



ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕЖИМИ НА СПИРАНЕ НА АСИНХРОННИ ЗАДВИЖВАНИЯ С ИНЖЕКТИРАНЕ НА ПОСТОЯНЕН ТОК

BRAKING BEHAVIOR INVESTIGATION OF INDUCTION DRIVE BY DIRECT CURRENT INJECTION

Юлия Джагарова

Технически университет - Варна

Ивайло Генчев*

Технически университет - Габрово

Статията е постъпила на 18 май 2016 г.; приета за отпечатване на 28 ноември 2016 г.

Abstract

The most common braking method used in variable-frequency drive is by injecting direct current. A mathematical model of induction motor direct torque control is suggested, in which two sources of DC voltage are put into effect. The model is realized in Matlab. Braking modes during different voltage parameters are simulated. The achieved results from the experiment are analyzed - they show the efficiency of the braking method.

Keywords: braking of induction motor, direct current injection, mathematical model, braking behavior effectiveness

ВЪВЕДЕНИЕ

Спирачните режими на асинхронните двигатели се осъществяват чрез механични или електромагнитни спирачки, или тяхна комбинация. При съвременните честотно управляеми електрозадвигвания се използват различни методи за спиране: с противоток, с инжектиране на постоянен ток, динамично, с рекуперация, с регулиране на честотата.

Обикновено при честотно управляемите асинхронни задвигвания се използва спиране чрез инжектиране на постоянен ток за задържане в неподвижно състояние. Наистина, по този начин няма да се замести механичната спирачка при повдигащи механизми. При хоризонтални движения спирането е достатъчно добро за задържане на механичната система за кратко. Трябва да се има предвид, че асинхронните двигатели без принудително охлаждане ще се загреят.

Този метод за спиране се използва и за повдигащи механизми, да осигури необходимото намагнитване преди да се включи механичната спирачка. Без пренамагнитване на двигателя остатъчният поток може да доведе до недостатъчен момент и роторът няма да последва веднага „новия поток“. Това може да предизвика падане на товара при повдигане при отворена механична спирачка. Използването на инжектиране на постоянен ток ще позволи на честотното задвигване да знае какъв е текущият поток на двигателя в началото на създаване на момент чрез въвеждане на честота в статора.

В [1] е предложен метод за спиране без допълнителни елементи, при който спирачната енергия се абсорбира от кинетичната енергия на задвигването в приложената втора честота, индуцираща загуби в двигателя. В [2] са анализирани различните методи за спиране на асинхронни задвигвания и е предложено използването на комбинации от два и повече метода за ускоряване на

процеса на спиране. Анализирани са различни последователности на използваните методи, като са оценени техните характеристики и ефективност. В [3] е предложен спирачен метод, постигащ режим на голямо хлъзгане между въртящия двигател и изходната честота на инвертора. Токът на двигателя при спиране се управлява чрез модифицирани образци на U/f . В [4] е използван методът за оптимизация на рояк частици за определяне на оптимални стойности на захранващото напрежение и честота при спиране на двигателя, който минимизира загубите при спиране. Този метод е особено подходящ за електрозадвигвания с чести спираня. В [5] е предложен метод за спиране чрез дискретно управление на честотата, при който инверторът на ток ограничава токовете. Дискретните честоти са субхармонични на честотата на мрежата: 12.5Hz, 16.66Hz, 25Hz, постигайки обратно отношение честота-момент, чрез които се управлява скоростта на двигателя. Ефективно спиране може да се получи на четири стъпки с помощта на електронно превключване на веригата [6]. Отначало се присъединява кондензатор между две от фазите, осигурявайки еднофазно самовъзбуждане. След определен спад на скоростта се добавя втори кондензатор към същите фази за поддръжка на самовъзбуждането и понататъшно намаляване на скоростта. В третия етап магнитното спиране се извършва чрез закъсяване на третата фаза. Накрая двигателят се спира чрез инжектиране на постоянен ток.

Моделирането на режимите на спиране на асинхронно задвигване позволява, да се получат характеристиките на преходните режими, с помощта на които могат да се изберат методът, алгоритъмът на управление и техническата реализация на контролера, осъществяващ спирането.

*E-mail:pewtko@mail.bg

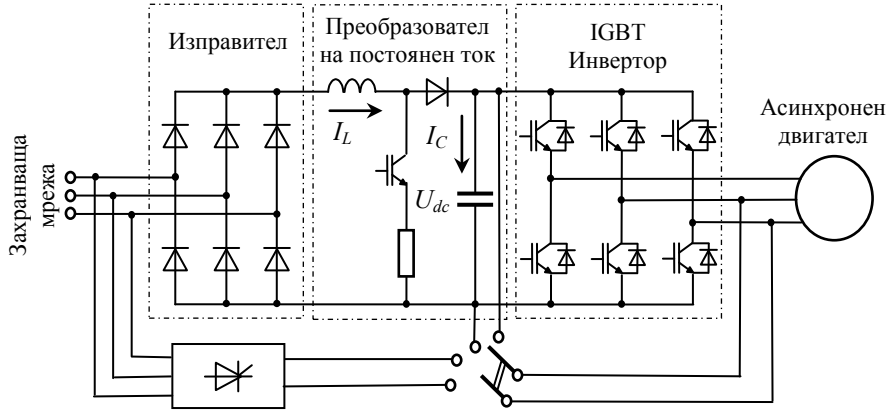
В статията с помощта на математическо моделиране се изследват режимите на спиране на асинхронно задвижване чрез инжектиране на постоянен ток. Изследвани са два източника на постоянен ток – от изправител, а също така се използва кондензаторът, намиращ се на постояннотоковата страна на преобразователя на честота.

където:

$$M_D = x_{ad} \cdot (i_{rd} \cdot i_q - i_{rq} \cdot i_d) - \text{електромагнитния момент на АД};$$

$$M_C = k_c \cdot \omega_r^2 - \text{съпротивителния момент на вала на двигателя};$$

$$T_M - \text{механичната времеконстанта на механизма и АД}; \quad (2)$$



Фиг.1. Схема на изследваното електрозадвижване

МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ

На фиг.1 е показана схемата на изследваното електрозадвижване. Преобразователят на честота се състои от неуправляем изправител, преобразовател на постоянен ток и IGBT инвертор. Показани са и двата варианта на инжектиране на постоянен ток – чрез изправител и чрез кондензатора на постояннотоковата страна. Асинхронният двигател е тип DM11-17-2; $n=2850$ об/мин; $U = 3 \times 400$ V; $I = 11$ A; $\cos\phi = 0,83$ със следните параметри: $U_{DC}=600$ V, $R_s=1,35\Omega$, $L_s=0,287$ H, $R_r=1,28\Omega$, $L_r=0,287$ H, $L_m=0,280$ H, $J=0,0109$ kg.m², двойки полюси $p=1$.

Математическият модел е съставен с помощта на безитеративен метод за изчисление на електромеханични процеси в електроенергийни системи (ЕЕС) [7,8,9]. Елементите на ЕЕС (генератори, двигатели, преобразователи, статични товари) се записват в каноничната форма на Коши по отношение на токовете им. С помощта на уравненията на разпределителната мрежа се изчисляват напреженията във възлите на ЕЕС. При това се изключват производните на токовете и по този начин се получава безитеративен алгоритъм за изчисление.

Модел на асинхронния двигател (1)

$$\frac{d}{dt} i_d = -a_{11} \cdot i_d + (\omega_k + a_{12} \cdot \omega_r) \cdot i_q - a_{13} \cdot i_{rd} + a_{14} \cdot \omega_r \cdot i_{rq} + b_{11} \cdot u_d;$$

$$\frac{d}{dt} i_q = -(\omega_k + a_{12} \cdot \omega_r) \cdot i_d - a_{11} \cdot i_q - a_{14} \cdot \omega_r \cdot i_{rd} + a_{13} \cdot i_{rq} + b_{11} \cdot u_q;$$

$$\frac{d}{dt} i_{rd} = a_{31} \cdot i_d - a_{32} \cdot \omega_r \cdot i_q - a_{33} \cdot i_{rd} + (\omega_k - a_{34} \cdot \omega_r) \cdot i_{rq} - b_{13} \cdot u_d;$$

$$\frac{d}{dt} i_{rq} = a_{32} \cdot \omega_r \cdot i_d + a_{31} \cdot i_q - (\omega_k - a_{34} \cdot \omega_r) \cdot i_{rd} - a_{33} \cdot i_{rq} - b_{13} \cdot u_q;$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = a_{41} \cdot M_D - a_{41} \cdot M_C;$$

$$x_d' = x_s - \frac{x_{ad}^2}{x_r}; b_{11} = \frac{1}{x_d}; b_{13} = \frac{x_{ad}}{x_r \cdot x_d}; a_{11} = r_s \cdot b_{11}; a_{12} = x_{ad} \cdot b_{13};$$

$$a_{13} = r_r \cdot b_{13}; a_{14} = x_{ad} \cdot b_{11}; a_{31} = r_s \cdot b_{13}; a_{32} = x_s \cdot b_{13}; a_{33} = r_r \cdot b_{33};$$

$$a_{34} = x_s \cdot b_{11}; a_{41} = \frac{1}{T_M};$$

r_s - активно съпротивление на статора; x_s - реактивно съпротивление на статора; x_{ad} - взаимна индуктивност; r_r - активно съпротивление на ротора; x_r - реактивно съпротивление на ротора;

Моделът на асинхронния двигател (1) в матрична форма:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}_D = \begin{bmatrix} A_{ss} & A_{sr} \\ A_{rs} & A_{rr} \end{bmatrix}_D \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}_D + \begin{bmatrix} B_{ss} \\ B_{rs} \end{bmatrix}_D \cdot U_s =$$

$$= \begin{bmatrix} H_s \\ H_r \end{bmatrix}_D + \begin{bmatrix} B_{ss} \\ B_{rs} \end{bmatrix}_D \cdot U_s; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{T_M} (M_D - M_C);$$

където с индекс S се означават статорните параметри и променливи, а с индекс r - роторните; елементите на матриците и векторите A и B са функции на статорните и роторните активни и индуктивни съпротивления на двигателя и на ъгловите скорости на въртене на координатната система $d, q, 0$ - ω_k и на двигателя - ω_r ; U_s - вектор на статорното напрежение на двигателя; съпротивителен механичен момент на вала на двигателя $M_C = k \cdot \omega_r^2$;

$$I_s^D = \begin{bmatrix} i_d^D \\ i_q^D \end{bmatrix}; H_s^D = \begin{bmatrix} h_d^D \\ h_q^D \end{bmatrix}; B_{ss}^D = \begin{bmatrix} b_{11}^D & 0 \\ 0 & b_{22}^D \end{bmatrix}.$$

Математически модел на преобразователя на честота

Математическият модел е съставен с помощта на [10,11].

Математически модел на диодния изправител

Електронният преобразовател е система с променлива структура (топология), тъй като включването и изключването на вентилите я променят. За моделирането на вентилите се използват така наречените превключващи функции: (4)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} - \frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{U_{dc}}{L} \begin{bmatrix} (2S_a - S_b - S_c)/3 \\ (2S_b - S_c - S_a)/3 \\ (2S_c - S_a - S_b)/3 \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{abc} = \frac{1}{L} \mathbf{U}_{abc} - \frac{R}{L} \mathbf{I}_{abc} - \frac{U_{dc}}{L} \mathbf{S}$$

където: \mathbf{U}_{abc} , \mathbf{I}_{abc} - вектори на статорното напрежение и ток; \mathbf{S} - вектор на превключващите функции, елементите на който приемат стойност 1 или 0, съответстваща на проводящото или запушеното състояние на вентилите; U_{dc} - изходното напрежение на изправителя; R, L - активно и реактивно съпротивление на изправителя.

След преобразуване към оси $d, q, 0$ системата уравнения ще приеме следния вид:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{I}_{dq} = \frac{1}{L} \mathbf{U}_{dq} - \frac{R}{L} \mathbf{I}_{dq} - \frac{U_R}{L} \mathbf{P} \mathbf{S} - \mathbf{W} \mathbf{I}_{dq} \quad (5)$$

където: \mathbf{P} - матрица на правото преобразуване на Парк.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_k \\ \omega_k & 0 \end{bmatrix}$$

Модел на преобразователя на постоянен ток

Напрежението на кондензатора се изчислява чрез следното уравнение:

$$\frac{d}{dt} U_{dc} = \frac{S_{dc} \cdot I_C}{C}; \quad (6)$$

където: S_{dc} е превключващата функция на преобразователя, имаща две нива и управляваща състоянието на транзистора на преобразователя – 1 за проводящо и 0 – за запушено състояние; $I_C = I_R - I_I$.

Математически модел на инвертора

Уравненията за изходното напрежение на инвертора:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{1a} \cdot S_{2a} \\ S_{1b} \cdot S_{2b} \\ S_{1c} \cdot S_{2c} \end{bmatrix} U_{dc}^M \quad (7)$$

където: S_{kj} - превключващи функции, приемащи стойности 1 или 0 в зависимост от състоянието на вентилите (отпушено, запушено); k - име на рамото (a, b, c); j - номер на вентила в рамото ($j = 1, 2$).

Токът на постояннотоковата страна:

$$I_I = S_{1a} \cdot S_{2a} \cdot i_a + S_{1b} \cdot S_{2b} \cdot i_b + S_{1c} \cdot S_{2c} \cdot i_c \quad (8)$$

Изходното напрежение на инвертора в осите $d, q, 0$:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_k & \cos(\theta_k - 120^\circ) & \cos(\theta_k + 120^\circ) \\ \sin \theta_k & \sin(\theta_k - 120^\circ) & \sin(\theta_k + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} =$$

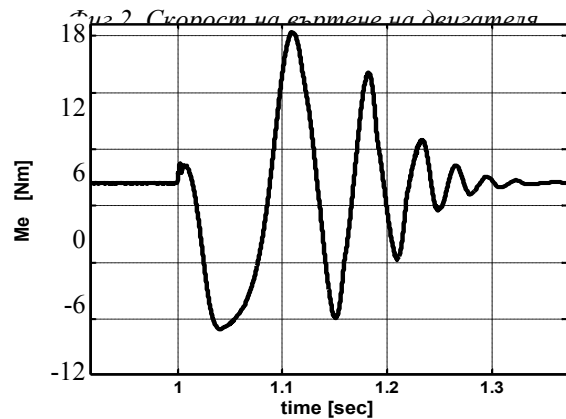
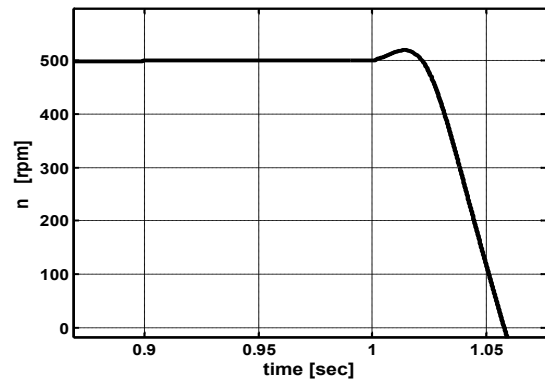
$$= \mathbf{U}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{U}_{dq0} \quad (9)$$

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

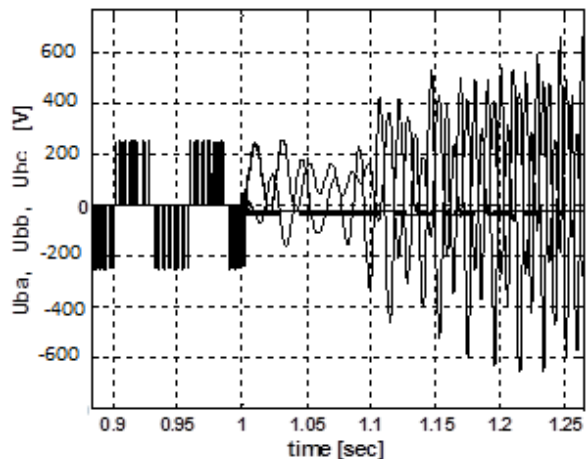
Съставеният математически модел на асинхронното задвижване бе реализиран в програмна среда Matlab, като бе използван метод за управление чрез пряко регулиране на въртящия момент на двигателя. Бяха симулирани няколко режима на спиране на асинхронното задвижване чрез инжектиране на постоянен ток. В единия случай се използва външен източник на постоянен ток, реализиран чрез изправител, а в другия като източник на постоянен ток се използва напрежението на постояннотоковата страна на преобразователя на честота (фиг.1). Отначало скоростта на задвижването се установява на 500 об/мин, след което се инжектира постоянен ток.

По-долу е показана част от получените в резултат на моделирането на процеса на спиране на асинхронното

задвижване, като са сравнени и коментирани получени-



Фиг.3. Електромагнитен момент на двигателя

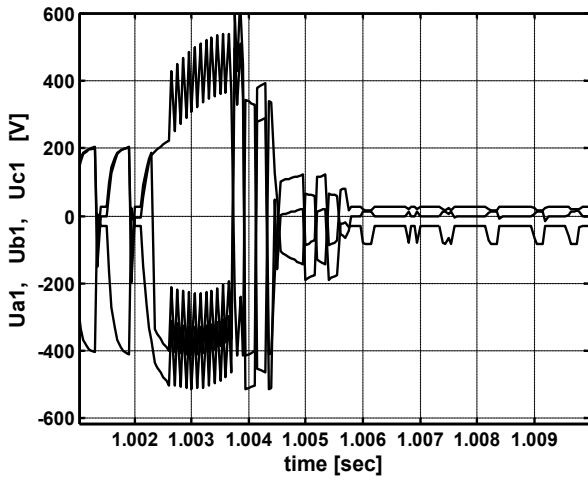


Фиг.4. Линеини напрежения на статора

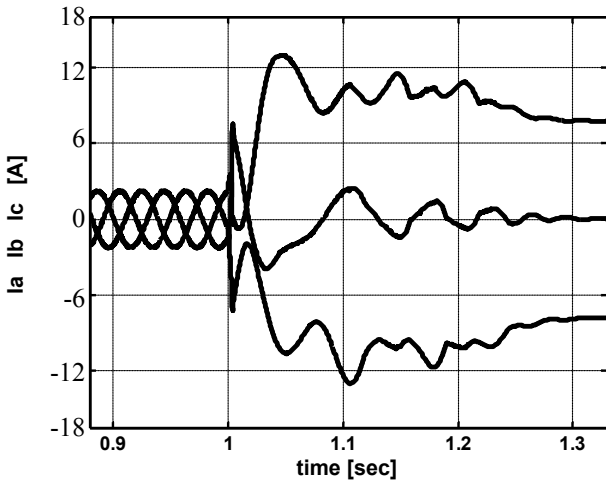
те експериментални резултати.

**Инжектиране на постоянен ток
от външен източник**

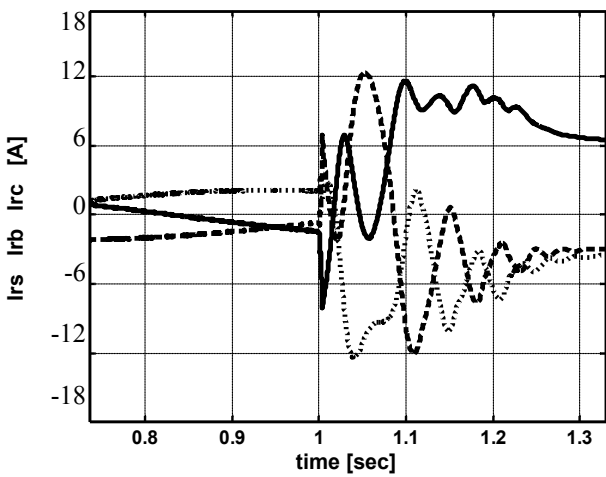
Напрежение на външния източник 600 V.



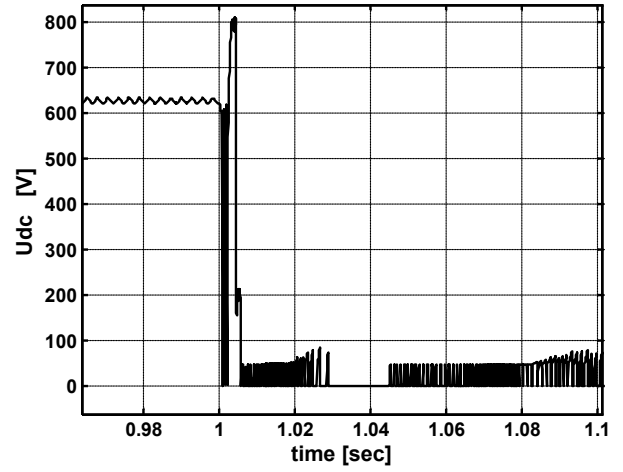
Фиг.5. Фазни напрежения на статора



Фиг.6. Фазни токове на статора

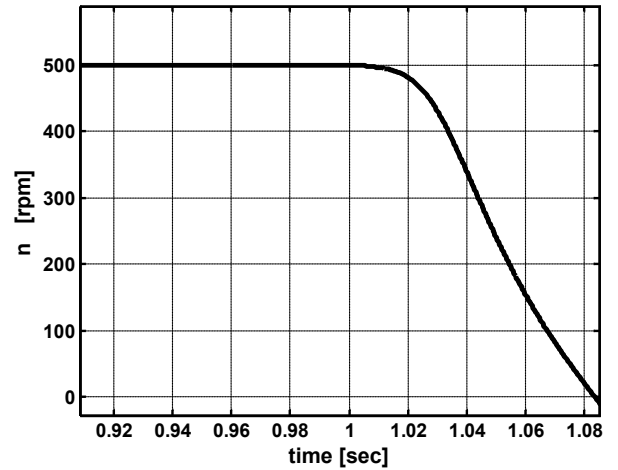


Фиг.7. Роторни токове на двигателя

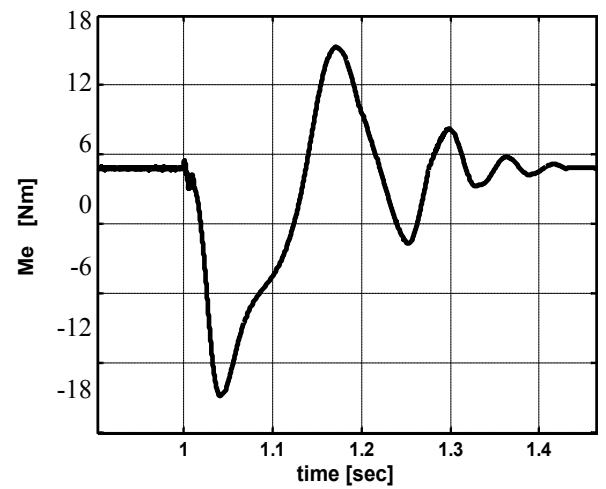


Фиг.8. Напрежение на постояннотоковата страна

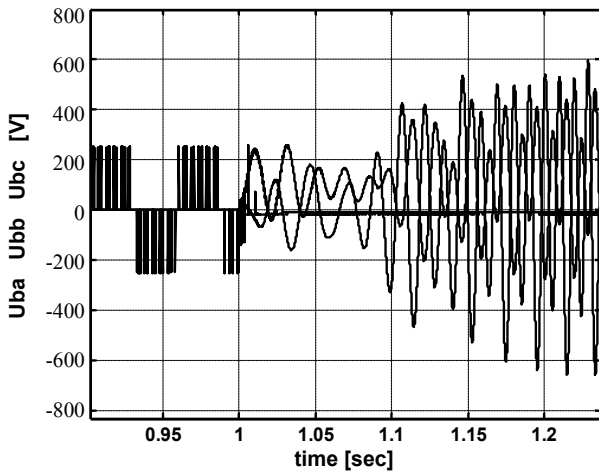
Напрежение на външния източник 300 V



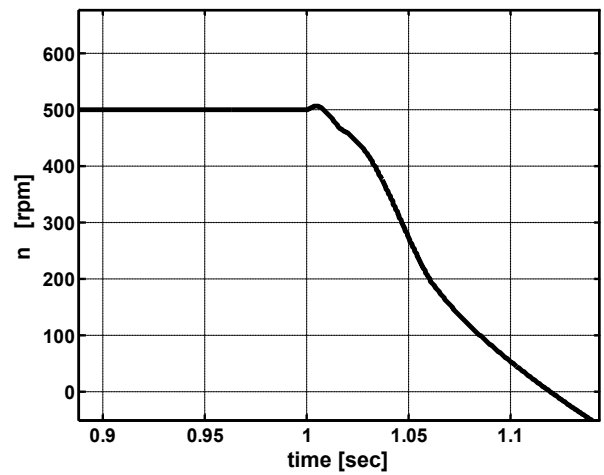
Фиг.9. Скорост на въртене на двигателя



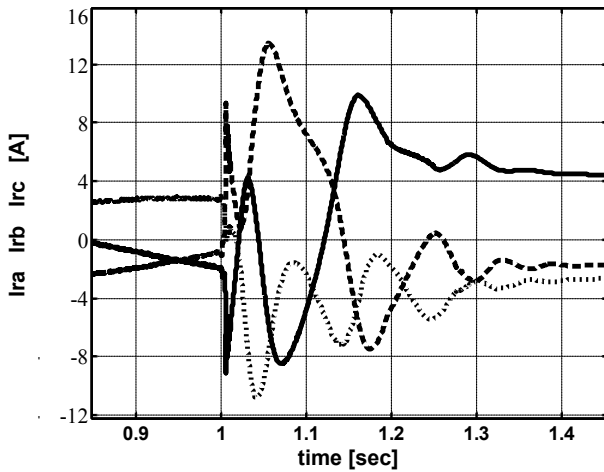
Фиг.10. Електромагнитен момент на двигателя



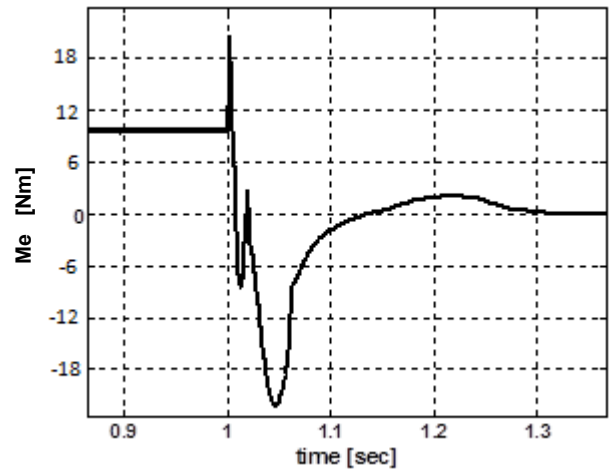
Фиг.11. Линейни напрежения на статора



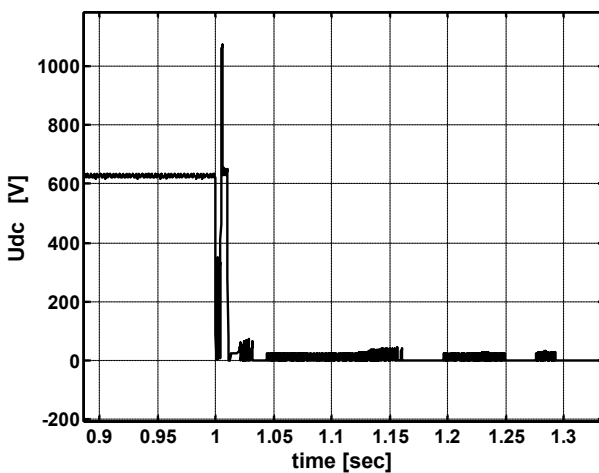
Фиг.14. Скорост на въртене на двигателя



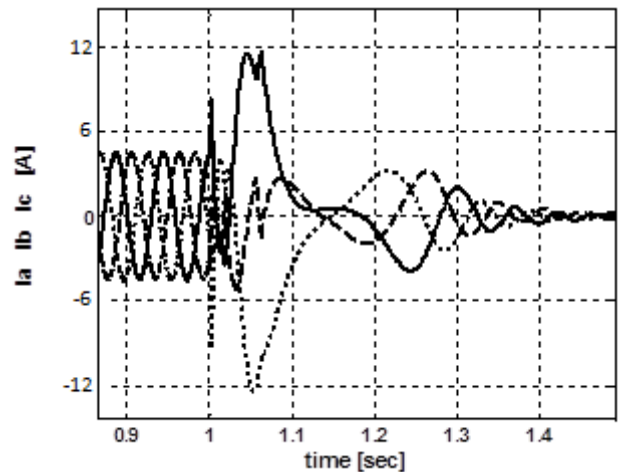
Фиг.12. Роторни токове на двигателя



Фиг.15. Електромагнитен момент на двигателя



Фиг.13. Напрежение на постояннотоковата страна

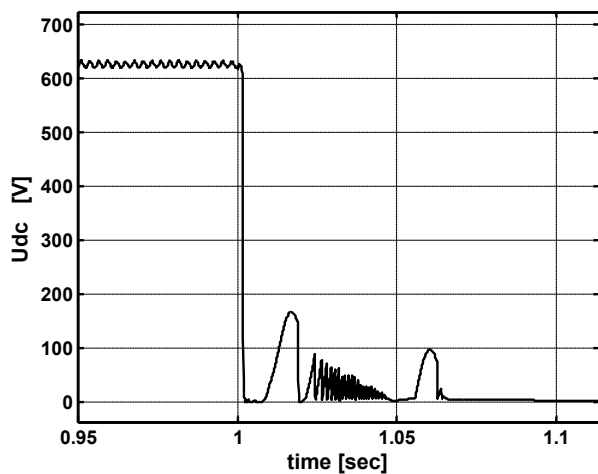


Фиг.16. Фазни токове на статора

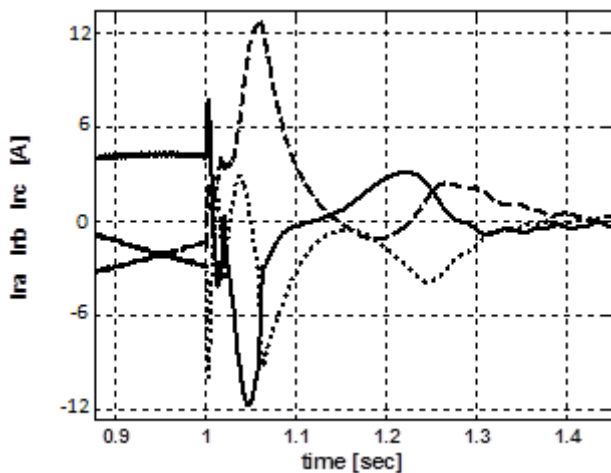
Постояннотоково напрежение от кондензатора на преобразователя на честота.

Анализът на получените експериментални резултати може да бъдат обобщени по следния начин. Увеличението на величината на инжектираното постоянно напрежение увеличава момента на спиране и ускорява процеса на спиране, но увеличава токовете и загубите в двигателя.

Използването на кондензатора на преобразователя опростява максимално схемата за управление. Обаче параметрите на кондензатора се определят от изискванията за управление на електрозадвижването. Освен това процесът на спиране е по-продължителен.



Фиг. 17. Напрежение на постояннотоковата страна



Фиг. 18. Роторни токове на двигателя

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За определени видове електрозадвижвания спиращите режими са определящи, особено за тези от тях с чести пускания и спираня. Спиращи режими чрез инжектиране на постоянен ток са едни от най-често използваните поради добрите си динамични характеристики.

В статията е предложен математически модел на асинхронно задвижване с пряко управление на момен-

та, в което са реализирани две схеми за осигуряване на инжектиране на постоянен ток – от външен източник и от кондензатора на преобразователя на честота.

Изследвани са спиращите режими при различни стойности на инжектираното постоянно напрежение и при използване напрежението на кондензатора. Анализирани са получените експериментални резултати, получени с помощта на създадения модел.

Създаденият математически модел може да бъде използван за проектиране на такъв тип управление на различни типове асинхронни задвижвания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rastogi M., Hammond P.W., Dual-Frequency Braking in AC Drives, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.17, No.6, Nov, 2002, pp.1032-1040.
- [2] Rongmei P.L., Shimi S.L., Chatterji D.S., Sharmu V.K., Fast Braking for Induction Motor, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol.1, No.6, June, 2012, pp.65-69.
- [3] Swamy, M.M., Kume, T., Yukihira, Y., Fujii S.; Sawamura, M., A Novel Stopping Method for Induction Motors Operating from Variable Frequency Drives, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.19, No.4, July, 2004, pp.1100-1107.
- [4] Elkholy M.M., Elhameed MA., Braking of Three Phase Induction Motors by Controlling Applied Voltage and Frequency Based on Particle Swarm Optimization Technique, International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS) Vol.5, No.4, April 2015, pp.520~528.
- [5] Rahane K., Hardas R., Three Phase Induction Motor Braking Using Discrete Frequency Control.
- [6] Murthy S.S., Berg G.J., Jha C.S., Tandon A.K., A Novel Method of Multistage Dynamic Braking of Three-Phase Induction Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-20, No.2, March/April 1984, pp.328-334.
- [7] Джагаров Н.Ф., Расчет переходных процессов в электрических системах со сложной структурой сети. "Электричество", Москва, 1990, №1, с.9-16.
- [8] Джагаров Н.Ф., Корабни електроенергийни системи. Курс лекции, Технически университет Варна, 1997, 424 с.
- [9] Djararov N.F., A Method of Transient Electromechanical Processes Modeling in Power Systems, Proceedings of 2009 IEEE Bucharest PowerTech Conference, June 28th - July 2nd, Bucharest, Romania, *Innovative Ideas Toward the Electrical Grid of the Future*, art. No.5281949, 6 p.
- [10] Marouchos C.C., The Switching Function: Analysis of power electronic circuits, The Institution of Engineering and Technology, 2006, 297 p.
- [11] Djararov N., Grozdev Zh., Bonev M., Djararova J., Operation Study of Wind Permanent Magnet Synchronous Generator, Proceedings of 12th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering EEEIC, Wroclaw, Poland, 5-8 May, 2013, pp.522-528.