

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТАРИРОВЪЧНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

*Петко Костадинов*

[petko\\_kostadinov@abv.bg](mailto:petko_kostadinov@abv.bg)

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”  
гр. София, ул. „Гео Милев” 158  
РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ*

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

**Резюме:** *значителният напредък на съвременните микропроцесорни системи за управление създаде нови възможности за изграждане на интелигентни системи за електрозадвижване. Чрез предварително въвеждане на определени параметри, характеризирани задвижвания изпълнителен механизъм, както и внедряването на система за автоматично обновяване на данните, отчитаща настъпилите промени по време на неговата експлоатация, става възможно повишаване на производителността на електрозадвижването. Наличието на автоадаптивност в управлението на електрозадвижването би довело до по-висока енергийна ефективност на системата и намаляване на експлоатационните разходи в дългосрочен план.*

*В съответствие с повишените възможности на системите за управление на задвижванията е необходимо обстойно изследване на структурните елементи, което от своя страна поставя по-високи изисквания към научноизследователската дейност и качеството на обучение.*

*В настоящия доклад е представена методика за снемане тарировъчната характеристика на двигател за постоянен ток. Тарирането представлява определяне на сумата от загубите в лагерите на използвания електродвигател, загубите в магнитопроводите, загубите в активните съпротивления на намотките и загубите в свързващата предавка. Изследването се извършва в целия работен диапазон на двигателя, като на базата на получените резултати се построява тарировъчната характеристика. На нейна база при определено натоварване и скорост на електрозадвижването могат да бъдат определени изходната механична мощност, ефективността на електрозадвижването в съответния режим, както и устойчивостта му към моментни претоварвания.*

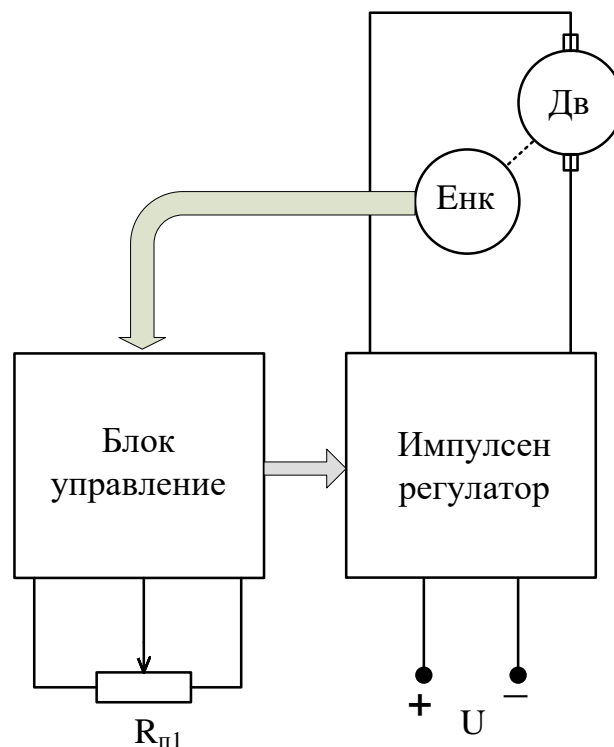
### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Повишаването на експлоатационните качества на електрозадвижванията става възможно чрез разработване на оптимални системи за управление, съобразени със спецификите на използвания електродвигател и на задвижвания механизъм. За целта е необходимо задълбочено изследване характеристиките на задвижващия електро-

двигател, включително определяне на сумата от загубите в лагерите, загубите в магнетопровода, загубите в активните съпротивления на намотките [1-3]. Изследването се извършва в целия работен диапазон на електродвигателя, като въз основа на получените резултати се построява тарировъчната характеристика. На нейна база при определено натоварване и скорост на електрозадвижването могат да бъдат определени изходната механична мощност, ефективността на електрозадвижването в съответния режим, както и устойчивостта му към моментни претоварвания.

### ОПИТНА ПОСТАНОВКА

На фиг. 1 е показана електрическата схема на опитната постановка, състояща се от електродвигател [5], импулсен регулатор, блок за управление и енкодер, използван за обратна връзка и за отчитане на скоростта на въртене. Включена е необходимата контролно-измервателна апаратура – амперметър и волтметър в котвената верига на електродвигателя [6].



Фиг. 1. Схема на изследваното електрозадвижване

### МЕТОДИКА ЗА СЧЕМАНЕ НА ТАРИРОВЪЧНА КРИВА

Тариране на постоянен ток двигател (ПТД) представлява определяне на сумата  $P_{оптд}$  от следните загуби:

- загубите в стоманата  $P_{сптд}$ ,  $W$ ;
- загубите в активното съпротивление на котвата, колектора и четковия апарат  $P_{оелптд}$ ,  $W$ ;
- механическите загуби  $P_{мехптд}$ ,  $W$  (от триене, вентилация, загуби в лагерите и др.):

$$(1) \quad P_{оптд} = P_{оелптд} + P_{сптд} + P_{мехптд}, W.$$

където  $P_{оптд}$  – е загубата на мощност в електродвигателя в режим на празен ход,  $W$ .

След пускането на двигателя на празен ход се изменя скоростта му на стъпки от минимална  $n_{min}$  до максимална  $n_{max}$  скорост на въртене. Измерват се скоростта на въртене  $n$ , напрежението  $U$  и тока  $I$  на двигателя. Отчитането на параметрите се извършва за различни тактови честоти на импулсния регулатор.

Тарировъчната крива може да бъде използвана впоследствие при адаптивното управление по момента на задвижването [4].

Алгоритъм за работа при снемане на тарировъчната характеристика:

- 1) Задава се тактовата честота на ШИМ на импулсния регулатор;
- 2) Задава се необходимата скорост (първоначално -  $n_{min}$ );
- 3) Стартира се двигателят;
- 4) Записват се стойностите на първата точка от характеристиката;
- 5) Увеличава се скоростта (чрез потенциометъра  $R_{п1}$ );
- 6) Записват се стойностите на втората точка от характеристиката;
- 7) Аналогично се снемат стойностите на точки от характеристиката до  $n_{max}$ .

Изчисляват се пълната електрическа мощност, загубите в активното съпротивление на котвата и сумата от загубите в стоманата и механическите загуби по съответните формули:

$$(2) \quad P_{оптд} = U_{оптд} \cdot I_{оптд}, W$$

където:

$U_{оптд}$  – измерено напрежение върху електродвигателя,  $V$ ;

$I_{оптд}$  – измерен ток през електродвигателя,  $A$ .

$$(3) \quad P_{оелптд} = r_a \cdot I_{оптд}^2, W$$

където:

$r_a$  – активно съпротивление на котвената верига (котвената намотка, колектора и четковия апарат),  $\Omega$ ;

В случая се изпитва постоянен ток двигател тип ЗР12.06 (с възбуждане с постоянни оксидирани магнити) със следните параметри [5]:

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

$M_N = 2,7 \text{ N.m}$       Номинален въртящ момент

$P_N = 0,4 \text{ kW}$       Номинална изходна мощност

$I = 0,0028 \text{ kg.m}^2$       Инерционен момент

Активното съпротивление  $r_a$  е изчислено, след като при механично блокиран вал на котвата е приложено напрежение  $U=2,07V$  и е отчетен протичащ ток  $I=2,95A$ .

$$(4) \quad r_a = U/I = 2,07 / 2,95 = 0,702 \Omega$$

От формула (1) се определя:

$$(5) \quad P_{сптд} + P_{мехптд} = P_{оптд} - P_{оелптд}, W$$

Получените данни се попълват в таблици и се построяват характеристиките  $P_{оптд} = f(n)$ ,  $P_{оелптд} = f(n)$ ,  $P_{сптд} + P_{мехптд} = f(n)$ .

Измерванията и построяването на характеристики се правят последователно за различни тактови честоти на ШИМ.

## РЕЗУЛТАТИ ОТ НАПРАВЕНИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ И ИЗЧИСЛЕНИЯ

В табл. са показани резултатите от измерванията и изчисленията при тактова честота 244 Hz.

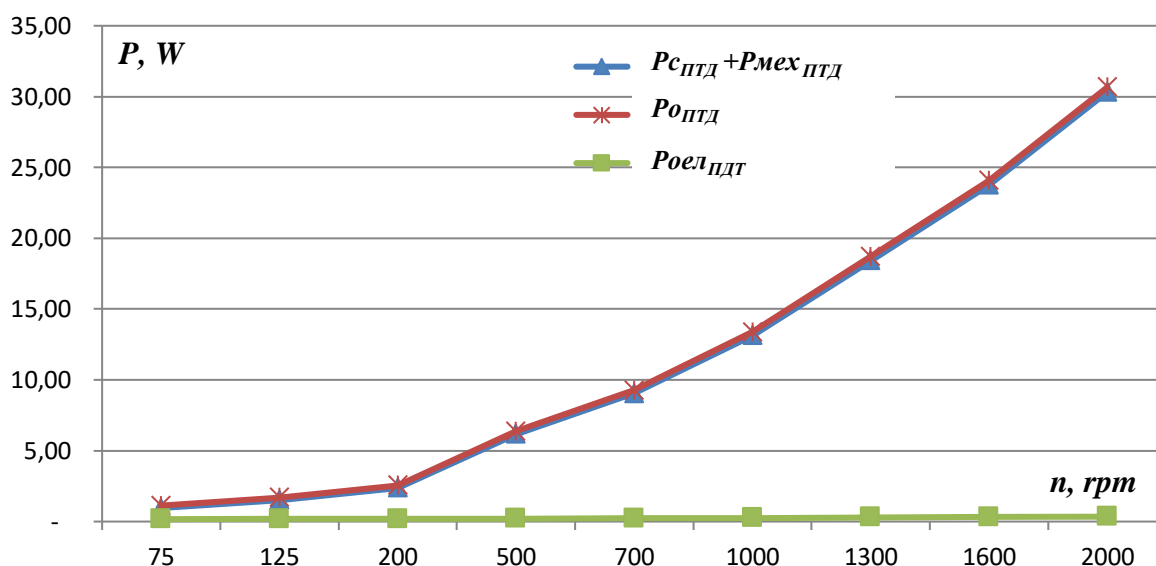
На фиг. 2 са показани получените тарировъчни характеристики в графичен вид.

Сумата  $P_{сптд} + P_{мехптд}$ ,  $W$ , може с достатъчна точност  $\pm 5\%$  да се представи чрез полином от втора степен:

$$(6) \quad P_{сптд} + P_{мехптд} = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot n, \quad W$$

Табл. 1. Резултати при тактова честота 244 Hz

$n$	$U_{оптд}$	$I_{оптд}$	$P_{оптд}$	$P_{оелптд}$	$P_{сптд} + P_{мехптд}$
$min^{-1}$	$V$	$A$	$W$	$W$	$W$
75	2,3	0,49	1,13	0,17	0,96
125	3,4	0,5	1,70	0,18	1,52
200	5	0,51	2,55	0,18	2,37
500	11,6	0,55	6,38	0,21	6,17
700	16	0,58	9,28	0,24	9,04
1000	22,3	0,6	13,38	0,25	13,13
1300	28,8	0,65	18,72	0,30	18,42
1600	35,4	0,68	24,07	0,32	23,75
2000	43,8	0,7	30,66	0,34	30,32



Фиг. 2. Графики на консумираната мощност от електродвигателя на празен ход  $P_{оптд}$ , сумата от загубите в стоманата и механичните загуби  $P_{сптд} + P_{мехптд}$  и електрическите загуби  $P_{оелптд}$

Това дава възможност при известен инерционен момент да се изчисли времето, за което от максимална скорост на въртене  $n_{max} = 2000 \text{ грт}$  настъпва спиране по инерция до  $n_{min} = 0 \text{ грт}$  и след това да бъде извършена емпирична проверка на резултата от изчислението. Изчисленията са извършени в скриптовия прозорец на Матлаб – на фиг. 3 е показана използваната програма, а полученият резултат от изчисленията е 4,50 s.

Проведено е, също така, ръчно измерване с хронометър на времето за спиране на електродвигателя. Извършени са 10 последователни измервания и е изчислена средноаритметична стойност, като данните са представени в табл. 2.

Наблюдава се разминаване между изчисленото и измереното време за спиране по инерция, което е от порядъка на 6,5%.

```

clear;clc;
step=1; % Стъпка на дискретизиране [min-1]
I=0.0028; % Инерционен момент
nstart=2000; % Начална скорост на въртене [min-1]
nstop=0; % Крайна скорост на въртене [min-1]
nH=nstart; % Скорост на въртене в началото на дискретния участък [min-1]
nL=nstart; % Скорост на въртене в края на дискретния участък [min-1]
%EH=Estart; %остатъчна енергия за предходния дискретен участък
s=0; %Време за спиране по инерция
while nL>nstop;
    i=i+1;
    nL=nH-step;
    P=(0.0000017*(nH+nL)^2/4 + 0.012*(nH+nL)/2 );
    M=P/((nH+nL)*6.28/120)%Необходим въртящ момент за преодоляване на
    съпротивлението
    sDelta=( (I*(nH*6.28/60)^2)/2 - (I*(nL*6.28/60)^2)/2
    )/(M*((nH+nL)*6.28/120));
    %Време за намаляване на скоростта в разглеждания дискретен участък
    s=s+sDelta;
    nH=nL;
end

```

Фиг. 3. Програма за симулиране на спиране по инерция

Табл. 2. Измерени стойности на времето за спиране на електродвигателя

T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>ср.</sub>
s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
4,2	4,32	4,13	4,24	4,43	4,19	4,18	4,22	4,17	4,12	4,22

Една от възможните причини е, че в протичащия ток през електродвигателя съществува променливотокова съставка, която води до разлика между средната (измерена в случая) и ефективната стойност на  $I_0$  *пдт*. Наличието на променливотокова съставка е възможно да води до разлики между изчислените и реалните електрически загуби и загубите в стоманата. Това може лесно да се провери чрез увеличаване на тактовата честота на ШИМ – това би довело до намаляване на стойността ѝ поради непроменящата се стойност на индуктивността на дросела в импулсния регулатор. При направени измервания с различни стойности на тактовата честота на ШИМ са получени резултати, идентични с тези в табл. 1, което прави предположението неоснователно.

Друга възможна и по-вероятна причина е субективизъм при ръчното измерване на времето за спиране.

## ИЗВОДИ

При извършената проверка чрез симулация в средата на Матлаб са получени резултати, идентични с експерименталните, което потвърждава използваната методика за извършване на изчисленията.

Наблюдава се устойчивост на резултатите от измерванията при различни тактови честоти на ШИМ, т.е. при достатъчно голяма индуктивност на дросела в регулатора индуктивното му съпротивление е достатъчно голямо даже и при ниски тактови честоти на ШИМ. Вследствие на това, променливотоковата съставка на тока през котвата е незначителна, както и генерираните загуби от нея.

Наличието на база данни в блока за управление чрез предварително въвеждане на тарировъчната характеристика и на определени параметри, характеризиращи задвижвания изпълнителен механизъм, както и внедряването на система за автоматично обновяване на данните, отчитаща настъпилите промени по време на

неговата експлоатация, създават допълнителни предпоставки за подобряване на експлоатационните качества в следните аспекти:

- дава възможност при определено натоварване и скорост да бъдат изчислени изходната механична мощност и ефективността на електрозадвижването;
- да се оценява устойчивостта на електрозадвижването към моментни претоварвания при съответния работен режим, което да доведе до повишаване на производителността, по-висока енергийна ефективност и намаляване на експлоатационните разходи в дългосрочен план.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

- [1] Миленов И., Г. Павлов, В. Димитров, Електрозадвижване – Част 1: Основи на електрозадвижването, Изд. Авангард прима, 2019
- [2] Миленов И., Г. Павлов, В. Димитров, Електрозадвижване – Част 2: Управление на електрозадвижванията, Изд. Авангард прима, 2019
- [3] Павлов Г., В. Димитров, Ръководство за проектиране по електрообзавеждане, Изд. Пропелер, София, 2013
- [4] Димитров В., Адаптивно управление на тягови задвижвания – лабораторен симулатор, Годишник на Технически Университет – София, т. 63, кн. 5, 2013, стр. 155-162
- [5] <http://www.arteh-bg.com/pages/products/DC/3PI.html>
- [6] [http://elmarkholding.eu/download/products/129/Part108\\_Catalog\\_ELMARK\\_2015\\_WEB.pdf](http://elmarkholding.eu/download/products/129/Part108_Catalog_ELMARK_2015_WEB.pdf)

## **DETERMINATION OF THE CALIBRATION CHARACTERISTIC OF A DC MOTOR**

**Petko Kostadinov**

*Todor Kableshkov University of Transport  
Sofia, 158 Geo Milev Str.  
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

**Keywords:** *electrical drive, electric motor, energy efficiency, pulse-width modulation (PWM)*

**Abstract:** *Significant advances in modern microprocessor control systems have created new opportunities for creating intelligent electric drive systems. By pre-introduction of certain parameters characterizing the actuator, as well as by the incorporation of artificial intelligence in the control unit, it is possible to increase the productivity (of the electric actuator), leading to higher energy efficiency and reducing the cost of the system.*

*In line with the increased capabilities of drive control systems, a thorough study of the structural elements is needed, which in turn places higher demands on research and the education quality.*

*This paper presents a methodology for taking the calibration characteristic of an electrical drive. Calibration is the determination of the sum of the losses in the bearings of the motor used, the losses in the magnetic conductors, the losses in the active resistances of the windings and the losses in the connecting shaft. The test is performed in the entire operating range of the electric motor, and on the basis of the obtained results the calibration characteristic is constructed. Based on it, at a certain load and speed of the electrical drive, the output mechanical power, the efficiency of the electrical drive in the respective mode, as well as its resistance to moment overloads can be determined.*