

©Journal of the Technical University Sofia, branch Plovdiv
“Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 14, 2009
International Conference Engineering, Technologies and Systems
TechSys '2009
BULGARIA

MODELING AND SIMULATION OF A DOUBLE-FED INDUCTION MOTOR DRIVE

IVAN KOSTOV GEORGI ZAPRYANOV

Abstract. The double-fed induction drive is composed of one or two voltage source inverters, which feed the stator's and rotor's windings or only the rotor winding of a motor with wound rotor. Their outputs interact electro-mechanically in the motor and a novel features can be obtained. A schematic solution of the double-fed drive have been researched for different operating modes. Transient processes and characteristics are obtained. The impact of the drive parameters on the quality of the characteristics has been explored

Key words: AC Machines, Variable Speed Drives, Modeling, Double-Fed Induction Motor.

МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИЯ НА АСИНХРОННА ЕЛЕКТРИЧЕСКА КАСКАДА В РЕЖИМ НА МДЗ

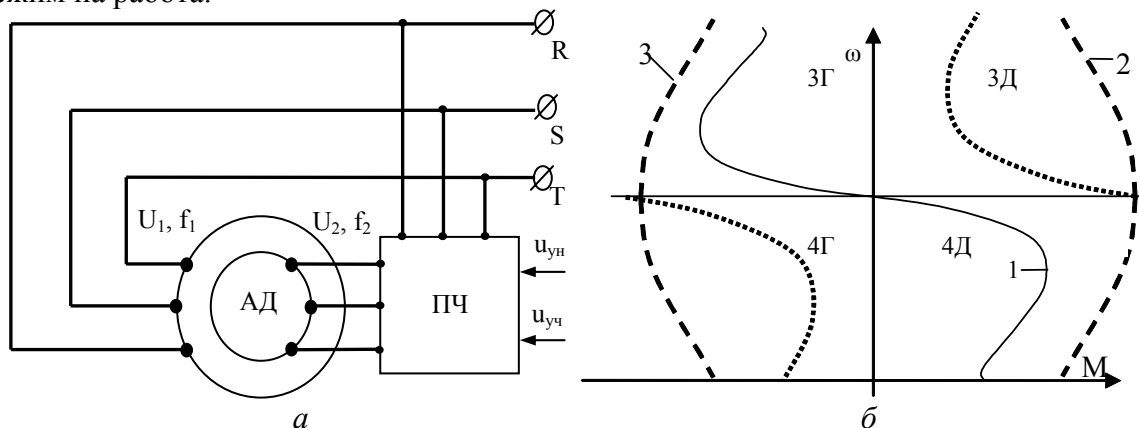
1. Въведение

Повече от половината от електрическата енергия в света днес се консумира от електрически двигатели, като най-често използвани са асинхронните двигатели, представляващи между 80% и 90% от всички електродвигатели. Съществен недостатък на всички начини за регулиране на скоростта на АД при $\omega_0 = const$ е нарастването на загубите на мощност в роторната верига, пропорционално на хлъзгането [1,2]. Обаче при двигателя с фазен ротор този недостатък може да бъде отстранен чрез включване в роторната верига на източник на регулируемо напрежение, с помощта на който енергията на хлъзгането може да се връща в мрежата или да се използва за извършване на полезна работа [1,2,3]. Този начин на включване на двигателя се нарича машина с двойно захранване (МДЗ) и спада към класа на каскадните схеми [1]. Използването на МДЗ в съвременните автоматизирани системи позволява съществено да се повишат технико-икономическите показатели на различни технологични установки. Това е така, защото като електромеханичен преобразувател на енергията, МДЗ се характеризира с високи енергийни показатели, притежава добра управляемост, осигурявайки голям пусков момент[3,4,5,6,7].

В статията е изследвана работата на асинхронна машина с двойно захранване и възможността да се оползотворява енергията на хлъзгането. Изследването е направено с помощта на симулиран експеримент.

2. Класификация

Особеният начин на включване на ротора позволява да се получат нови характеристики и свойства на електрозадвижването – фиг.1а,б. МДЗ могат да работят с подсинхронна (участък 4Г и 4Д) и надсинхронна (участък 3Г и 3Д) скорост в двигателен и генераторен режими на работа, както в синхронен, така и в асинхронен режим на работа.



Фиг.1. Електрична каскада с асинхронен двигател в режим на МДЗ.

а – схема на включване; б – механичии характеристики.

• Двигателен режим при подсинхронна скорост

В този случай, ако се пренебрегнат загубите, консумираната от АД мощност (P_1) постъпва към вала на двигателя (P_2) и във вид на мощност от хлъзгане (P_s) – към непосредствения преобразувател на честота, т.е. $P_1 = P_2 + P_s$. Мощността на хлъзгането P_s се преобразува от ПЧ и се връща в захранващата мрежа. Вентилните групи се отпушват с такава последователност и честота, че да осигуряват насрещно включване на допълнителното електродвижещо напрежение и електродвижещото напрежение на ротора.

• Двигателен режим при надсинхронна скорост

При увеличаване на скоростта на АД над синхронната скорост, хлъзгането става отрицателно и мощността на хлъзгането се приема от ротора. В този случай механичната мощност P_2 се обезпечава с консумация на мощност и по веригата на статора P_1 и по веригата на ротора през ПЧ – $P_2 = P_1 + P_s$.

• Генераторен режим при подсинхронна скорост

При рекуперативното спиране валът се задвижва от товара, а механичната енергия се трансформира в електрическа енергия. В този случай посоките на предаване на мощността са $-P_1 = -P_2 - P_s$.

• Генераторен режим при надсинхронна скорост

В този случай статорната изходна мощност остава постоянна, но входната допълнителна механична мощност се връща като изходна мощност на хлъзгането. Постъпващата от вала мощност се предава в захранващата мрежа по двата канала, т.е. посоките на мощностите са $-P_2 = -P_1 - P_s$.

При скорост под синхронната двигателните моменти намаляват значително способността за претоварване в генераторен режим (участък 4Г на фиг.1б). При скорости, по-големи от синхронната, спирачните моменти ограничават максималните стойности на резултатния момент, съответстващи на $\theta_{ei} = 90^\circ$ в двигателен режим (участък 3Д на фиг.1б).

В МДЗ възможността за двузонно регулиране на скоростта при работа както в двигателен, така и в генераторен режим се осигурява само като се използват напълно управляеми ПЧ, които могат да пропускат енергията както в права, така и в обратна посока.

3. Анализ на установените режими

При разглеждане на установените режими на работа се приема, че моментът на вала на двигателя е постоянен, а загубите в електрическата машина и в ПЧ са незначителни. Електромагнитният момент на МДЗ се дава [1,2] с изрза

$$M = \frac{3U_1^2 R_2 s}{\omega_0 (R_2^2 + x_k^2 s^2)} + \frac{3U_1 U_2}{\omega_0 \sqrt{R_2^2 + x_k^2 s^2}} \sin \theta_{el}, \quad (1)$$

където θ_{el} е ъгълът между осите на полетата на статора и ротора.

Моментът на двигателя има две съставки, едната от които съответства на естествената механична характеристика на асинхронния двигател, а другата на синхронния режим, обусловен от напрежението U_2 , подадено към роторната верига.

Асинхронната съставка M_a има вида

$$M_a = \frac{3U_1^2 R_2}{\omega_0 s [(R_2/s)^2 + x_k^2]}. \quad (2)$$

Зависимостта $M_a = f(\omega)$ е показана на фиг.1б (крива 1).

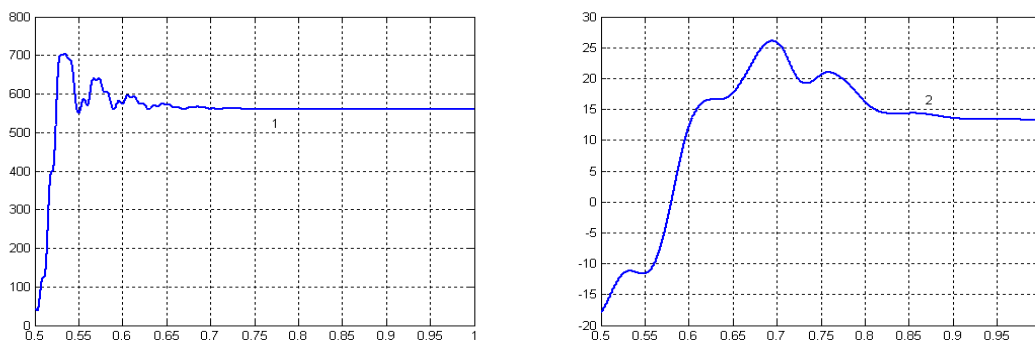
Синхронната съставка M_s има вида

$$M_s = \frac{3U_1 U_2}{\omega_0 \sqrt{R_2^2 + x_k^2 s_0^2}} \sin \theta_{el}. \quad (3)$$

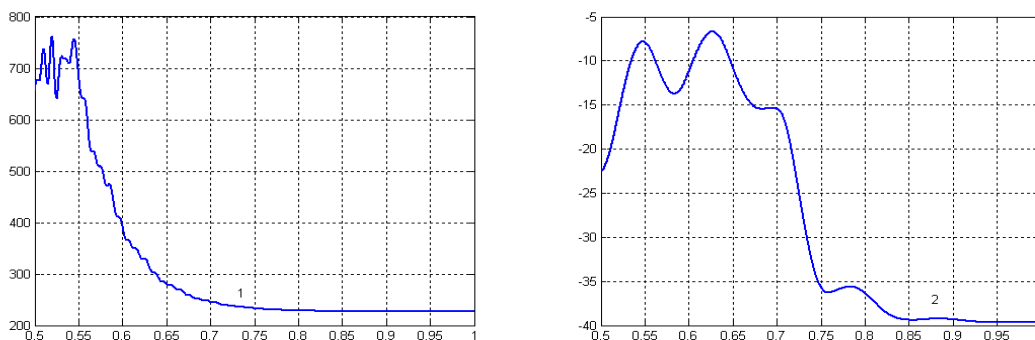
Зависимостта $M_s = f(\omega)$ е показана на фиг.1б при $\theta_{el} = 90^\circ$ (крива 2) и при $\theta_{el} = -90^\circ$ (крива 3). Хлъзгането $s = s_0$ се определя от двете честоти – в статора и ротора и е постоянно за синхронния режим на работа.

4. Симулационни графични резултати

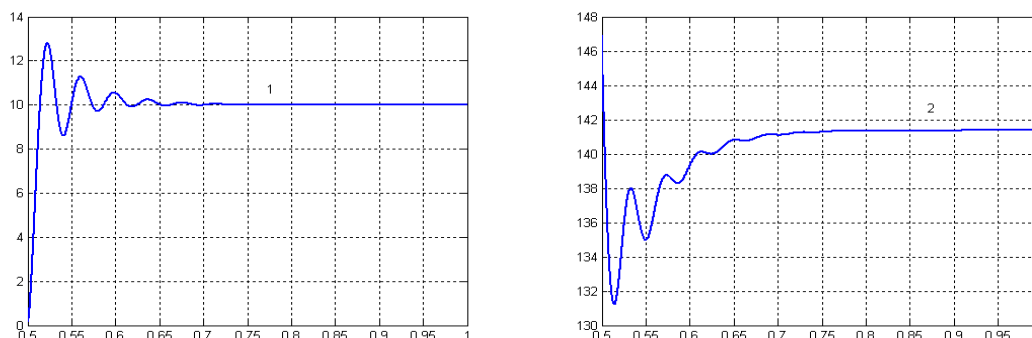
На основата на направения анализ и схемата от фиг.1 е създаден модел и са проведени симулирани експерименти. Параметрите на използвания двигател са дадени в Приложение. Фигури 2, 3 и 4 показват консумираните мощности и преходните процеси на момента и скоростта при натоварване в двигателен режим и подсинхронна скорост. Фигури 5, 6 и 7 показват подобни резултати, но за генераторен режим. Отрицателните активна и реактивна мощности в статора (P_1 и Q_1) съответстват на отдаване на мощност в мрежата. Обратното важи за мощностите на хлъзгането (P_s и Q_s) в ротора.



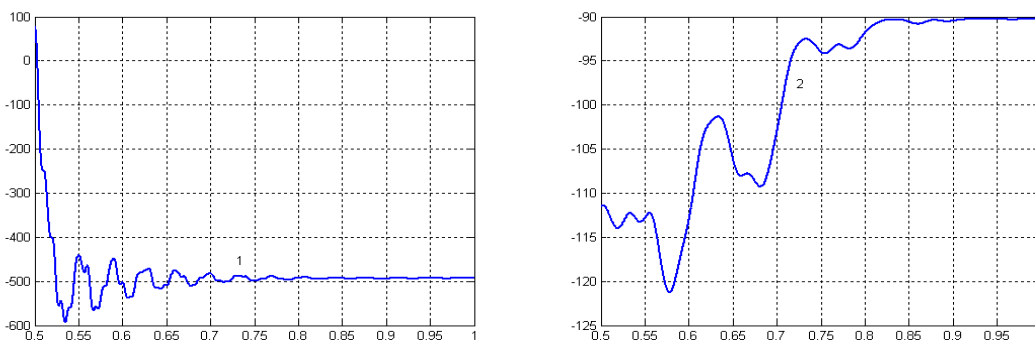
Фиг.2. Зависимост на активната мощност (1- P_1 ; 2- P_s) от времето на МДЗ в двигателен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c=10Nm$; $U_2=22.8V$; $f_2=5Hz$; P , W ; t , s .



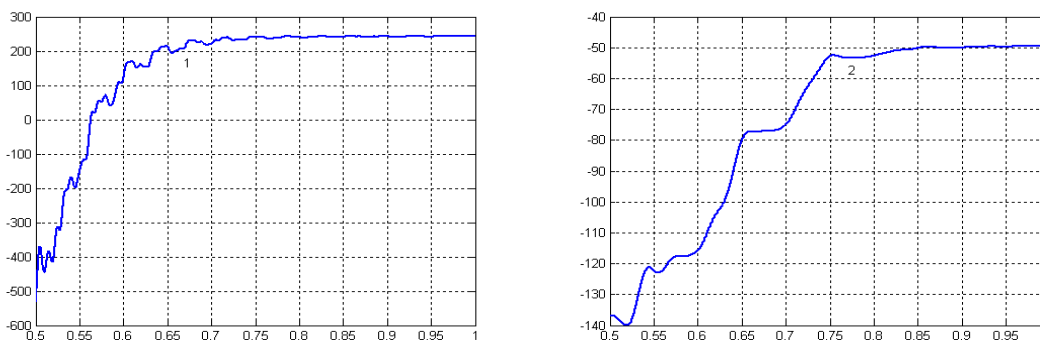
Фиг.3. Зависимост на реактивната мощност (1- Q_1 ; 2- Q_s) от времето на МДЗ в двигателен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c=10Nm$; $U_2=22.8V$; $f_2=5Hz$; Q , Var ; t,s .



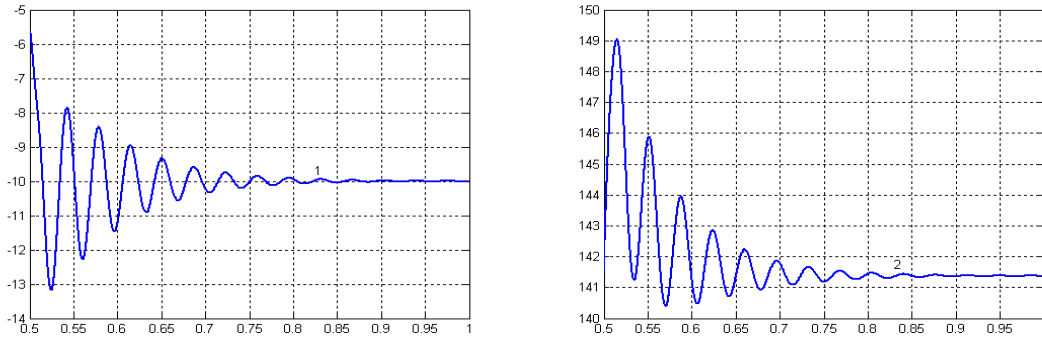
Фиг.4. Преходни процеси на момента (1) и скоростта (2) на МДЗ в двигателен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c=10Nm$; $U_2=22.8V$; $f_2=5Hz$; M , Nm ; ω , rad/s ; t,s .



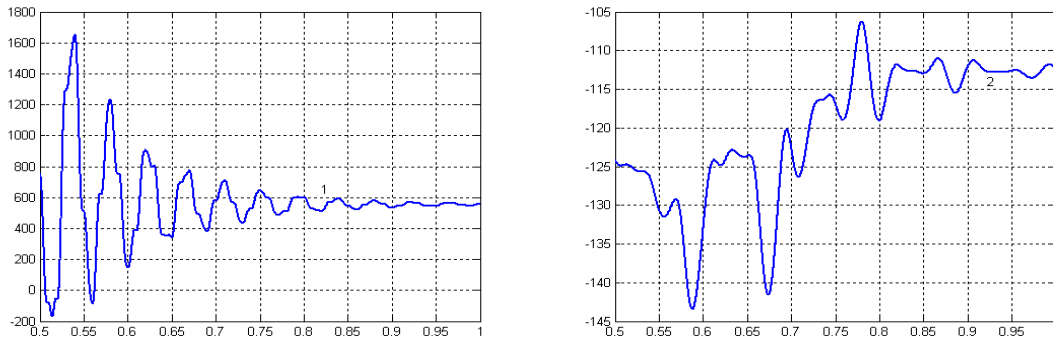
Фиг.5. Зависимост на активната мощност (1- P_1 ; 2- P_s) от времето на МДЗ в генераторен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c=-10Nm$; $U_2=57V$; $f_2=5Hz$; P , W ; t,s .



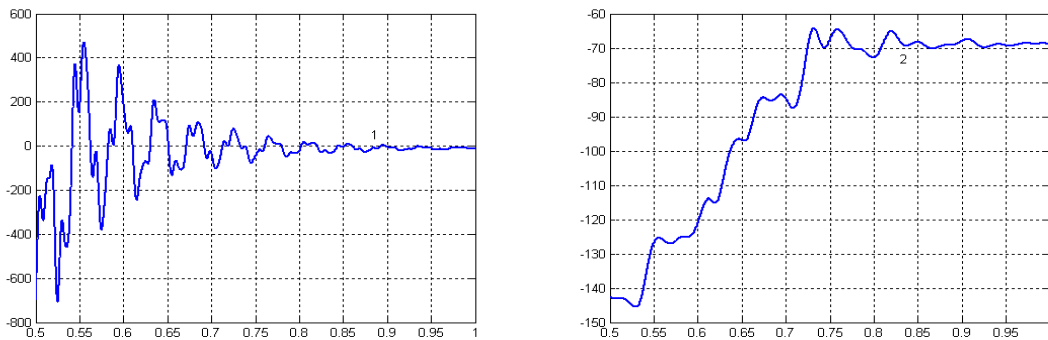
Фиг.6. Зависимост на реактивната мощност (1- Q_1 ; 2- Q_s) от времето на МДЗ в генераторен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c=-10Nm$; $U_2=57V$; $f_2=5Hz$; Q , Var ; t,s .



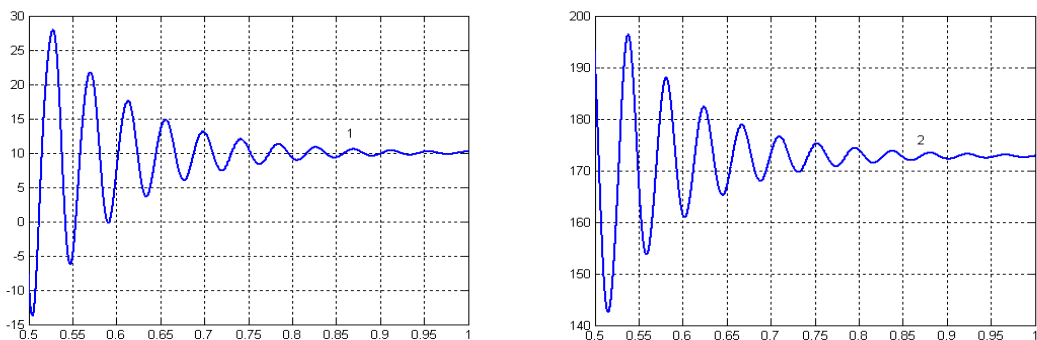
Фиг.7. Преходни процеси на момента (1) и скоростта (2) на МДЗ в генераторен режим при натоварване и подсинхронна скорост. $M_c = -10 \text{ Nm}$; $U_2 = 57 \text{ V}$; $f_2 = 5 \text{ Hz}$; M , Nm ; ω , rad/s ; t , s .



Фиг.8. Зависимост на активната мощност (1- P_1 ; 2- P_2) от времето на МДЗ в двигателен режим при натоварване и надсинхронна скорост. $M_c = 10 \text{ Nm}$; $U_2 = 57.95 \text{ V}$; $f_2 = 5 \text{ Hz}$; P , W ; t , s .



Фиг.9. Зависимост на реактивната мощност (1- Q_1 ; 2- Q_2) от времето на МДЗ в двигателен режим при натоварване и надсинхронна скорост. $M_c = 10 \text{ Nm}$; $U_2 = 57.95 \text{ V}$; $f_2 = 5 \text{ Hz}$; Q , VAR ; t , s .



Фиг.10. Преходни процеси на момента (1) и скоростта (2) на МДЗ в двигателен режим при натоварване и надсинхронна скорост. $M_c = 10 \text{ Nm}$; $U_2 = 57.95 \text{ V}$; $f_2 = 5 \text{ Hz}$; M , Nm ; ω , rad/s ; t , s .

Анализът на получените резултати показва, че енергията на хлъзгането във всички случаи се използва за извършването на полезна работа, което се отразява изключително благоприятно върху коефициента на полезно действие на електрозадвижването.

5. Заключение

Моделирано е и е изследвано схемно решение на синхронния режим на машина с двойно захранване в двигателен и генераторен режим.

Характерна особеност на електрозадвижването е оползотворяването на мощността на хлъзгането, която се връща в захранващата мрежа или се консумира от нея и се предава към задвижвания механизъм. Интерес представлява разработването на проект за оценка на коефициента на полезно действие на тези задвижвания.

Електрозадвижването е подходящо да се използва в мощни приложения със сравнително малък диапазон на регулиране на скоростта на двигателя под и над синхронната. Известен недостатък представлява необходимостта от използване на двигатели с навит ротор.

Разработването на тази тестова конфигурация доказва, че работата на машината с двойно захранване в система със стандартен регенеративен преобразувател на честота е възможно. Необходими са само малки допълнения в хардуера и софтуера, за да се реализира такова електрозадвижване със стандартни честотни инвертори без пряко вмешателство в системата за управление на преобразувателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Михов М.**, Управление на Електромеханични системи – II част, Технически Университет - София, С., 2007.
2. **Ключев В.**, Теория на електрозадвижването, Техника, С., 1989.
3. **Papathanassiou S.A, M. Papadopoulos**, Commutation angle analysis of the slip energy recovery drive, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol .13, No. 1, March 1998.
4. **Drid S., M. Tadjine, M-S. Nait-Said**, Nonlinear feedback control and torque optimization of a doubly fed induction motor, *Journal of Electrical Engineering*, Vol.56, No. 3-4, 2005, 57-63.
5. **Wegener R., S. Soter, T. Rössmann**, Operation of double fed induction generators with unmodified low cost standard converters, *Institute of Electrical Drives and Mechatronics*, University of Dortmund, Germany.
6. **Drid S., M-S. Nait-Said, A. Makouf, M. Tadjine**, Doubly fed induction generator modeling and scalar controlled for supplying an isolated site, *Journal of Electrical Engineering*, No. 2-2, 2006, 103-115.
7. **Mitrovič N., B. Jeftenič, M. Petronejivič**, Doubly fed induction motor speed control with standard PWM inverter in stator, *Electronics and energetics*, Vol.10, No. 1, 1997, 125-138.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Номинални данни на изследвания двигател:

$P_N = 1.5 \text{ kW}$; $U_N = 380 \text{ V}$; $f_{sn} = 50 \text{ Hz}$; $n_N = 1395 \text{ r/min}$; $I_{sN} = 3.6 \text{ A}$; $z_p = 2$; $M_N = 10 \text{ Nm}$;
 $L_1 = 0.023 \text{ H}$; $R_1 = 4.8 \Omega$; $L_2 = 0.011 \text{ H}$; $R_2 = 3.87 \Omega$; $L_{12} = 0.240 \text{ H}$; $J_d = 0.00248 \times 2 \text{ kgm}^2$.

Катедра "Системи за управление"

Технически университет – София, филиал Пловдив

ул. Цанко Дюстабанов №25

4000 Пловдив

E-mail: ijk@tu-plovdiv.bg, jozo@abv.bg