

FRI-10.326-1-EEEE-03

---

SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR <sup>3</sup>

---

**Assist. Prof. Nikolay Valov, PhD**

Department of Automatics and Electronics,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
phone: 082 888 253  
e-mail: npvalov@uni-ruse.bg

**Assoc. Prof. Donka Ivanova, PhD**

Department of Automatics and Electronics,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
phone: 082 888 266  
e-mail: divanova@uni-ruse.bg

**Assist. Prof. Martin Dejanov, PhD**

Department of Automatics and Electronics,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
phone: 082 888 678  
e-mail: mdejanov@uni-ruse.bg

***Abstract:** Brushless DC motors (BLDC) are a more recent addition to the industry compared to traditional DC and induction motors. They offer several advantages such as high starting torque, improved efficiency, high torque output, and reduced electrical noise. As their usage becomes more prevalent, the demand for effective control systems grows. This paper investigates a BLDC motor's speed control, where different control strategies are implemented. The simulation is conducted using a MATLAB/Simulink environment and different load torque conditions are evaluated.*

***Keywords:** Brushless DC motor, PID Controller, MATLAB\SIMULINK.*

## **ВЪВЕДЕНИЕ**

Безчетковият постояннотоков двигател (BLDC) решава много от проблемите на традиционните постояннотокови двигатели, като използва електронна комутация за управление. Благодарение на високата си ефективност, по-ниската чувствителност към механично износване, ниския шум и компактните размери, този тип двигател е широко разпространен в индустрията. Той се отличава с широк скоростен диапазон, лесна поддръжка, дълъг живот, липса на искри и висока надеждност. Управлението на BLDC двигателите е от съществено значение в много индустриални приложения, като за управление на скоростта най-често се използват непрекъснати или дискретни ПИД регулатори и размити ПИД регулатори (Angeti, J. & al., 2019; Do Chi Thanh & Dang Ngoc Huy, 2024; Nameed, Nayder Salim, 2018). В настоящата статия се разглежда управлението на скоростта на безчетков постояннотоков двигател. Синтезирани са различни закони за управление – П, ПИ и ПИД, и са симулирани с помощта на MATLAB/Simulink. Оценяват се динамичните характеристики на двигателя при работа по зададена стойност и при натоварване.

## **ИЗЛОЖЕНИЕ**

### **Математичен модел на безчетков постояннотоков двигател**

---

<sup>3</sup> Докладът е представен на 25 октомври 2024 г. в секция „Електротехника, електроника и автоматика“ с оригинално заглавие на български език: УПРАВЛЕНИЕ НА БЕЗЧЕТКОВ ПОСТОЯННОТОКОВ ДВИГАТЕЛ

Моделирането на безчетковия постояннотоков двигател може да се направи аналогично на това при трифазната синхронна машина (Jayesh Tripathi & al., 2022; Meng, Z. & al., 2010). Поради наличието на постоянен магнит на ротора, някои от динамичните му характеристики се различават. В рамките на статията ще се разгледа случаят с цилиндричен ротор и трифазна намотка на статора (фази а, б и с). Роторът е с постоянен магнит, което осигурява равномерна въздушна междина, а статорът е оборудван с трифазна намотка със звездообразно свързване. Уравненията на фазите а, б и с имат следния вид:

$$\begin{aligned} V_{an} &= R_s + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_a \\ V_{bn} &= R_s + L \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + e_b \\ V_{cn} &= R_s + L \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + e_c, \end{aligned} \quad (1)$$

където  $L$  е самоиндуктивността на арматурата [ $H$ ];

$M$  - взаимната индуктивност на арматурата [ $H$ ];

$R_s$  - съпротивлението на арматурата [ $\Omega$ ];

$V_{an}, V_{bn}$  и  $V_{cn}$  са фазовите напрежения [ $V$ ];

$i_a, i_b$  и  $i_c$  – фазовите токове на двигателя [ $A$ ];

$e_a, e_b$  и  $e_c$  – обратните ЕДН за всяка отделна фаза [ $V$ ].

В безчетковия постояннотоков двигател обратното електродвижещо напрежение (ЕДН) зависи от позицията на ротора, като фазовото изместване между трите фази е на 120 градуса. Това означава, че уравнението за всяка фаза ще отразява тази фазова разлика, като описва как обратното ЕДН във всяка фаза се променя в зависимост от позицията на ротора. Така уравнението за всяка фаза трябва да отчита, както фазовото изместване, така и нейното влияние върху генерираното напрежение. Уравненията на всяка от фазите в матричен вид са представени както следва:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + (L - M) \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} &= \left\{ \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} (L - M) \end{aligned} \quad (2)$$

Решението на уравнение (2) представя стойностите на променливите на състоянието  $i_a, i_b$  и  $i_c$ , а параметрите  $e_a, e_b, e_c$  имат следния вид:  $e_a = K_a f_a(\theta) \omega_r, e_b = K_b f_b\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \omega_r, e_c = K_c f_c\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \omega_r$ , Стойността на общия електромагнитен момент се извежда по следния начин:

$$\begin{aligned} e_a &= K_a \omega_r \\ T_e &= \frac{P_m}{\omega_{rm}} = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) P}{2} \\ T_e &= \frac{P(K_a i_a + K_b i_b + K_c i_c)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Уравненията, описващи механичната част имат следния вид:

$$T_e - T_L = \frac{Jd\omega_{rm}}{dt} + B\omega_{rm}$$

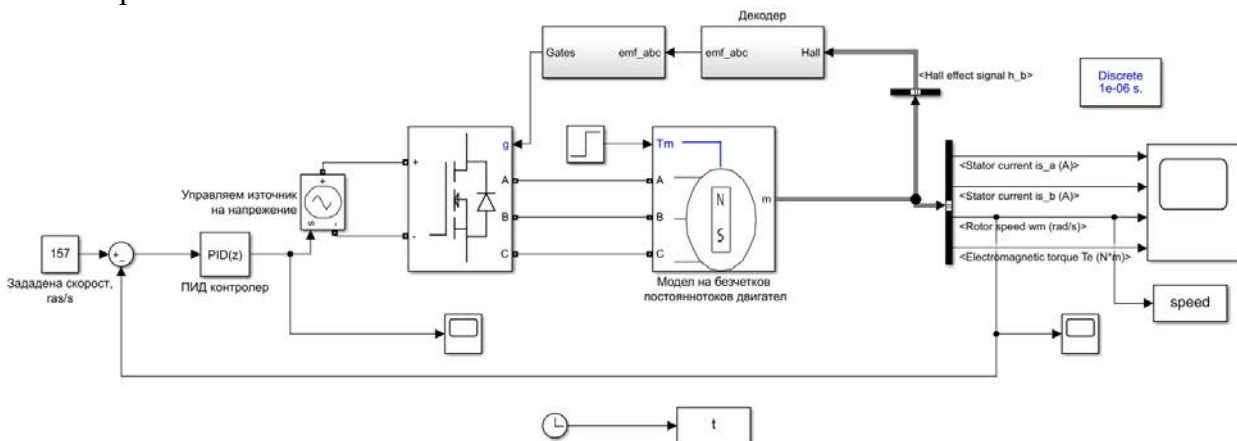
$$\frac{Jd\omega_r}{\frac{P}{2}dt} + \frac{B\omega_r}{\frac{P}{2}} + T_L = T_e \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} \left( T_e - T_L - \frac{2B}{P} \omega_r \right)$$

Математичният модел на безчетковия постоянен ток двигател е заложен в готов блок в рамките на Matlab\Simulink, който ще бъде използван при симулация на системата.

### Разработване на модел на система за управление на безчетков постоянен ток двигател

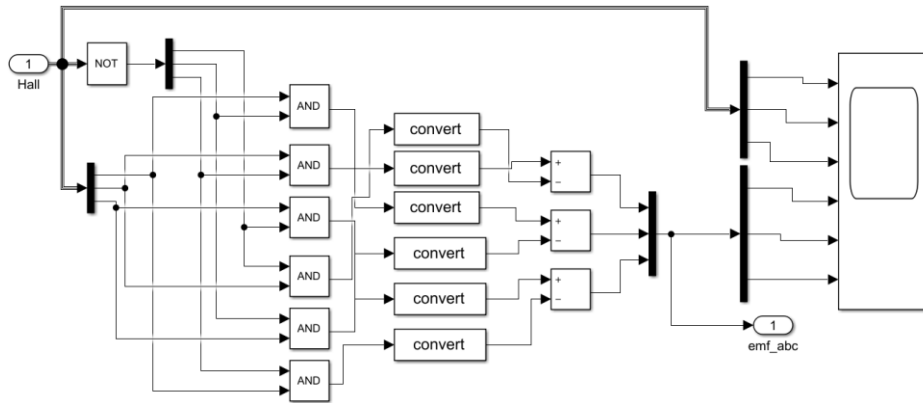
При управлението на скоростта на безчетков постоянен ток двигател се използват два контура за управление. Вътрешният контур е за синхронизиране на импулсите на гейта на инвертора с електродвижещото напрежение, а вторият контур се използва за управление на скоростта (Purnalal, M. & Sunil Kumar, T. K., 2015). В рамките на разработваната система, управлението на скоростта се симулира използвайки разработен симулационен модел, представен на фиг. 1. Моделът се състои от ПИД блок, блок за описание на безчетковия постоянен ток двигател, инвертор на напрежение, декодираща схема и модел на сензор на Хол.



Фиг. 1. Симулационен модел на система за управление на безчетков постоянен ток двигател

За описание на модела на двигателя, параметрите на безчетковия постоянен ток двигател са взимани от (Purnalal, M. & Sunil Kumar, T. K., 2015), като са използвани следните коефициенти: съпротивление на статора  $R_s = 0.7 \text{ ohm}$ ; фазова индуктивност на статора  $L_s = 0.00272 \text{ H}$ ; обратната електродвижеща сила е на  $120^\circ$  разстояние една от друга; инерционната константа  $J_m = 0.0008 \text{ kg.m}^2$ , константа на триене  $\beta = 0.001 \text{ N.m.s}$ . Номиналното напрежение на двигателя е  $U_n = 160 \text{ V}$ .

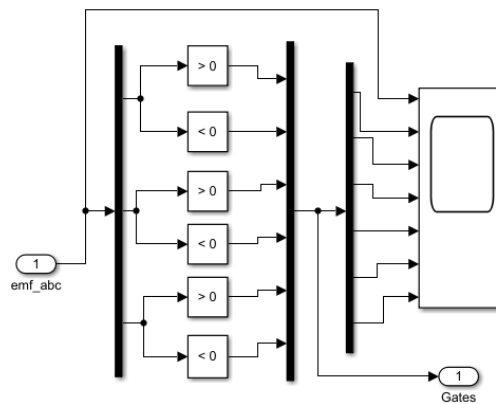
За да се генерира трапецовиден характер на обратното ЕДН от сензора на Хол, е реализиран моделът на декодер, представен на фиг. 2. Логическата последователност на работа на декодера е съгласно Таблица 1. За синхронизиране на импулсите на гейта на инвертора и обратното ЕДН е реализиран модел, представен на фиг.3. Управлението на ключовете на инвертора се осъществява посредством логическата последователност, както е представено в Таблица 2.



Фиг. 2. Декодер за получаване на трапецовиден сигнал

Таблица 1: Таблица на истинност на обратното ЕДН измерено посредством сензор на Хол

$H_a$	$H_b$	$H_c$	$E_a$	$E_b$	$E_c$
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0



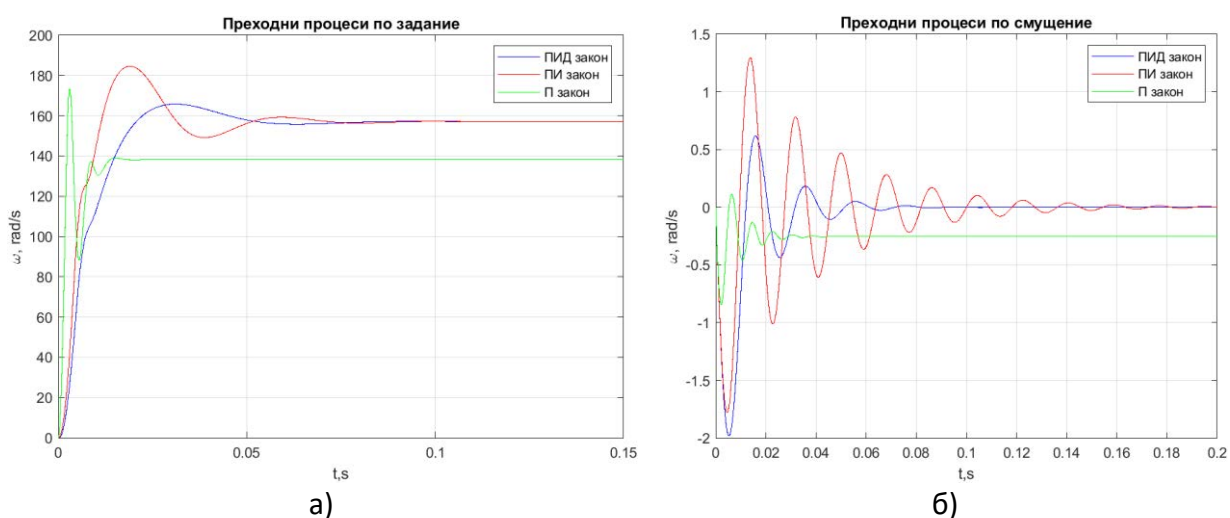
Фиг. 3. Синхронизиране на гейта с обратното ЕДН

Таблица 2. Логическа последователност за управление на гейта

$E_a$	$E_b$	$E_c$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

### Синтез на регулатор за управление на скоростта на безчетков постоянен ток двигател

При разработката на регулатор за управление на безчетков постоянен ток двигател е извършено моделиране на системата в MATLAB. Системата е идентифицирана с помощта на вградените в софтуера методи. Първоначално е анализирано поведението на двигателя и е определена предавателната функция на обекта за управление. След това, използвайки възможността за автоматична настройка в средата на MATLAB, са установени параметрите на трите вида регулатори: П, ПИ и ПИД. Преходните процеси в системата са изследвани, както по задание, така и по смущение. Параметрите за настройка на регулаторите са: за П –  $K_p = 4.25$ , за ПИ –  $K_p = 0.443$ ,  $T_I = 186.5$  и за ПИД –  $K_p = 0.331$ ,  $T_I = 90.35$ ,  $T_D = -6.43$ , като е добавен филтър за диференциалната компонента. Преходните процеси на двигателя при зададена скорост  $\omega = 157 \text{ rad/s}$  са представени на фиг. 4а, а при смущаващо въздействие  $T_m = 0.5 \text{ Nm}$  на фиг. 4б. Показателите на качеството на преходните процеси:  $t_p$  - време за установяване на преходния процес,  $\sigma$  - пререгулиране и  $y_{max}$  - максимално динамично отклонение са представени в Таблица 3.



Фиг. 4. Преходни процеси а) по задание б) по смущение за трите типа закони П, ПИ и ПИД

Таблица 3. Показатели на качество на преходния процес по задание

Закон за регулиране	$t_p, s$	$\sigma, \%$	$y_{max}, \text{rad/s}$
П	0.012	25.5	16.4
ПИ	0.047	17.5	27.5
ПИД	0.044	5.58	8

При система по смущение са определени следните параметри за времетраенето на преходния процес: за П закон  $t_p = 0.031s$ , за ПИ закон  $t_p = 0.14s$  и за ПИД  $t_p = 0.057s$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представена схема за управление на скоростта на безчетков постоянен ток двигател, използвайки три различни типа регулатори. Преходните процеси показват добри показатели на качеството, както при празен ход, така и при наличие на товар в системата. От трите регулатора, при скорост от  $157 \text{ rad/s}$ , ПИД регулаторът се представя

най-добре с време за установяване от 0.044s, динамично отклонение от 8rad/s и пререгулиране около 6%. При управление на системата под товар смущенията се компенсират ефективно, като разколебаването е около 2rad/s, а времето за установяване е приблизително 0.06s. Единствено при ПИ регулатора се наблюдава по-голямо разколебаване и по-дълго времетраене на процеса. В заключение може да се каже, че ПИД регулаторът се доказва като най-ефективният от трите изследвани регулатора при управление на скоростта на безчетков постоянноотоков двигател. Той осигурява бързо време за установяване, малко динамично отклонение и малко пререгулиране, което го прави подходящ за приложения с високи изисквания към точност и бързина на управление.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Докладът отразява резултати от работата по проект No 24-ФЕЕА-05, финансиран от фонд „Научни изследвания“ на Русенския университет.

### REFERENCES

- Angeti, J., Kadalla, A. S., Dubukumah, G., & Zirata, B. K., (2019). Speed Control of BLDC Motor using Fuzzy Tuned PID Controller. *Communications on Applied Electronics*. 7, 29 (Jun 2019), pp.6-12. DOI: 10.5120/cae2019652825.
- Do Chi Thanh, Dang Ngoc Huy, (2024). Speed Control of BLDC Motor Using PI Controller in MATLAB Simulink, *J. Electrical Systems* 20-9s, pp. 1125-1131.
- Hameed, Hayder Salim, (2018). Brushless DC Motor Controller Design Using Matlab Applications. 1-st International Scientific Conference of Engineering Science - 3-rd Scinetic Conference of Engineering Science (ISCES), pp. 44-49.
- Jayesh Tripathi, Krishna Sharma & J. N. Rai (2022). Speed Control Analysis of Brushless DC Motor Using PI, PID and Fuzzy-PI Controllers, *International Journals of Electrical and Electronics Research (IJEER)*, Volume 10, Issue 3, pp. 470-474, e-ISSN:2347-470X.
- Meng, Z., Chen, R., Sun C. & An, Y. (2010). The mathematical simulation model of brushless DC motor system. *International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, Taiyuan, 2010, pp. V12-625-V12-629, doi: 10.1109/ICCASM.2010.5622430.
- Purnalal1, M. & Sunil Kumar, T. K. (2015). Development of mathematical model and speed control of BLDC motor. *International Journal of Electrical and Electronics Engineers (IJEER)*, Volume 07, Issue 01, Jan- June 2015, ISSN(O)-2321-2055.