

**Товарни характеристики на безчетков двигател за постоянен ток при
наличие на LC филтър в изхода на инвертора**

Иван П. Мараджиев

Технически Университет – София, филиал Пловдив, Катедра “Електроника”,
бул. “Санкт Петербург” № 63, 4000 Пловдив

**Influence of Inverter Output Filter on Torque Speed Curves of Brushless DC
motor drive**

Ivan P. Maradzhiev

Technical University of Sofia Branch Plovdiv, Electronics Department, 63, Sankt
Petersburg Blvd

Abstract: Brushless DC motors are widely applied in many fields of engineering. Their phase windings are switched electronically by a control circuit and a voltage inverter. Usually six step algorithm is used, which produces undesirable ripple torque of the motor. Placing a LC filter between the voltage inverter and the brushless DC motor reduces pulsation. The present report examines the impact of low-pass LC filter on the load characteristics of the brushless DC motor. The presented results are obtained by a computer simulation of electric drives with brushless DC motor in simulator PSIM.

Резюме: Безчетковите двигатели за постоянен ток са намерили широко приложение в много области на техниката. Фазовите им намотки се комутират електронно от управляваща схема и инвертор на напрежение, като обикновено се използва шест стъпков алгоритъм, който води до получаване на нежелани пулсации на въртящия момент на двигателя. Поставяне на LC филтър между инвертора на напрежение и безчетковия двигател за постоянен ток води до намаляване на пулсациите. В настоящия доклад се изследва влиянието на нискочестотен LC филтър върху товарните характеристики на безчетков двигател за постоянен ток. Представените резултати са получени чрез компютърно симулиране на електрозадвижвания с безчетков двигател в симулатора PSIM.

1. Въведение

Безчетковите машини намират приложение във все повече области на техниката. В сравнение с традиционните постоянноточови машини, липсата на колекторно-четков апарат повишава надеждността и намалява радио-честотните смущения. От друга страна сравнително простия алгоритъм на управление и високата енергийна ефективност дават допълнително предимство на безчетковите двигатели за внедряване в индустрията и

електротранспорта. Теоретично, за да се постигне постоянен въртящ момент трябва да се избере подходяща форма на фазовите токове на безщетковия двигател. В идеалния случай, при използване на шест стъпков алгоритъм на управление, за да се постигне постоянен въртящият момент, фазовия ток представлява правоъгълни импулси. Но физически е невъзможно, защото токовете трябва да правят мигновен преход, а този преход има крайно време. В резултат на това се получават комутационни пулсации на въртящия момент.

За намаляване на пулсациите на въртящия момент може да се постави пасивен нискочестотен LC филтър между инвертора на напрежение и безщетковия двигател за постоянен ток[2]. Подобно решение се използва и за подобряване на въртящия момент и на синхронни машини с постоянни магнити[3]. Също може да се използва последователно свързване на режекторен и нискочестотен RLC филтър, като се подобрява електромагнитната съвместимост и въртящия момент[4].

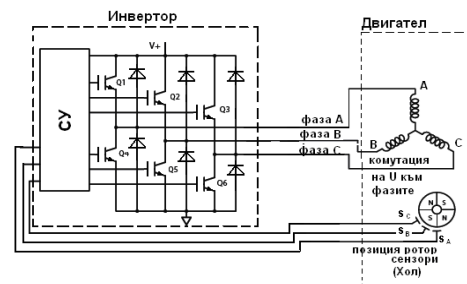
В настоящия доклад се разглежда влиянието на нискочестотен LC филтър, включен между изхода на инвертор на напрежение и безщетков двигател, върху товарните характеристики на двигателя. Изследвано е електрозадвижване без контур за регулиране на скоростта и електрозадвижваща система с регулиране по скорост.

2. Математическо описание на безщетков двигател за постоянен ток и принцип на шест стъпков алгоритъм на работа.

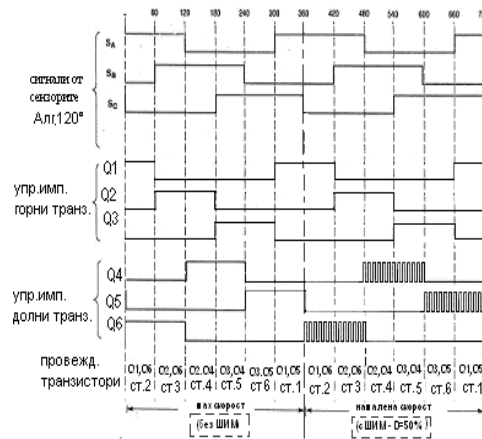
Математически трифазна безщеткова машина може да се опише със следните уравнения:

$$(1) \quad \begin{aligned} v_a &= R \cdot i_a + (L - M) \cdot \frac{di_a}{dt} + E_a \\ v_b &= R \cdot i_b + (L - M) \cdot \frac{di_b}{dt} + E_b \\ v_c &= R \cdot i_c + (L - M) \cdot \frac{di_c}{dt} + E_c \end{aligned}$$

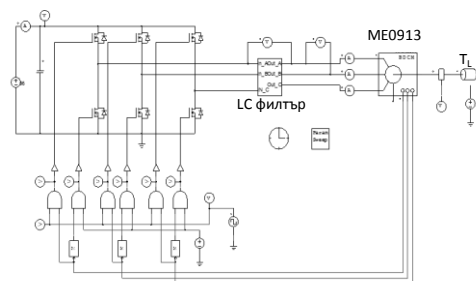
където: v_a , v_b и v_c са фазовите напрежения на машината, i_a , i_b и i_c са фазовите токове, R е активното съпротивление на фазовите намотки, L е собствената индуктивност на намотките, M е взаимната индуктивност между намотките, и E_a , E_b и E_c са обратните е.д.н. съответно на фази A, B и C.



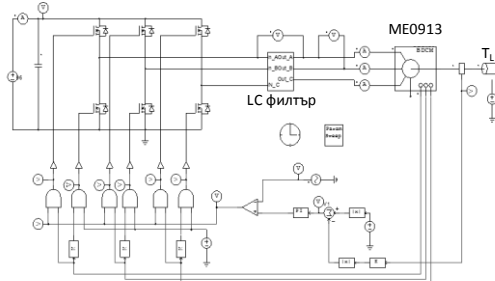
Фигура 1



Фигура 2. Шест стъпков алгоритъм на управление



Фигура 3. Електрозадвижване без регулатор



Фигура 4 Електрозадвижване с регулатор

Обратното е.д.н. е функция на скоростта на въртене на ротора и положението на ротора θ_r по следния начин:

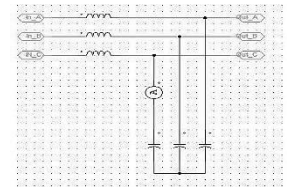
$$(2) \quad \begin{aligned} E_a &= k_{e_a} \cdot \omega_m \\ E_b &= k_{e_b} \cdot \omega_m \\ E_c &= k_{e_c} \cdot \omega_m \end{aligned}$$

Коефициентите k_{e_a} , k_{e_b} и k_{e_c} зависят от положението на ротора θ_r . Въртящият момент развиван от машината е равен на:

$$(3) \quad T_{em} = \frac{E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c}{\omega_m}$$

R, [Ω]	L, [uH]	T _m , [Nm]	n _{max} , [rpm]	K _e , [rpm/V]
0.0065	55	32	5000	50

Таблица 1



Фигура 5

Уравнението за движението на проста система с инерционен момент J, триене B и товарен съпротивителен момент T_{load} е:

$$(4) \quad J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m = T_{em} - T_{load}$$

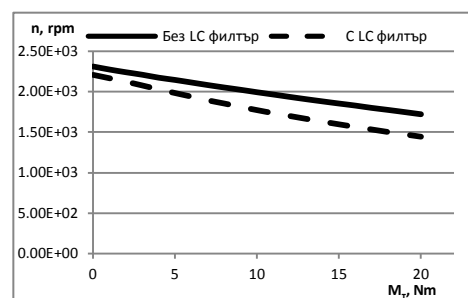
Коефициентът на триене B се изчислява от инерционния момент J и механичната времева константа τ_{mech} както следва:

$$(5) \quad B = \frac{J}{\tau_{mech}}$$

На фигура 1 е представена принципна схема за управление на безчетков двигател за постоянен ток. При управление на трифазен безчетков двигател е необходимо да се знае положението на ротора. Това се осигурява от три сензора на Хол, сигналите от които постъпват в системата за управление. Системата за управление подава необходимата последователност от сигнали за превключване на транзисторите от трифазен инвертор на напрежение, който захранва фазовите намотки на двигателя. На фигура 2 са показани диаграми на импулсите от сензорите S_A , S_B , S_C , подаваните управляващи импулси към горните Q1, Q2, Q3 транзистори и към долните Q4, Q5, Q6, при шест стъпков алгоритъм на управление. Обикновено за управление на параметри, като скорост или въртящ момент се използва широчинно-импулсна модулация [1].

2. Товарни характеристики на безчетков двигател в система без регулиране по скорост.

На фигура 3 е представена симулираната електрозадвижваща система на безчетков двигател за постоянен ток. Моделиран е двигател тип ME0913, като параметрите му са посочени в таблица 1. С елемента T_L се симулира товарен съпротивителен момент, който се изменя от 0 до 20Nm. Захранващото напрежение е 96V. Върху горните транзистори от инвертора се прилага широчинно импулсна модулация с коефициент на запълване D=0.5. Между инвертора на напрежение и безчетковия двигател се поставя



Фигура 6

LC филтър с параметри: L = 87.5uH, C = 150uF. Схемата на свързване на филтъра е показана на фигура 5. На фигура 6 са представени естествената характеристика на двигателя и товарната характеристика при поставен LC филтър. Върху филтъра се получава пад на напрежение, като този пад с натоварването на машината се увеличава. Линеиното напрежение върху двигателя намалява. Това е причината характеристиката при поставен LC

филтър да е под естествената и наклона ѝ да се увеличава с увеличаването на натоварването.

3. Товарни характеристики на безчетков двигател в система с регулиране по скорост

На фигура 4 е показана симулираната електрозадвижваща система с въведен ПИ регулатор на скорост. Товарният съпротивителен момент се изменя от 0 до 29 Nm. На фигура 7 са представени семейство товарни характеристики на безчетковия двигател при различни задания по скорост (RPM) и при липса на LC филтър. На фигура 8 и фигура 9 са представени товарни

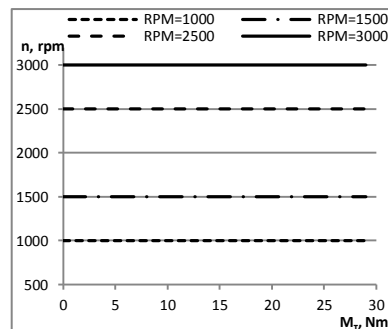
характеристики при зададени 1000rpm, 1500rpm, 2500rpm и 3000rpm с поставен LC филтър между инвертора и двигателя. При ниски обороти регулаторът на скорост поддържа зададената скорост в целия диапазон на изменение на товара. Но при по-високи скорости с увеличаване на натоварването товарната характеристика започва да става падаща, като това най-добре е изразено при задание 3000rpm. Регулаторът на скорост вече не може да компенсира пада на напрежение върху LC филтъра.

Изводи: От сметите товарни характеристики се забелязва, че при поставяне на LC филтър между инвертора на напрежение и безчетковия двигател за постоянен ток степента на спадане на товарната характеристика на безчетковия двигател в отворената електрозадвижваща система нараства. Причината за това е, че върху филтъра се получава допълнителен пад на напрежение. В случай на използване на LC филтър в затворена система с регулиране по скорост при ниски натоварвания и по-ниски скорости няма промяна в товарните характеристики. Регулаторът на скорост компенсира пада на напрежение върху LC филтъра. При увеличаване на скоростта на въртене с увеличаване на натоварването се получава спадане в товарните характеристики на безчетковия двигател, като причина за това е, че регулатора на скорост вече не може да компенсира пада на напрежение върху LC филтъра.

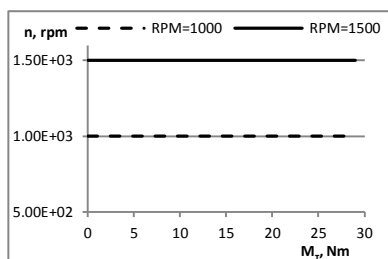
"Научните изследвания, резултатите от които са представени в настоящата публикация, са финансирани от Вътрешния конкурс на ТУ-София-2014г."

Литература

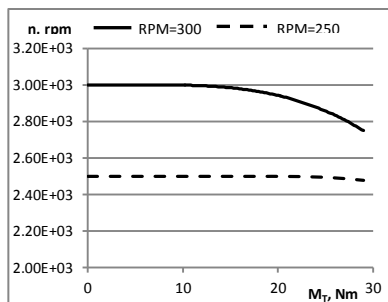
- [1] Динкова М., И. Мараджиев, Е. Динков, *Принципи на управление на 3-фазни безчеткови постояннотокови електродвигатели*, Научни трудове Том LX "Хранителна наука, техника и технологии – 2013", стр. 201-205
- [2] Albert Rajan A., S. Vasantharathna, *Harmonics and Torque Ripple Minimization using L-C Filter for Brushless DC Motors*, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 5, November 2009
- [3] Salomaki J., M Hinkkanen, J. Luomi, *Influence of Inverter Output Filter on Maximum Torque and Speed of PMSM Drives*, Helsinki University of Technology, Box 3000, FI-02015 TKK, Finland
- [4] Gulez K., A. Adam, *Using passive filters to minimize torque pulsations and noises in surface PMSM derived field oriented control*, Simulation Modelling Practice and Theory 15 (2007)



Фигура 7



Фигура 8



Фигура 9