

ПРОЕКТИРАНЕ НА ЛАБОРАТОРЕН СТЕНД ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ ПАРАМЕТРИТЕ НА ЧЕТКОВИ И БЕЗЧЕТКОВИ ПОСТОЯННОТОКОВИ ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

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, електродвигатели, енергийна ефективност, широчинно-импулсна модулация (ШИМ)*

Резюме: *Съвременните електрозадвижвания се проектират с преобразуватели с микропроцесорни системи за управление и защита, като се поставя акцент върху тяхната енергийна ефективност, но това изисква добро познаване на структурата и характеристиките на електрозадвижванията. Развитието на задвижванията поставя по-високи изисквания към научноизследователската дейност и качеството на обучение. В настоящия доклад е проектиран лабораторен стенд за изследване на основни характеристики на постояннотокови четкови и безчеткови електродвигатели. Разгледани са причините за избор на съответната структурна схема на стенда, методите за подбор на основните елементи, както и измерваните входни и изходни величини. Предвиден е начин за измерване на генерирания въртящ момент от електродвигателя. Осигурено е натоварване на двигателя чрез променливотоков синхронен генератор. Предвидено е микропроцесорно управление за реализация на широчинно-импулсно регулиране на напрежението, подавано към двигателя, както и за визуализация на зададената скорост на въртене, достигнатата скорост на въртене, честотата и коефициента на запълване на ШИМ. Създадена е възможност за изследване характеристики на постояннотоков електродвигател с импулсен регулатор при различни стойности на честотата и коефициента на запълване на ШИМ, както и товарните характеристики на синхронен генератор, ефективността на токоизправителите и регулаторите при различни начини и степен на изглаждане на пулсациите на изправеното напрежение след токоизправителя.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Изследването на електрозадвижванията чрез измерване на входните и изходните величини (захранващо напрежение, консумиран ток, скорост и въртящ момент) при различни режими на работа ни дава възможност за построяване на основните им характеристики. На базата на получените характеристики може да бъде направена преценка относно предимствата и недостатъците на съответното електрозадвижване при различни режими на работа, като енергийна ефективност, максимална мощност, себестойност, съотношение максимална мощност/маса и др. [1, 2]. Изборът на електро-

задвигване винаги е било съпроводено от някакви компромиси от типа на по-ниска мощност за постигане на по-малка маса или твърдо зададена скорост за по-ниска себестойност и др. Познаването на характеристиките на електрозадвиганията е задължително условие за постигане на подходящ компромис – използване на пълния потенциал на съответното електрозадвигане, водещо до повишена надеждност, ефективност и ниска себестойност на електрическите транспортни средства (ЕТС).

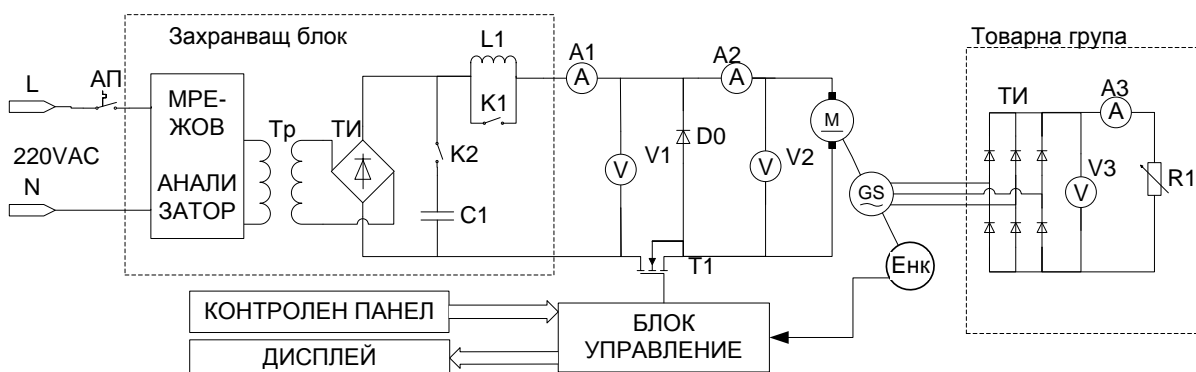
В този доклад е проектирана лабораторна система, състояща се от постояннотоков четков двигател, микропроцесорна система за управление, синхронен генератор, защитна и контролно-измервателна апаратура.

ИЗБОР НА СХЕМА

Изборът на схема е съобразен с наличния електродвигател с номинално работно напрежение 55V, което от своя страна налага използването на захранващ блок за понижаване на напрежението от мрежата [3-5]. Схемата на стенда е показана на фиг. 1 и се състои от следните основни функционални блокове:

- Автоматичен прекъсвач АП за защита;
- Захранващ блок, изграден от трансформатор Тр, токоизправител ТИ по схема Грец, изглаждащ филтър (индуктивност L1 и кондензатор C1);
- Механично куплирани четков електродвигател М за постоянен ток (ДПТ), постояннотоков безчетков електродвигател (в случая използван като синхронен трифазен генератор GS) и енкодер, като е предвидена възможност за измерване на спирания въртящ момент, създаван от синхронния генератор;
- Товарна група, състояща се от изправителен блок по схема Ларионов и товарен реостат, чрез който могат да бъдат избрани различни товарни режими на групата двигател-генератор;
- Постояннотоков импулсен регулатор - мощен MOSFET транзистор T1 и диод за обратен ток D0;
- Блок управление, изграден на базата на микроконтролера ATmega328;
- Контролен панел, състоящ се от потенциометър за задаване скорост на въртене, бутони “start”/”stop” и бутони „+/-“ за промяна честотата на широчинно-импулсната модулация (ШИМ);
- Дисплей за визуализация на заданието, действителната скорост на въртене, коефициента и честотата на ШИМ.

Избран е вариант за захранване на стенда с понижаване на напрежението с трансформатор и последващо изправяне чрез токоизправител по схема Грец. Създадена е възможност за изследвания на стенда относно ефективността на работа при различни видове изглаждащи филтри в захранващите блокове: предвиден е „Г”-образен LC изглаждащ филтър, но с възможност за изключване на елемент посредством ключовете K1 и K2: филтриране на пулсациите чрез кондензатора C1 (включване на K1 и K2),



Фиг. 1 Схема на лабораторния стенд

филтриране на пулсациите чрез индуктивността „L1” (изключване на K1 и K2) и филтриране на пулсациите чрез кондензатора „C1” и индуктивността „L1” (чрез включване на K2 и изключване на K1).

Чрез мрежовия анализатор, включен към първичната намотка на трансформатора, е възможно да се определят входната мощност в захранващия блок, наличието на висши хармоници, $\cos\phi$ и др. Наличието на амперметър и волтметър (A1 и V1) на изхода на токоизправителя дава възможност да се определи и ефективността му при различни товарни режими, а също така и при различните видове филтри за изглаждане на пулсациите, като бъде изчислена изходната мощност и съотнесена към входната, отчетена от мрежовия анализатор.

Наличието на амперметъра A2 и волтметъра V2 дават възможност, от една страна да се определи електрическата мощност, подавана към електродвигателя, от друга страна – отнесена към изходната мощност на токоизправителя, да се получи като резултат ефективността на регулатора при зададената мощност и честота на ШИМ.

Използваният синхронен генератор GS е с въртящ се статор, задвижван от ДПТ, а роторът му е монтиран на лагерно тяло с ос на въртене, съвпадаща с оста на въртене на статора. За да се предотврати пълното завъртане на ротора на GS, е предвидено задържане чрез гъвкава връзка в точка, отдалечена на 102 mm перпендикулярно на оста на въртене. Измерването на необходимата сила за задържане на ротора дава възможност да бъде изчислен въртящият момент, необходим за завъртане на статора:

$$(1) \quad M = g \cdot G \cdot 0,102, \quad N \cdot m$$

където M – изчислен въртящ момент, N.m;

g – земно ускорение $9,81 \text{ m/s}^2$, G – задържаща сила, измерена в kg.

Наличието на визуализация за достигнатите обороти и изчисления въртящ момент дават възможност за определяне на механичната мощност, предавана от двигателя към генератора, изчисляване коефициента на полезно действие на електродвигателя и построяване на работните му характеристики. Амперметърът A3 и волтметърът V3 дават информация за разсейваната мощност в товарния резистор R1, а също и възможност за косвено изчисление на изходната мощност на синхронния генератор и неговата ефективност при съответния работен режим.

ОРАЗМЕРЯВАНЕ НА ЕЛЕМЕНТИТЕ

Основен елемент от лабораторната система е постояннотоков двигател тип ЗР12.06 (с възбуждане с постоянни оксидирани магнити с голяма коерцитивна сила, осигуряваща надеждна работа при претоварване по ток) със следните параметри [6]:

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

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

$P_N = 0.4 \text{ kW}$ - Изходна мощност

$C_E \cdot \Phi = K_E = 0.239 \text{ Vs/rad}$ (Φ – магнитен поток)

$C_M \cdot \Phi = K_M = 0.239 \text{ Nm/A}$ ($C = C_E = C_M$ - конструктивен коефициент на двигателя)

Номиналният ток при номинален въртящ момент се определя от израза [2]:

$$(2) \quad I_N = M_N / K_M = 2,7 / 0,239 = 11,3 \text{ A}$$

Поради по-ниската максимална скорост на въртене на синхронния генератор стендът ще бъде оразмерен за 1600 rpm. В резултат на това максималното напрежение на изхода на регулатора не трябва да бъде по-ниско от (при работа на празен ход на двигателя):

$$(3) \quad U_{max} = K_E \cdot \omega = K_E \cdot \pi \cdot n / 30 = 0,239 \cdot 3,14 \cdot 1600 / 30 = 40 \text{ V}$$

След като се приеме, че падът на напрежение върху управляващия транзистор е около 2 V, за минималното напрежение върху кондензатора C1 се получава:

$$(4) \quad U_{C1 \min} = U_{\max} + 2 = 40 + 2 = 42 \text{ V}$$

Избор на трансформатор

Типовата (изчислителната) мощност на трансформатора P_T при схема с токоизправител по схема на Грец трябва да бъде поне 1,23 пъти по-голяма от консумираната постояннотокова мощност P_0 [1, 3]:

$$(5) \quad P_T \geq 1,23 \cdot P_0 = 1,23 \cdot U_{C1} \cdot I_N = 1,23 \cdot 42 \cdot 11,3 = 584 \text{ W}$$

Необходимото напрежение на вторичната страна се изчислява, като се предвиди падът на напрежение в диодите на токоизправителя (2,0,65 V), напрежението на първия хармоник в изглаждащия филтър при коефициент на пулсациите след филтъра $k_n=0,10$, както и толеранса на захранващото напрежение +10/-15 % [3, 4, 7]:

$$(6) \quad U_2 = (U_{C1} + 2,0,65) / [(1 - k_n) \cdot 0,85 \cdot \sqrt{2}] = (42 + 2,0,65) / (0,9 \cdot 0,85 \cdot \sqrt{2}) \approx 40 \text{ V}$$

Избираме стандартен трансформатор със следните параметри:

Мощност $S = 630 \text{ VA}$

Първично напрежение $U_1 = 220 \text{ V}$

Вторично напрежение $U_2 = 42 \text{ V}$

Работна честота $f = 50 \text{ Hz}$

Избор на автоматичен предпазител

Номиналният ток на автоматичния прекъсвач $I_{АП}$ се избира от стандартния ред, след като стойността му е по-голяма или равна на номиналният ток на избрания трансформатор с допълнителен запас $k_3 = 1,2$ [1]:

$$(7) \quad I_{АП} \geq k_3 \cdot \frac{S}{U_1} = 1,2 \cdot \frac{630}{220} = 3,44 \text{ A}$$

Избираме автоматичен предпазител със следните параметри:

Автоматичен предпазител ELMARK 6kA 4A 1P крива C41 104N

Брой полюси – 1

Номинално напрежение – 230 V

Номинален ток – 4 A

Изключвателна способност – 6 kA

Избор на кондензатор

Определянето на капацитета на филтриращия кондензатор $C1$ се извършва по формулата [1, 3, 4]:

$$(8) \quad C1 \geq \frac{1}{m \cdot 2\pi \cdot f \cdot k_n \cdot R_T}, F$$

където: R_T – съпротивление на товара - в случая:

$$(9) \quad R_T = U_{C1 \min} / I_N = 42 / 11,3 = 3,72 \Omega$$

$C1$ – капацитет на филтриращия кондензатор;

m – брой на фазите на изправителя – при двуполупериодно изправяне $m = 2$;

f – честота на захранващото напрежение ($f = 50 \text{ Hz}$)

k_n - коефициент на пулсациите след филтъра

k_3 – коефициент на запас $k_3 = 1,5$

Следователно:

$$(10) \quad C1 \geq \frac{1 \cdot k_3}{2 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 3,72} = \frac{1 \cdot k_3}{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 3,72} = 0,00642 \text{ F}$$

Избираме кондензатор със следните параметри:

Капацитет 6800 μF

Работно напрежение 100 V

Избор на индуктивност

Изборът на индуктивност се свежда до изпълнението на две условия [3, 4, 8]:

$$(11) \quad X_L \gg R_T$$

и резонансната честота на LC филтъра да бъде поне 2 пъти по-ниска от честотата на първия хармоник на пулсациите $f_{(1)}$:

$$(12) \quad f_{(1)} \geq 2 \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \right); f_{(1)} = m \cdot f = 2.50 = 100 \text{ Hz}$$

След преобразуване се получава:

$$(13) \quad L1 \geq \frac{(1/(\pi \cdot f_{(1)}))^2}{C1} = \frac{(1/(314))^2}{6,8 \cdot 10^{-3}} = 0,0015 \text{ H}$$

$$(14) \quad X_L = 2\pi f_{(1)} \cdot L1 = 2,3,14 \cdot 100 \cdot 0,0015 = 0,937 \Omega$$

Не е изпълнено е условието (11) и се приема индуктивното съпротивление да надвишава двукратно товарното съпротивление ($X_L = 2 \cdot R_T$). След преобразуване на (14) се получава необходимата минимална индуктивност:

$$L_1 = \frac{2 \cdot R_T}{2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{2,3,7}{2,3,14 \cdot 100} = 0,012 \text{ H}$$

Избор на управляващ транзистор

Изборът на MOSFET транзистор се извършва по максимално напрежение и максимален товарен ток (пусковият ток на двигателя, който се приема за $1,5 \cdot I_N$ при използването на импулсен регулатор с токоограничение) [1, 3, 7]:

$$(15) \quad U_{DS} \geq 1,2 \cdot U_{C1 \max} = 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,1,42 = 78,4 \text{ V}$$

$$(16) \quad I_D \geq 1,5 \cdot I_N = 1,5 \cdot 11,3 = 16,95 \text{ A}$$

Избран е транзистор MOSFET IRF640 със следните параметри:

$$U_{DS \max} = 200 \text{ V}$$

$$I_{D \max} = 18 \text{ A}$$

$$R_{DS} = 0,18 \Omega$$

Проверка за максимален пад на напрежение в транзистора:

$$(17) \quad U_{DS} = I_N \cdot R_{DS} = 11,3 \cdot 0,18 = 2,0 \text{ V}$$

Избор на обратен диод

Избира се по максимално напрежение и среден ток [1, 3].

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

$$U_{RRM} = 600 \text{ V}$$

$$I_F = 30 \text{ A}$$

$$t_{RR} = 25 \text{ ns}$$

Измервателна апаратура

Избрана е измервателна апаратура – цифрови волтметри и амперметри, производство на фирмата ELMARK [9]:

- Цифров волтметър DC тип EKDP7-DV:

Захранващо напрежение 100 – 240 VAC

Консумирана мощност $\leq 5 \text{ W}$

Обхват на измерване - програмно избиране на обхвата от 2V до 700V.

- Цифров амперметър DC тип EKDP7-DA 75mV:

Захранващо напрежение 100 – 240 VAC

Консумирана мощност $\leq 5 \text{ W}$

Обхват на измерване - с програмно избиране на обхвата от 5A до 2000A .

- Шунтове във веригата на ШИМ регулатора - 75mV / 15A.

- Шунт във веригата на генератора - 75mV / 5A.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изграждането на проектираната лабораторна система ще създаде възможности за изследване работните характеристики на постояннотоков електродвигател с импулсен регулатор, товарните характеристики на синхронен генератор, както и ефективността на работа на токоизправителите и регулаторите при различни начини и степен на филтриране на първия хармоник в изправителя и при промяна на честотата на ШИМ.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Павлов Г., В.Димитров, Ръководство за проектиране по електрообзавеждане, София, 2010
- [2] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електродвигване, София, 2009
- [3] Москатов Е., Силовая электроника, Киев, „МК-Пресс“, СПб, „Корона-ВЕК“, 2017
- [4] Стефанов Н., Токозахранващи устройства, Техника, София, 1985
- [5] Минчев М., Й. Шопов, Е. Рац, Преобразователна техника, Авангард-Прима, София, 2006
- [6] <http://www.arteh-bg.com/pages/products/DC/3PI.html>
- [7] http://www.dker.bg/files/DOWNLOAD/indic_1.pdf
- [8] http://ailback.ru/15_178752_sglazhivayushchiy-LC-filtr.html
- [9] https://issuu.com/elmarkgroup1/docs/electrical_a5

DESIGN OF A LABORATORY STAND FOR TESTING THE PARAMETERS OF BRUSH AND BRUSHLESS DC MOTORS

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, electric motor, energy efficiency, pulse-width modulation (PWM)*

Abstract: *Contemporary electrical drives are designed with converters with microprocessor control and protection systems, focusing on their energy efficiency, but this requires a good knowledge of the electrical drives structure and characteristics. The development of drives puts higher requirements on research and the quality of education. In this paper a laboratory stand has been designed to study the main features of DC brush and brushless electric motors. The reasons for choosing the appropriate structural scheme of the stand, the methods of selection of the basic elements, as well as the measured input and output quantities are considered. A way to measure the torque generated by the electric motor is ensured. Motor load is provided by alternating current synchronous generator. A microprocessor control is provided for realizing a pulse-width regulation of the voltage supplied to the motor as well as for visualization of the set speed, the real speed, the frequency and duty cycle of the PWM. An opportunity of testing the performance of a DC motor with a pulse regulator at different values of the PWM frequency and duty cycle, as well as the synchronous generator load characteristics, the efficiency of the rectifiers and regulators in different ways and the degree of reducing the pulsations of the DC voltage after the rectifier has been created.*