

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ПАРАМЕТРИ НА КОТВЕНАТА ВЕРИГА ПРИ РАЗЛИЧНИ РЕЖИМИ НА РЕГУЛИРАНЕ НА СКОРОСТТА НА ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК

Васил Димитров, Людмил Попов
vdimitroff@abv.bg, lucy6@abv.bg

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

***Ключови думи:** постояннотоково електрозадвижване, съпротивление на котвата на двигателя, коефициент на електромагнитно взаимодействие*

***Резюме:** Често в изследователската работа или при ремонта и пусково – настройките дейности се налага експериментално да се оценят някои важни параметри на постояннотоково електрозадвижване, като собственото съпротивление на котвата на двигателя R_a и коефициентът на електромагнитно взаимодействие κ_{ϕ} . Експерименталното измерване на съпротивлението R_a е сложно и с много недостатъци: задвижването трябва да се подлага на сравнително ниско захранващо напрежение с отнето възбуждане или със застопорен ротор; приема се една условна стойност на пада на напрежение в прехода „контактни четки - колектор“, която в реалния случай може да се различава, тъй като зависи от състоянието на прехода; Съпротивлението на котвата R_a може да се определи приблизително, като се приеме, че при номинален товар загубите на енергия в съпротивлението на котвената намотка са близо половината от общите загуби на мощност в двигателя.*

В доклада се предлага друг подход за определяне параметрите R_a и κ_{ϕ} , при който измерването е обективно и гарантира много голяма точност, като са избегнати основните недостатъци на класическия метод. Измерват се токът в котвата, ъгловата скорост и напрежението. След това от уравнението за равновесието на електродвижещите напрежения се определят търсените параметри за различните начини на регулиране на скоростта. Проведената симулация в Simulink верифицира разработените методи като много по-точни и бързи от класическите.

ВЪВЕДЕНИЕ

Експерименталното измерване на съпротивлението R_a е неточно, понеже: задвижването трябва да се подлага на сравнително ниско захранващо напрежение с отнето възбуждане или със застопорен ротор; приема се една условна стойност на пада на напрежение в прехода „контактни четки - колектор“, която не винаги е гарантирана – зависи от състоянието на колектора и четките и от типа на последните;

препоръчаното осредняване по няколко измервания за различни ъглови положения на ротора силно увеличава времето за измерване, без съществено да подобри точността.

Съпротивлението на котвата R_a може да се определи по следната формула [1,2]:

$$(1) \quad R_a \approx 0,5 \cdot \left(1 - \frac{R_H}{U_H I_H}\right) \cdot \frac{U_H}{I_H},$$

От основния израз за скоростта при номинален режим на двигателите за постоянен ток [1] може да се изведе формулата за коефициента c_ϕ :

$$(2) \quad c_\phi = \frac{U_H - R_a I_H}{\omega_H}, \text{ където } c_\phi = c \cdot \Phi, \text{ а противно-е.д.н е } E = c_\phi \cdot \omega_H$$

МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ СЪПРОТИВЛЕНИЕТО НА КОТВАТА И КОЕФИЦИЕНТЪТ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

При предлагания метод за определяне на параметрите R_a и c_ϕ се приема, че електрозадвижването работи в установен режим и има възможност да се измерват тока и скоростта. В зависимост от възможностите за регулиране на скоростта на двигател за постоянен ток с независимо възбуждане (ДПТНВ) са възможни следните подходи:

A. Регулиране на скоростта с помощта на допълнителен резистор във веригата на котвата $R_{дон}$.

Подходът е удобен при кранови задвижвания. Понеже съпротивителният момент на вала е постоянен, то може да се запише [1]:

-за естествената характеристика:

$$(3) \quad U = c_\phi \omega_1 + R_a I;$$

-за изкуствена характеристика:

$$(4) \quad U = c_\phi \omega_2 + (R_a + R_{дон}) \cdot I,$$

където $c_\phi = c \cdot \Phi$

- U е захранващо напрежение;

- I - измереният товарен ток;

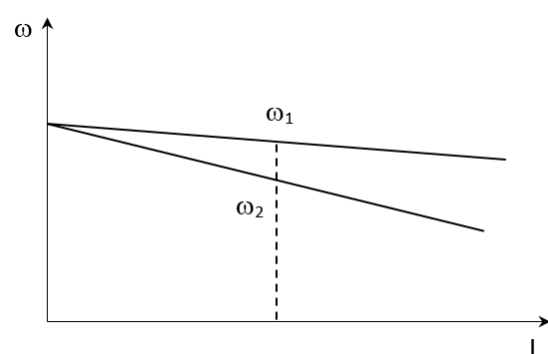
- R_a и c_ϕ – търсените параметри;

- $R_{дон}$ - допълнително съпротивление;

- ω_1, ω_2 – скоростите по съответните

характеристики

Характеристиките са дадени на фиг. 1:



Фиг. 1 Функции $\omega=f(I)$

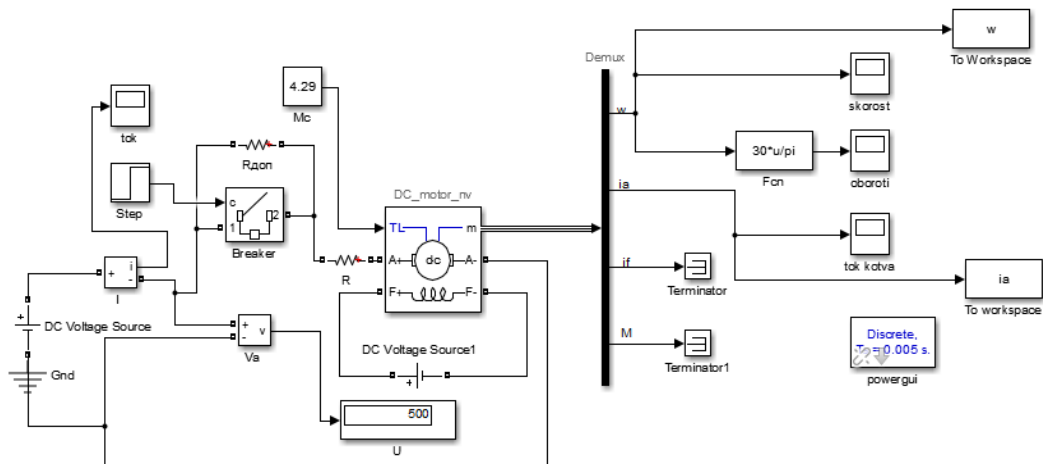
От уравнение (3) следва:

$$(5) \quad R_a = \frac{U - c_\phi \omega_1}{I}.$$

От изваждането на уравнение (3) от уравнение (4) следва:

$$(6) \quad c_\phi = \frac{R_{дон} \cdot I}{\omega_1 - \omega_2};$$

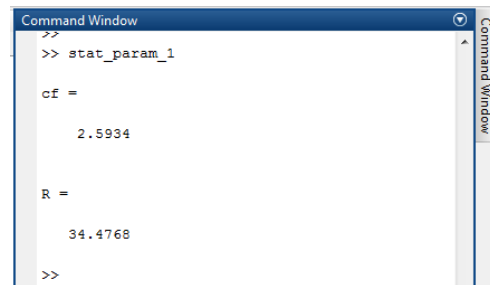
На фиг. 2 е представена симулационна схема на ПТДНВ в среда на Simulink[3,4].



Фиг. 2 Симуляционна схема на ДПТНВ

Във веригата на котвата е включено съпротивление $R=30 \Omega$ с цел намаляване на пусковия ток и по-плавно развъртане на двигателя. Отделно към същата верига е включен допълнителен резистор $R_{дон} = 20 \Omega$, който 2 s след пуска на двигателя се шунтира. Параметрите на ДПТНВ са: $P_n=7,5kW$; $U_{zap}=500V$; $\omega_n=1750rpm$; $U_{възб}=300V$, $R_a=4,712\Omega$; $L_a=0,05277H$; $R_f=180\Omega$ и $L_f=71,47H$.

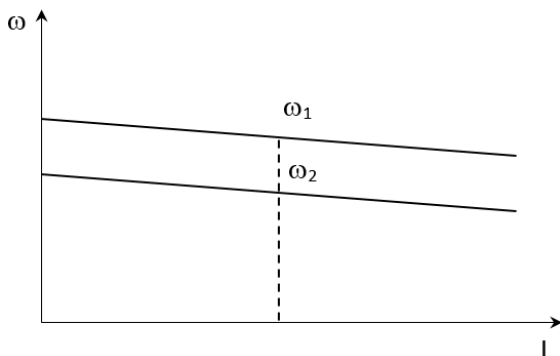
Отчитат се две стойности за оборотите на двигателя през $\Delta t=0,005s$ и стойността на товарния ток и се заместват първо във формула (6) и след това във формула (5) като се получават (фиг. 3): $c_\phi = 2,5934$ и $R_a=34,4768-30=4,4768\Omega$. Изчисленото съпротивление се отличава от отчетеното по каталожни данни с $0,2\Omega$.



Фиг. 3 Стойности на c_ϕ и R от модела

Б. Регулиране на скоростта с изменение на напрежението на котвата.

Подходът е удобен за големи кранови задвижвания или задвижвания при постоянен съпротивителен момент (фиг. 4). В сила са уравненията [1]:



Фиг. 4 Функции $\omega=f(I)$

$$(7) \begin{cases} U_1 = c_\phi \omega_1 + R_a I \\ U_2 = c_\phi \omega_2 + R_a I \end{cases}$$

От системата уравнения (7) следва:

$$(8) c_\phi = \frac{U_1 - U_2}{\omega_1 - \omega_2}$$

$$(9) R_a = \frac{U_1 - c_\phi \omega_1}{I}$$

Използва се схемата от фиг. 2 [3,4] като във веригата на котвата е включено съпротивление $R=25 \Omega$ с цел намаляване на пусковия ток и по-плавно развъртане на двигателя.

Отчитат се две стойности за ω и U през $\Delta t=0,005 s$ и стойността I и се заместват в (8) и след това в (9).

Получават се:

$$- c_\phi = 1,8865;$$

$$- R_a=29,7145-25=4,7145\Omega.$$

Изчисленото съпротивление на котвата се отличава от съпротивлението по каталожни данни с $0,02\Omega$. (фиг. 5).

```
Command Window
>> stat_param_2

cf =

    1.8865

R =

    29.7145
```

Фиг. 5 Стойности на c_ϕ и R_a от модела

В. Общ случай, освободен от изискването за постоянство на товарния момент.

Системата уравнения е [1]:

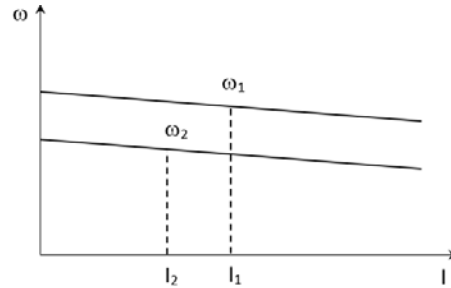
$$(10) \begin{cases} U_1 = c_\phi \omega_1 + R_a I_1 \\ U_2 = c_\phi \omega_2 + R_a I_2 \end{cases}$$

Случаят е илюстриран на фиг. 6:

От решаването на системата следва:

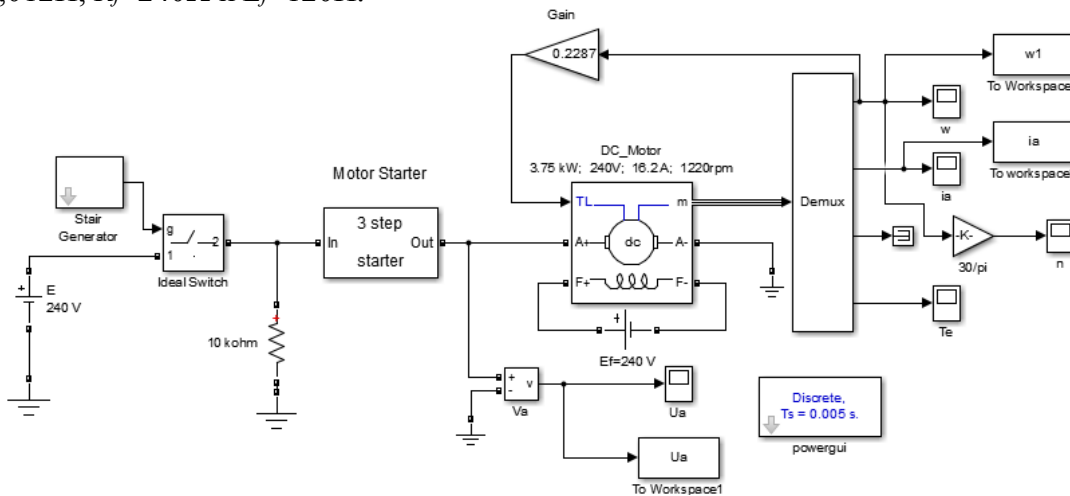
$$(11) c_\phi = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{\omega_1 I_2 - \omega_2 I_1}$$

$$(12) R_a = \frac{\omega_1 U_2 - \omega_2 U_1}{\omega_1 I_2 - \omega_2 I_1}$$



Фиг. 6 Функции $\omega=f(I)$

На фиг. 7 е представена симулационна схема на ДПТНВ в Simulink [3,4]. Параметрите на ДПТНВ са: $P_n=3,75\text{kW}$; $U_{з\text{а}\text{р}\text{п}}=240\text{V}$; $\omega_n=1220\text{rpm}$; $U_{\text{в}\text{ъ}\text{з}\text{б}}=240\text{V}$, $R_a=0,6\Omega$; $L_a=0,012\text{H}$; $R_f=240\Omega$ и $L_f=120\text{H}$.



Фиг. 7 Симулационна схема на ПТДНВ

Генераторът подава импулс за стартиране след 0,5 s. Общото съпротивление на реостатния блок е $6,04\Omega$. За плавно стартиране на двигателя стартерът изключва след 2,8 s; 4,8 s и 6,8 s реостатните съпротивления: $R_1=3,66\Omega$; $R_2=1,64\Omega$ и $R_3=0,74\Omega$.

Отчитат се по две стойности за $\omega_{\text{двиг}}$, $U_{\text{котва}}$ и $I_{\text{котва}}$ през $\Delta t=0,005\text{ s}$.

Заместват се в (11) и след това в (12).

Получават се (фиг. 8): $c_\phi = 1,8004$ и $R_a=0,6290\Omega$.

Изчисленото съпротивление на котвата, се отличава от съпротивлението по каталожни данни с $0,03\Omega$.

```
Command Window
>> stat_param_3

cf =

    1.8004

R =

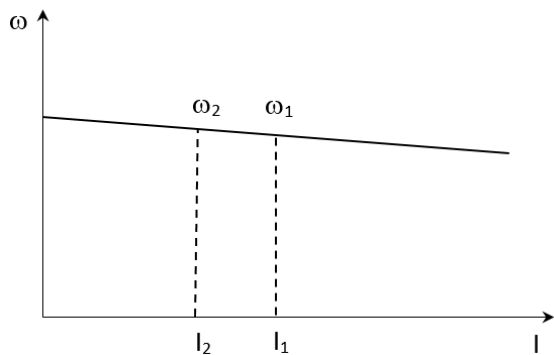
    0.6290
```

Фиг. 8 Стойности на c_ϕ и R_a от модела

Г. Случай без регулиране.

Когато могат по една характеристика да се осигурят две работни точки (вдигане на два различни товара – за кранови електроздвижвания, или работа под товар и на условен празен ход). Случаят е илюстриран на фиг. 9 и съответните уравнения са [1]:

$$(13) \begin{cases} U = c_\phi \omega_1 + R_a I_1 \\ U = c_\phi \omega_2 + R_a I_2 \end{cases}$$



Фиг. 9 Функция $\omega=f(I)$

$$(14) \begin{cases} U - c_\phi \omega_2 + R I_2 \\ 0 = c_\phi (\omega_1 - \omega_2) + R (I_1 - I_2) \end{cases}$$

От първото уравнение на (14) се изразява R_a и се замества във второто уравнение на (14). Така се намира c_ϕ :

$$(15) c_\phi = U \frac{I_2 - I_1}{\omega_1 I_2 - \omega_2 I_1};$$

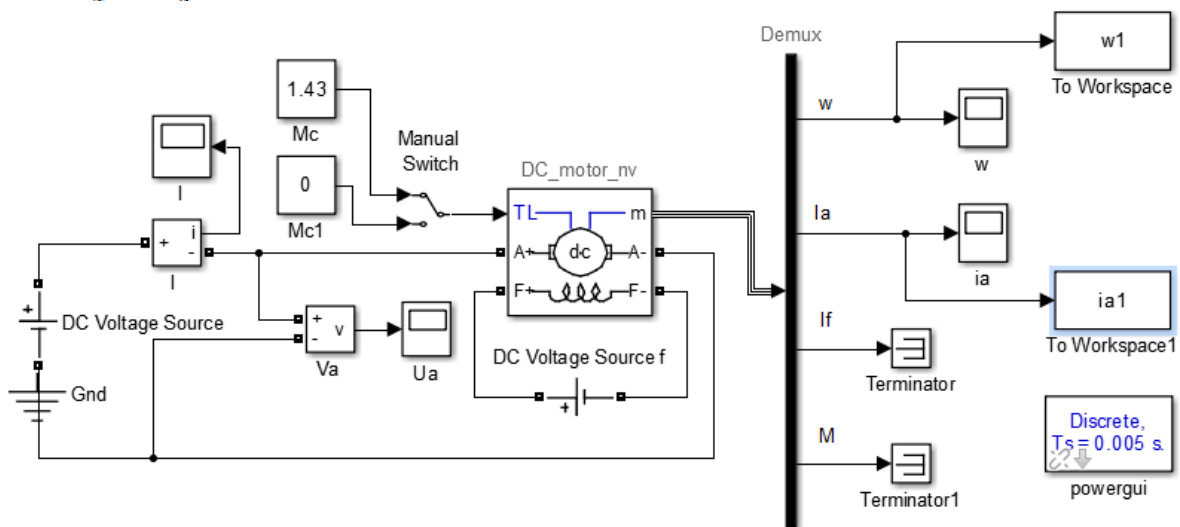
c_ϕ се замества в първото уравнение на (13) и се намира R_a :

$$(16) R_a = U \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 I_2 - \omega_2 I_1};$$

На фиг. 10 е дадена симулационната схема на ДПТНВ в среда на Simulink [4,5]. Параметрите на ДПТНВ са [6,7]: $P_n=0,45\text{kW}$; $U_{закр}=110\text{V}$; $n_n=3000\text{rpm}$; $U_{в\ddot{y}зб}=110\text{V}$, $R_a=0,585\Omega$; $L_a=0,026\text{H}$; $R_f=400\Omega$ и $L_f=156\text{H}$.

Номиналният въртящ момент на двигателя се изчислява по формулата [6]:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{300 P_n}{\pi n_n} = 1,43 \text{ Nm.}$$



Фиг. 10 Симулационната схема на ДПТНВ

Симулацията се извършва първо под товар $M_c=1,43$ Nm, колкото е номиналната мощност на двигателя, а след това на празен ход. Измерените стойности в един и същ момент от началото на пусковия процес под товар (индекс 1) и на празен ход (индекс 2) се заместват в (15) и (16).

В резултат се получават (фиг.11): $c_\phi = 0,3387$ и $R_a=0,5850$ Ω . Изчисленото съпротивление на котвата не се отличава от съпротивлението по каталожни данни.



```
Command Window
>> stat_param_4

cf =

    0.3387

R =

    0.5850
```

Фиг. 11 Определяне на c_ϕ и R_a от модела

АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

Уравнения (15) и (16) са за две стойности на скоростта и две стойности на тока. Те дават възможност да се варира тези две различни стойности и по този начин да се снесе зависимостта на коефициента c_ϕ от товарния ток. При протичане на ток през котвата се създава магнитен поток, който противодейства на възбудителния поток. Ако допълнителните полюси не компенсират това изменение, може да се получи промяна на Φ при различните работни токове. В резултат може да се определи доколко е постоянна стойността c_ϕ . Ако тя е постоянна, механична характеристика ще бъде права линия. Ако c_ϕ се намалява от реакцията на много големия ток при много големи натоварвания – характеристиката ще става все по-мека. Така може да бъде снета реалната крива на машината.

ИЗВОДИ

В заключение може да се обобщи, че са създадени, изследвани и верифицирани методики за идентификация на съпротивлението на котвата и коефициента на електромагнитно взаимодействие при различни режими на регулиране на скоростта на постоянно-токови двигатели. Методиките са проверени с помощта на симулационни модели, реализирани с модула Simulink.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Българанов Л., И. Миленов, Г. Павлов, Ч. Джамбазки, Електрозадвижване, 2009.
- [2] Костадинов П., Определяне на тарировъчната характеристика на двигател за постоянен ток, н. сп. „Механика, Транспорт, Комуникации“, ISSN 1312-3823, т. 18, бр. 3/2, стр. X-17 – X-22, 2020
- [3] Кудашов А. С. Медведева, В. Михотин, С. Пискарев, Matlab в учебных курсов по исследованию переходных процессов в электроэнергетических системах, Пензенский госуниверситет, Пенза, 2009.
- [4] MathWorks, Simulink User's Guide, 2019.
- [5] Krishnan R., Electric Motor Drives, Modeling, Analysis and Control, Pearson Ed., 2003.
- [6] Чернева Г., А. Антонов, Моделиране и симулация на мехатронен модул за регулиране на скоростта на двигател за постоянен ток, Механика, Транспорт, Комуникации, том 17, брой 3, 2019 г.
- [7] www.dynamo-bg.com

IDENTIFICATION OF THE ARMATURE CIRCUIT PARAMETERS AT DIFFERENT MODES OF THE SPEED REGULATION OF DC MOTOR

Vasil Dimitrov, Ludmil Popov

vdimitroff@abv.bg, lucy6@abv.bg

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

Key words: DC electrical drive, motor armature resistance, electromagnetic interaction coefficient

Abstract: Often in the research work or in the activities of repair and commissioning it is necessary to experimentally evaluate some important parameters of a DC electrical drive such as the resistance of the motor armature R_a and the coefficient of electromagnetic interaction c_ϕ . Experimental measurement of the resistance R_a is complex and with many disadvantages: the drive must be subjected to a relatively low supply voltage with the excitation removed or with a locked rotor; a conditional value of the voltage drop in the transition "contact brushes - collector" is accepted, which in the real case may differ, as it depends on the state of the transition; The resistance of the armature R_a can be determined approximately by assuming that at rated load the energy losses in the resistance of the armature winding are nearly half of the total power losses in the motor.

The report proposes another approach for determining the parameters R_a and c_ϕ . This method consists of using objective measurements and guarantees very high accuracy, avoiding the main disadvantages of the classical method. The current in the armature, the angular speed and voltage are measured. Then, from the equation for the equilibrium of the electromotive voltages, the required parameters for the different ways of speed regulation are determined. The performed simulation in Simulink environment verifies the developed methods as much more accurate and fast than the classical ones.