните параметри:

$$U_{DS \max} = 650 \text{ V}; \quad I_{D \max} = 47 \text{ A}; \quad R_{DS} = 0,07 \Omega$$



Фиг. 2 Ток през товарното съпротивление



Фиг. 3 Моментни мощности, разсейвани във вътрешното съпротивление на генератора и в товара

Избор на обратен диод

Избира се по максимално напрежение и среден ток [2, 3].

Избран е диод STTH3006DPI (Hyperfast boost diode) със следните параметри:

$$U_{RRM} = 600 \text{ V}; \quad I_F = 30 \text{ A}; \quad t_{RR} = 25 \text{ ns}$$

Измервателна апаратура

Избрана е измервателна апаратура – цифрови волтметри и амперметри, клас на точност 0,5, производство на фирмата ELMARK [10]:

- Цифров волтметър DC тип EKDP7-DV;
- Цифров амперметър DC тип EKDP7-DA 75mV, Шунт 5A / 75mV.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изграждането на проектираната лабораторна система създава възможности за изследвания в различни аспекти: снемане на работните характеристики на постояннотоков електродвигател с импулсен регулатор, на товарните характеристики на BLDC в генераторен режим, както и изследване на ефективността при различни

начини на изглаждане на пулсациите – без и с кондензатор (избор между индуктивен или Г-образен филтър). Приложението на лабораторната система в учебния процес е предпоставка за повишаване качеството на обучение по една перспективна съвременна тематика. Предложената методика може да се използва при проектиране и изграждане на различни системи с импулсно регулиране.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Българанов Л., И.Миленов, Г.Павлов, Ч.Джамбазки, Електрозадвижване, С., 2009
- [2] Павлов Г., В. Димитров, Ръководство за проектиране по електрообзавеждане, София, 2013
- [3] Москатов Е., Силовая электроника, Киев, „МК-Пресс“, СПб, „Корона-ВЕК“, 2017
- [4] Юдов В., В. Вълчев, Токозахранващи устройства, Бургас, 2008
- [5] Минчев М., Й. Шопов, Е. Рац, Преобразувателна техника, Авангард-Прима, С., 2006
- [6] Секулов Л., М. Златков, М. Томчева. Изследване и анализ на управлението на безчетков постояннотоков двигател (BLDC), Енергиен Форум, 2017
- [7] Вълков М., Петров И., Енергийно ефективни генератори за електрическа енергия, Н. сп. "Механика, транспорт, комуникации, бр. 3/3, стр. DS-173, 2013
- [8] Davidov S., I. Milenov, Control of a synchronous motor with brushless excitation, 8th International conference on applied electromagnetics, ПЕС - 2007, Nis, Serbia
- [9] Секулов Л., Г. Павлов, Я. Исаев, Р. Стоицев, Проектиране и изграждане на стенд за микропроцесорно управление на трифазен безчетков синхронен двигател с постоянни магнити, Н. сп. "Механика, транспорт, комуникации", бр. 3/2, стр. X-66, 2016
- [10] Digital meters EKDP7, Catalogue ELMARK ELECTRICAL, 2018

LABORATORY SYSTEM FOR STUDY OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MACHINES

Petko Kostadinov, Vasil Dimitrov

petko_kostadinov@abv.bg , vdimitroff@abv.bg

**Todor Kableshkov University of Transport – Sofia
158 Geo Milev Str., Sofia 1574, BULGARIA**

Key words: *electrical drive, brushless electric motors BLDC, pulse-width modulation (PWM), recuperation, energy efficiency*

Abstract: *Contemporary electrical drives are highly efficient thanks to the precise microprocessor control and the use of the latest and highest quality materials for the production of electric motors. Therefore, in order to achieve ever greater efficiency of drive systems, attention is directed to electrical drives of mechanisms with a high moment of inertia and operating mode with frequent changes of speed. In these cases, during the operation, a large amount of kinetic energy is accumulated in the driven mechanism and converted to heat during breaking (irretrievably lost). In order to use this energy, the electric motor needs to be switched to a generator mode and to recover electricity to the grid. For this reason, the contemporary electrical drives require high efficiency in generator mode. The need for a such type of electrical drives puts higher demands on research and the quality of education. In this paper, a system for study of a brushless DC machine operating in a generator mode is developed. A microprocessor control is provided to realize a pulse-width regulation of the load current. The existence of a torque measuring system as well as high accuracy voltage and current measuring devices gives the opportunity to study the load characteristics and efficiency of a brushless DC motor in a generator mode.*