

## ОЦЕНЯВАНЕ НА СКОРОСТТА НА ДВИГАТЕЛ ЗА ПОСТОЯНЕН ТОК С НЕЗАВИСИМО ВЪЗБУЖДАНЕ ПРИ РЕГУЛИРАНЕ НА МАГНИТНИЯ ПОТОК

### ESTIMATE THE SPEED OF SEPARATELY EXCITED DIRECT CURRENT MOTOR TO CONTROL FIELD WEAKENING

**Vladimir Hristov**

*Technical university Sofia, faculty of Automatics, department  
electrical motion automation systems*

#### **Abstract**

*This research considered to question related of estimate the speed of separately excited direct current motor to control magnetic field with weakening. The weakening of the magnetic field of the DC machine has a nonlinear character, which must be consistent with the use of nonlinear observer. Synthesizing an observer with an extended Kalman filter in Simulink and are made simulation studies. Simulation studies were carried out with a 40% reduction in the supply voltage to the exciting coil, respectively, reducing the magnetic field. The model of the dc motor comprises a non-linear relationship between excitation current and magnetic flux, this is accomplished by means of the magnetization curve of the motor. Studies were made and by 20% increase in resistance of anchors and excitation coil. From all simulation studies the mistakes estimated speed during steady state remain below 0.3%*

**Keywords:** separately excited dc motor, extended kalman filter, nonlinear field weakening, speed estimation, control field.

#### **ВЪВЕДЕНИЕ**

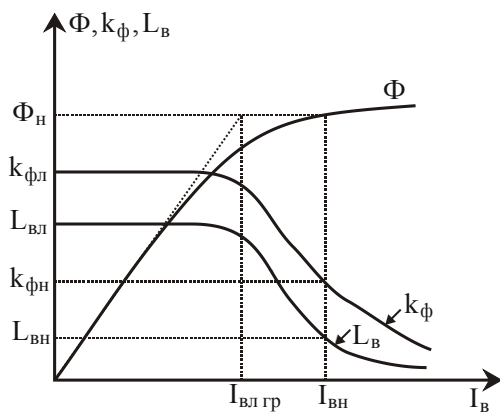
Въпросите свързани с оценяване на параметри и величини в системите за електрозадвижване става все по актуален с навлизане на високопроизводителните микропроцесорни системи. Възможността за оценка на параметри и величини в дадена система за електрозадвижване ще доведе до създаване на безсензорни управляеми електрозадвижвания или системи за мониторинг чрез които да се следи тяхната изправност [4,5,6]. Други мотиви за създаване на такива системи е от една страна намаляване на себестойността на съответното електрозадвижване, а от друга е невъзможността в някой електрозадвижвания да бъдат монтирани датчици за скорост. Използването на измерими електрически величини може да бъде използвано за оценяване на съответния параметър скорост и би създадо възможност за създаване на безсензорни електрозадвижвания използващи различни алгоритми за оценяване [4,7,9]. В литературата съществуват редица наблюдатели за

оценка на съответните величини. Общо взето се делят наблюдатели за линейни системи и наблюдатели за нелинейни системи. Когато система е линейна или нелинейна но линеаризирана в дадена област самите наблюдатели са детерминирани и всички процеси в системата са известни [4,5,8]. Но когато процесите в една система са нелинейни и тази система може да работи в голяма област е добре да се използват нелинейни наблюдатели за да бъдат коректни оценените величини. Една такава нелинейна система представлява регулирането на магнитния поток при двигател за постоянен ток с независимо възбуждане (ДПТ НВ). Ако канала на възбудителната намотка не се използва за управление на двигателя тогава може да се използват линейни наблюдатели (Луенбъргър, стационарен филтър на Калман и други). Ако се използва възбудителната намотка за управление на двигателя, то процесите в котвената намотка ще зависят от нея и имат нелинеен характер, докато при регулиране на канала на

котвената намотка не се променя работата на възбудителната намотка [1,2]. Поради тази особеност интерес представлява изследването на възможностите за създаване на системи за безсензорно оценяване на скоростта на ДПТсНВ при регулиране на магнитния поток. Като наблюдател за оценяване на скоростта се предлага използването на разширен филтър на Калман, който служи за наблюдение на нелинейни обекти.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

При двигателя за постоянен ток с независимо възбуждане (ДПТ с НВ) работещ при номинален режим магнитната верига на двигателя е наситена [1,2]. Възможностите за увеличаване на потока над номиналния са незначителни и реално не представляват интерес, освен това възбудителната намотка на двигателя се изчислява по нагряване за възбудителния ток, който може да осигури номиналния поток. Поради това потокът може да се регулира само в посока намаляване – отслабване на полето на двигателя [1,2], което се вижда и от кривата на намагнитване показана на фиг. 1.



Фиг.1. Крива на намагнитване

При това разглеждане се забелязват два участъка на разглеждане [1]:

-първия, когато е наситена магнитната верига, като в този случай индуктивността  $L_B$  намалява толкова повече колкото, е по голямо насищането:

$$L_e = 2p_n W_e (d\Phi / di_e) \quad (1)$$

-втория, когато е ненаситена магнитната верига (при работа в линейната част на кривата на намагнитване)  $L_B$  се определя с израза:

$$L_e = 2p_n W_e \Phi_n / I_{вл.зр} = 2p_n W_e k_{\phi} = L_{en} = const \quad (2)$$

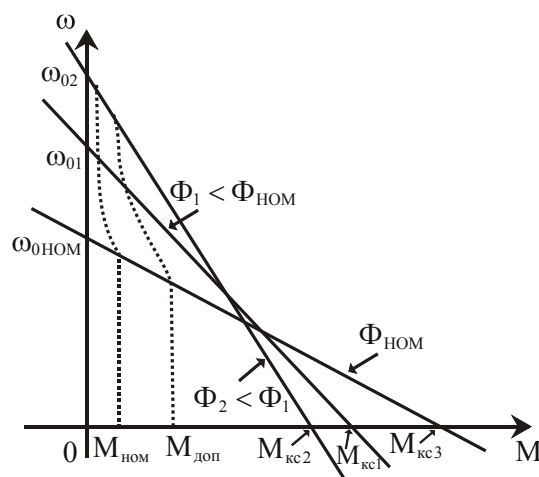
където:

$I_{вл.зр}$  - възбудителен ток, създаващ номинален поток при отсъствие на насищане в магнитната верига

$W_e$  - брой на навивките на възбудителната намотка

$$k_{\phi}(I_e) = \frac{\Phi}{I_e} \quad \text{- коефициент на връзка}$$

между потока и възбудителния ток (като се определя от кривата на намагнитване, при работа в линейната част на кривата на намагнитване  $k_{\phi} = k_{\phi l} = const$ )



Фиг.2. Механични характеристики на ДПТ с НВ при регулиране на потока

Реалните граници на изменение на потока се определят “отгоре” от номиналния поток  $\Phi_{max} = \Phi_{ном}$ , а “отдолу” – от минималния поток  $\Phi_{min}$ , при който влошените условия на комутацията за отслабеното поле остават допустими, а скоростта на двигателя не превишава допустимата по условията на механичната здравина на котвата [1]. Тези фактори ограничават възможния диапазон на регулирането на скоростта за двигателите с нормално изпълнение:  $D = 1.5 - 2$ . Специалните двигатели, изчислени за дълбоко отслабване на полето им, осигуряват диапазон на регулиране  $D = 8$ . Въпреки че при отслабването на полето модулът на твърдостта се намалява, точността за целия диапазон на регулиране остава достатъчно висока [1].

При отслабване на полето регулирането се осъществява с изменящ се поток, което определя принципно друга зависимост на допустимия товар от скоростта [1]. Ако се приеме като критерий за допустим товар котвения ток  $I_{ном}$ , допустимия момент при регулирането се определя от израза

$$M_{дон} = k\Phi I_{ном} \quad (3)$$

което показва, че при отслабване на полето е необходимо да се намалява товарът на вала на двигателя. За пълното използване на двигателя по нагряване регулирането на скоростта чрез отслабване на полето трябва да се осъществява при постоянна мощност на товара.

Отслабването на полето обхваща зоната  $\omega > \omega_{ном}$  и се осъществява при постоянна мощност  $P = P_{ном} = const$  и допустим момент, който се изменя обратно пропорционално на скоростта [1].

Процесите във възбудителната намотка протичат независимо от процесите в котвената верига, докато процесите в котвената верига зависят от изменението на магнитния поток на двигателя. Наличието на допълнителната отрицателна обратна връзка ( $i_e p L_e$ ) води до по бързо нарастване на възбудителния ток и потока при насищане на магнитната система на двигателя [1,2].

В настоящата работа се предлага използването на разширен филтър на Калман за оценка на скоростта на ДПТсНВ при регулиране на магнитния поток. Разширения филтър на Калман е оптимален в смисъл, че минимизира ковариацията на грешката на оценените състояния с отчитане на случайни смущения и грешки в измерванията [4].

Алгоритъма по който функционира разширения филтър на Калман [4,8] включва следната последователност:

- Предсказване на вектора на състоянието;
- Пресмятане на ковариационна оценка на предсказването;
- Пресмятане на коефициента на усилване на Калман;
- Оценяване на вектора състоянието;
- Изчисляване ковариацията на грешката след измерване.

Основните стъпки при проектирането на разширения филтър на Калман [3,4,8] включват: Определяне на математическия модел във временната област; Дискретизация на математическия модел; Изграждане на разширения филтър на Калман; Определяне на ковариационните матрица на шума.

Математическото описание на ДПТсНВ е:

$$\begin{aligned} U_a &= i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E_a \\ E_a &= L_{ae} \cdot i_e \cdot \omega \\ U_e &= i_e \cdot R_e + L_e \frac{di_e}{dt} \\ M - T_L - B &= J \frac{d\omega}{dt} \\ K &= L_{ae} \cdot i_e \\ M &= K i_a \\ B &= \beta \cdot \omega \end{aligned} \quad (4)$$

След преобразуване на уравненията (4) описващи работата на ДПТсНВ се достига до следните уравнения записани във векторно матричен вид.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_e \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K i_e \cdot \omega}{L_a} \\ 0 & \frac{K i_e}{J} & -\frac{\beta}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e} \\ \frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ u_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

Уравнението (5) може да се представи от вида:  $\frac{dx}{dt} = Ax + Bu$ , а за изход на системата  $y = Cx$  може да бъде записано:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_e \\ i_a \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Идеята е да се оцени  $x(t)$ , чрез измерените входове (напреженията на възбудителната и котвената намотка)  $u(t)$  и изходи (котвения и възбудителния ток)  $y(t)$ .

За цифровата реализация на филтъра на Калман, уравненията описващи работата на двигателя се дискретизират с такт на дискретизация  $T$  [4,5,8]:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B u(k) & A_d &\approx I + AT \\ y(k) &= C_d x(k) & B_d &\approx BT \end{aligned} \quad (7)$$

Дискретните уравнения на ДПТсНВ са:

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) = (I + AT)x_{k-1} + BTu_{k-1} \quad (8)$$

$$y_k = h(x_k) = Cx_k$$

Нелинейната функция придобива следния вид:

$$x_k \approx f(\hat{x}_{k-1}) + \frac{\partial f}{\partial x_{k-1}}(x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + W_{k-1} \quad (9)$$

Определянето на ковариационните матрици отразяващи съответно шума на системата  $Q$  и шума от измерването  $R$  са избрани чрез множество итерации докато бъдат постигнати задоволителни резултати [4,9]. Те са причинени вследствие неточности в математическия модел и в измерването. За да бъдат намерени точните матрици е необходимо да се познават стохастичните процеси, които биха възникнали в електрозадвижването.

В случая е достигнато до тези матрици които дават напълно задоволителни резултати от оценяването на скоростта дори при увеличение с 20% на котвеното и възбудителното съпротивление дължащо се на нагряване [3,4].

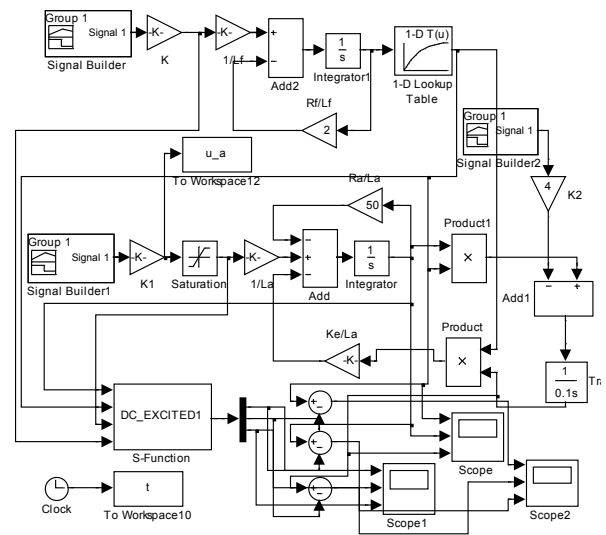
$$Q = \begin{bmatrix} 0.00006 & 0 & 0 \\ 0 & 0.000006 & 0 \\ 0 & 0 & 6000 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.00008 & 0 \\ 0 & 0.00008 \end{bmatrix}$$

Извършени са симулационни изследвания в Симулинк средата на Матлаб, като наблюдателя на скорост на ДПТсНВ е реализиран чрез написването S-функция. За пълнота на симулационните изследвания, доближаващи се максимално близко до реалния физически модел, в симулинк модела на ДПТсНВ е въведена кривата на намагнитване чрез Lookup таблица на съответния двигател. По този начин се отразява нелинейността във възбудителната верига.

Параметрите на използвания двигател за симулации са:  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  ;  $L_a = 0.012\text{H}$  ;  $R_a = 0.6\Omega$  ;  $R_b = 240\Omega$  ;  $L_b = 120\text{H}$  ;  $J = 0.1\text{kg.m}^2.\text{rad}$  ;  $K = 1.8$

На фиг. 3 е показан Симулинк модела

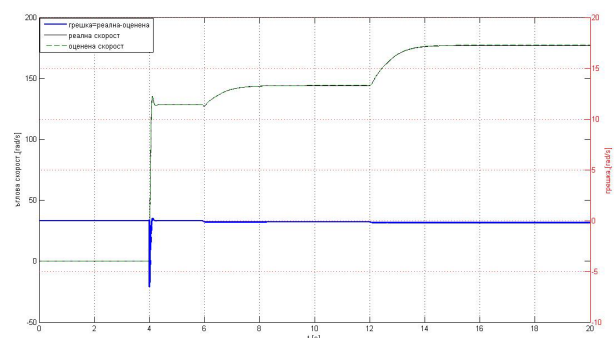


Фиг. 3. Симулинк модела на изследваната система

Симулационните изследвания са направени в средата на Симулинк на Матлаб при следните условия:

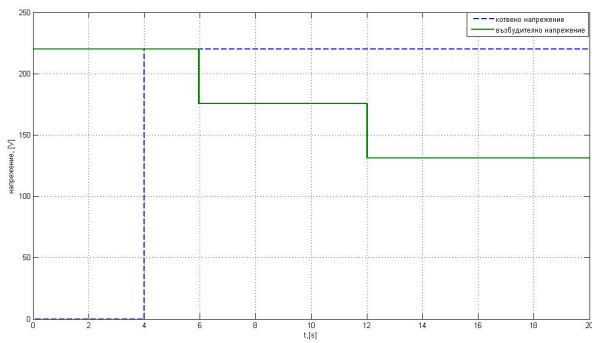
- при постоянно котвено напрежение и променящо се възбудително напрежение по време на симулациите;
- при стойност на съпротивлението на котвата и на възбудителната намотка от каталожни данни при температура  $25^\circ\text{C}$  ;
- при 20% увеличение на стойността на съпротивлението на котвената и възбудителната намотка отговарящо на нагряване с  $71^\circ\text{C}$  .

На фиг. 4 са показани симулационни изследвания на оценената скорост, реалната скорост и грешката между тях.



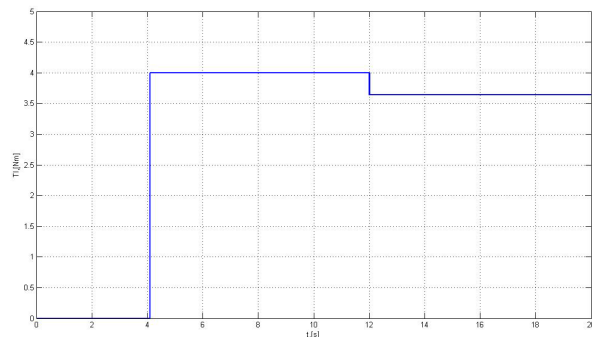
Фиг. 4. Оценената скорост, реалната скорост и грешката между тях

На фиг. 5 са показани симулационни резултати от приложеното котвено и възбудително напрежение.



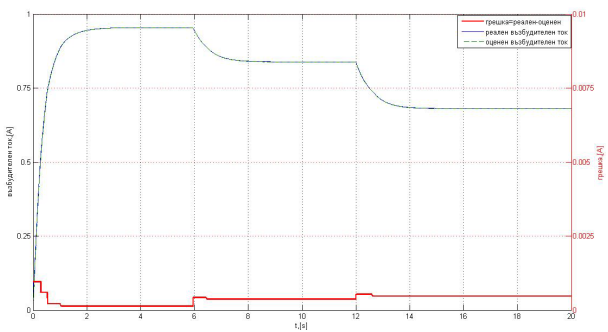
Фиг. 5. Приложеното котвено и възбудително напрежение

На фиг. 6 са показани симулационни резултати на приложения съпротивителен момент.



Фиг. 6. Приложения статичен момент на вала на двигателя

На фиг.7 са показани симулационни резултати на възбудителния ток, оценения възбудителен ток и грешката между тях.



Фиг. 7. Възбудителния ток, оценения възбудителен ток и грешката между тях

Обобщените резултати от направените изследвания са представени в табл. 1 и табл. 2, като при оценяването са приети следните показатели за качество [3]:

$e_{\omega_{\max}}$  -максимална грешка на оценената скорост по време на преходен режим в [%];

$$e_{\omega_{\text{опр}}} = \max \left| \frac{\omega_{\text{изм.}}^{\wedge} - \omega_{\text{оцен.}}}{\omega_{\text{зад.}}} \right| \cdot 100\%$$

$e_{\omega_{\text{уст.}}}$  -максимална грешка на оценената скорост по време на установено състояние в [%];

$$e_{\omega_{\text{уст}}} = \max \left| \frac{\omega_{\text{изм.}}^{\wedge} - \omega_{\text{оцен.}}}{\omega_{\text{зад.}}} \right| \cdot 100\%$$

Табл. 1 Обоб. симулационни резултати

| $R_a = R_a(25^{\circ}\text{C})$                       | $e_{\omega_{\text{опр}}}$ | $e_{\omega_{\text{уст}}}$ |
|---|---------------------------|---------------------------|
| $R_{\text{въз}} = R_{\text{въз}}(25^{\circ}\text{C})$ | [%]                       | [%]                       |
| $U_{\text{въз}} = U_{\text{ном}}$                     | 0.2                       | 0.01                      |
| $U_{\text{въз}} = 0.8 * U_{\text{ном}}$               | 0.11                      | 0.09                      |
| $U_{\text{въз}} = 0.6 * U_{\text{ном}}$               | 0.11                      | 0.1                       |

Табл.2 Обоб. симулационни резултати

| $R_a = 1.2 * R_a(25^{\circ}\text{C})$                       | $e_{\omega_{\text{опр}}}$ | $e_{\omega_{\text{уст}}}$ |
|---|---------------------------|---------------------------|
| $R_{\text{въз}} = 1.2 * R_{\text{въз}}(25^{\circ}\text{C})$ | [%]                       | [%]                       |
| $U_{\text{въз}} = U_{\text{ном}}$                           | 0.7                       | 0.03                      |
| $U_{\text{въз}} = 0.8 * U_{\text{ном}}$                     | 0.36                      | 0.25                      |
| $U_{\text{въз}} = 0.6 * U_{\text{ном}}$                     | 0.46                      | 0.3                       |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От обобщените симулационни резултати в табл.1 могат да бъдат направени следни заключения: Грешката на оценената скорост в установен режим на скоростта при номинално захранване на котвената намотка и номинално захранване на възбудителната намотка е 0.01%. Грешката на оценената скорост по време на преходния процес е в размер на 0.2%. При регулиране на възбудителното напрежение в посока намаляване грешката на оценената скорост расте и при  $U_{\text{въз}} = 0.8 * U_{\text{ном}}$  грешката по време на установено състояние е 0.09%, а при  $U_{\text{въз}} = 0.6 * U_{\text{ном}}$  същата грешка е 0.1%. Грешките на оценената скорост по време на установено състояние остава под 0.1% което е една сравнително добра точност при

една система за електрозадвигване. Грешката на оценената скорост по време на преходен процес при  $U_{\text{въз}} = 0.6 * U_{\text{ном}}$  и  $U_{\text{въз}} = 0.8 * U_{\text{ном}}$  е 0.11%.

При увеличение с 20% на съпротивлението на котвената и възбудителната намотка отговарящо на нагряване с 71°C, грешката на оценената скорост по време на установено състояние спрямо същата при липса на увеличение на съпротивленията в целия диапазон се увеличила приблизително 3 пъти. Независимо от това увеличение тя остава под 0.3% при най-ниското изследвано възбудително напрежение. Увеличението на грешката на оценената скорост от увеличението на температурата се дължи от неточното задаване на ковариационната матрица Q отразяващи шума от системата. Грешката на оценената скорост по време на преходно режим също се е увеличила приблизително 3.5 пъти в целия диапазон. Независимо от това остава в рамките под 0.7%.

Симулационните изследвания с разширеният филтър на Калман дава оценка на скоростта на ДПТсНВ при регулирането на магнитния поток под 0.7%, като тази грешка може да се намали чрез задаване на точни ковариационни матрици Q и R.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Ключев, В.И. 1989. „Теория на електрозадвигването“, Техника, превод Стефан Пандуров.

- [2] Ильинский Н.Ф. 2003. „Основы электропривода, Издательство“ МЭИ, 221 с.
- [3] Христов Вл., (2015), „Наблюдател на скорост и позиция при безчетков двигател за постоянен ток”, 2015, сборник доклади от годишната университетска научна конференция с международно участие -, „Национален Военен университет Васил Левски“, ISSN1314-1937.
- [4] Йончев, Е.. “Безсензорно управляеми асинхронни електрозадвигвания“ -дисертация, 2010, ТУ-СОФИЯ.
- [5] Ellis G., Corporation D., “Observers in control systems a practical guide”, Academic press Elsevier Science (USA), 2007.
- [6] Hadeif M., Rachid M., ”Parameter identification of a separately excited dc motor via inverse problem methodology”
- [7] Khalaf S., ”Optimal gain kalman filter design with dc motor speed controlled parameters” Journal of Asian Scientific Research, 2013, 3(12):1157-1172
- [8] Jared Barber ”Kalman filtering techniques for parameter estimation” Department of Mathematics, University of Pittsburgh Work with Ivan Yotov and Mark Tronzo March 17, 2011.
- [9] Yadav B., Salunke S., Sharma A., “Nonlinear Adaptive Speed and Flux Estimator for Three Phase Induction Machine”, Journal of Engineering Computers & Applied Sciences (JECAS) ISSN No: 2319-5606 Volume 3, No.4, April 2014.
- [10] Zribi M., Al-Zame A., “Field-Weakening Nonlinear Control of a Separately Excited DC Motor” Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2007, Article ID 58410, 22 pages.