МОДЕЛИРАНЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА СЕРВО ЗАДВИЖВАНЕ DM S2006MD

Станимир Йорданов*, Георги Михалев, Христина Стойчева, Елена Монова

Технически университет - Габрово, гр. Габрово, България, sjjordanov@tugab.bg
** Кореспондиращ автор: sjjordanov@tugab.bg*

MODELING AND IDENTIFICATION OF THE DM S2006MD SERVO DRIVE

Stanimir Yordanov*, Georgi Mihalev, Hristina Stoycheva, Elena Monova

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria;
** Corresponding author: sjjordanov@tugab.bg*

Abstract

The article presents a mathematical description of the DM S2006MD servo drive, and a Simulink model based on it has been created. Identification of the previously unknown parameters of the drive has been carried out. Experiments were conducted with both the model and the actual motor, and the results were compared.

Keywords: servo drive, modeling, identification.

ВЪВЕДЕНИЕ

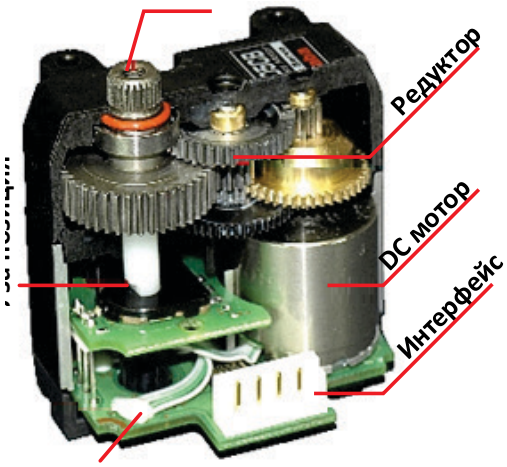
Съвременното развитие на автоматизацията на технологичните процеси се характеризира с усложняване на задачите за автоматично регулиране, значително увеличаване на броя на настройваните параметри, усъвършенстване на съществуващите и създаване на нови функционални елементи за системи с непрекъснато и дискретно действие, както и с повишаване на динамичната точност на регулирането, включително чрез използване на микропроцесорна техника [1]. Сред новите решения най-голям интерес представляват регулаторите, изградени на основата на ПИД закона за управление, поради техните добре известни предимства [2–4].

В този контекст възниква необходимостта от решаване на задачата за параметрична идентификация и оптимизация, тоест определяне на оптималните настройки на параметрите на регулатора спрямо избран критерий [3].

ИЗЛОЖЕНИЕ

Има много видове двигатели, налични за различни приложения, като DC двигатели, серво мотори и стъпкови двигатели. Серво моторите обаче са известни със своята бърза работа, висок въртящ момент и точно въртене. Според [5] серво задвижването е движеща се система с обратна връзка, която позволява точно да се контролира движението и позволява да се използват различни алгоритми на движение.

Сервомотора е електромагнитно устройство, използващо механизъм за отрицателна обратна връзка, за да преобразува електрически сигнал в контролирано движение. По принцип сервозадвижванията се държат като задвижващи механизми, които осигуряват прецизен контрол върху скоростта, ускорението и линейното или ъглово положение. Състои се от четири компонента(фиг. 1): DC двигател, сензор за позиция, зъбна предавка (редуктор) и управляваща верига



***Фиг. 1**. Устройство на DC серводвигател*

Зъбният механизъм е свързан с двигателя и осигурява обратна връзка към сензора за положение. Наличието на сензор за положение гарантира точността при отработването на заданието.

При постоянно токовите двигатели (ПТД) скорост и мощността могат да бъдат управлявани с помощта на наречени широчинно-импулсна модулация (PWM). Някои серво мотори имат допълнителни функции като вградени контролери и комуникационни интерфейси, което ги прави адаптивни и лесни за интегриране в сложни системи.

Предмет на настоящото изследване е сервозадвижването DM S2006MD.

Серводвигателят DM-S2006MD е известен със своята стабилност и точност, което го прави подходящ за използване в различни приложения, изискващи прецизен контрол на движението, като манипулатори, сгъваеми рамена и малки роботи, изискващи висока точност на движение.

Технически характеристики на серво задвижването DM S2006MD са:

- Работно напрежение: 4.8V~7.4V
- Скорост: 0.18 sec/60deg (6v) 0.16sec/60deg (7.2v)
- Въртящ момент: 17.8kg.cm (6v) 21.5kg.cm (7.2v)
- Размер: 40mmX20mmX38.5mm
- Тегло: 56gram
- Ъгъл на завъртане: 360°.

Моделиране на серво задвижване DM S2006MD

Динамичните модели описват неустановените режими на работа на обекта и неговите промени във времето.

Серво задвижванията DM S2006MD често се използват в такива динамични модели. За да бъдат използвани в динамични модели, е необходимо да се познават всички параметри на серво задвижванията, което ще улесни компютърното моделиране на бъдещия механизъм, съставен от тези устройства.

За постигане на поставената цел е необходимо последователно да се решат следните задачи:

- преглед на методите за идентификация на параметрите;
- съставяне на математическо описание на серво задвижването;
- проектиране и сглобяване на установка за идентификация на параметрите;
- провеждане на експериментални изпитвания;
- оценка на математическия модел на серво задвижването.

Математическо описание на постояннотоков двигател

Съгласно [7], електромагнитният въртящ момент на двигател с постоянен ток се изчислява по формула (1)

$$M_d = I_a . K_t \qquad (1)$$

където K_t е коефициентът на пропорционалност между електромагнитния въртящ момент и тока на котвата, наречен константа на въртящия момент на двигателя, Nm/A;

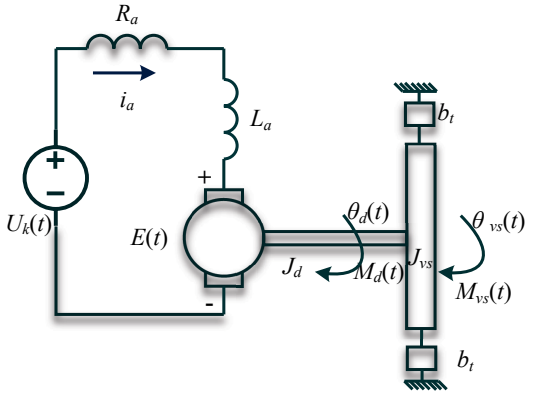
I_a – токът на котвата, ротора, A.

Според законите на електромагнитната индукция: за всеки затворен контур индуцираната електродвижеща сила (ЕДС) е равна на скоростта на промяна на магнитния поток, преминаващ през този контур, взета със знак минус. В проводник, който се движи в магнитно поле, възниква електродвижеща сила. Сумарната ЕДС на намотките на котвата E, чрез колектора и четките, се прилага към външните изводи на двигателя. В режим на

работа на двигателя, ЕДС е насочена срещу външното напрежение U_a, подадено на котвата от източника на захранване. ЕДС е причинена от промяната на токовете в намотките.

$$E = \omega_a L_{12} i_a = p_p L_{12} i_a \omega_1 = K_w \cdot \omega_1 \quad (2)$$

където K_w е коефициентът на пропорционалност между скоростта и ЕДС, наречен постоянен ЕДС на двигателя; ω_1 – ъглова скорост на въртене на вала на двигателя, rad/s; i_a – ток на възбуждане, A; L_{12} – индуктивност на възбудителните. На фиг. 1 е показва електрическата верига на двигателя.



***Фиг. 2**. Електрическата верига на ПТД*

Тази схема се характеризира със следните параметри: активно съпротивление на котвата R_a и индуктивност на котвата L_a. Роторът с инерционен момент J_d се задвижва от едновременното действие на електромагнитния въртящ момент на двигателя M_d и момента на външните сили M_{vs}, приложени към вала на двигателя.

Диференциалните уравнения за описание на ПТД са съставени въз основа на законите на физиката. За електрическа верига се използва вторият закон на Кирхоф: алгебричната сума на спадовете на напрежението във всички клонове, принадлежащи към всяка затворена верига, е равна на алгебричната сума на ЕДС на клоновете на тази верига:

$$U_a = R_a . I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (3)$$

където R_a е съпротивлението на намотката на котвата, Ω; L_a е индуктивността на намотката на котвата, H. По този начин уравнения (1) и (3) образуват система от механични характеристики на ПТД.

$$\left| \begin{array}{l} U_a = R_a . I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \\ M_d = I_a . K_t \end{array} \right. \quad (4)$$

Коефициентите R_a и I_a характеризира падането на напрежението върху активното съпротивление на веригата на котвата в съответствие със закона на Ом, а членът $L_a \frac{dI_a}{dt}$ отразява наличието на ЕДС на самоиндукция, възникваща в намотката при промяна на тока в котвата. Природата на електромагнитните явления в двигателите с постоянен ток е такава, че ако се използва системата единици SI, тогава стойностите на коефициентите K_w и K_m са числено равни. Често двигателят работи при постоянен поток $\Phi = const$, при което уравненията на механичната характеристика на двигателите с постоянен ток се линеаризират и след преобразувания математическото описание на динамичните процеси в двигателя се представя в следния вид:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2} . M_d - \frac{L_a}{K_w^2} . \frac{dM_d}{dt} \quad (5)$$

Като се има в предвид, че $M_d = I_a . K_t$, уравнение (5) приема формата:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2} . I_a - \frac{L_a}{K_w^2} . \frac{dI_a}{dt} \quad (6)$$

При постоянен поток и при $\frac{dM_d}{dt} = \frac{di_a}{dt} = 0$ уравнението придобива вида:

$$\omega_d = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2} . I_a = \frac{U_a}{K_w} - \frac{R_a}{K_w^2} . M_d \quad (7)$$

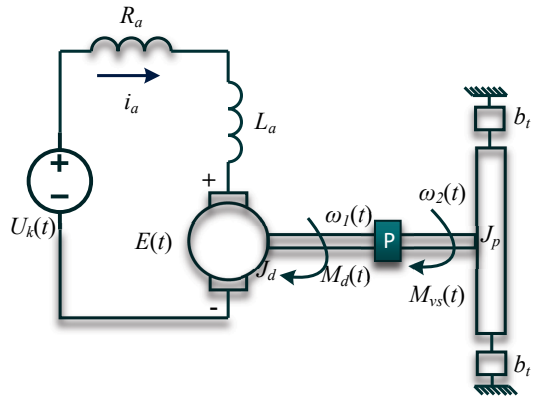
При $\Phi = const$ електромеханичните и механичните характеристики на двигателя са линейни. Диференциалното уравнение, характеризиращо процесите в механичната част на двигателя, се съставя на базата на втория закон на Нютон:

$$J_a \frac{d\omega_d}{dt} + M_{vs} = M_d \quad (8)$$

където M_{vs} е моментът на външните сили, действащи спрямо оста на въртене на вала на двигателя, N·m; J_a - общ инерционен момент на арматурата и товара, kg/m^2.

Математическо описание на двигател с постоянен ток с редуктор

Редукторът е механизъм, който предава и преобразува въртящия момент, с една или повече механични предавки. Редукторът се използва за преобразуване на висока ъглова скорост на въртене на входящия вал в по-ниска скорост на изходящия вал, като при това увеличава въртящия момент. На фиг. 3 е показана електрическа схема с редуктор.



Фиг.3 *Електрическа верига на двигател с постоянен ток с редуктор*

В повечето случаи валът на сервозадвижването с постоянен ток е свързан с редуктор, чието предавателно число, съгласно [8], е:

$$K_p = \frac{\omega_1}{\omega_2} \qquad (9)$$

където:ω_2 – ъгловата скорост (на задвижваното звено) на изходния вал след редуктора, rad/s; ω_1 – ъгловата скорост (на задвижващото звено) на вала на двигателя, rad/s.

Тогава уравнение (8) придобива следния вид написано по отношение на външните сили:

$$J_n \frac{d\omega_2}{dt} + b_t\omega_2 = K_p M_d - M_{vs} \qquad (10)$$

където $J_n = K_p^2 J_a + J_p$ е инерционния момент на натоварването на редуктора, kg.m^2; b_t – коефициент на вискозно триене.

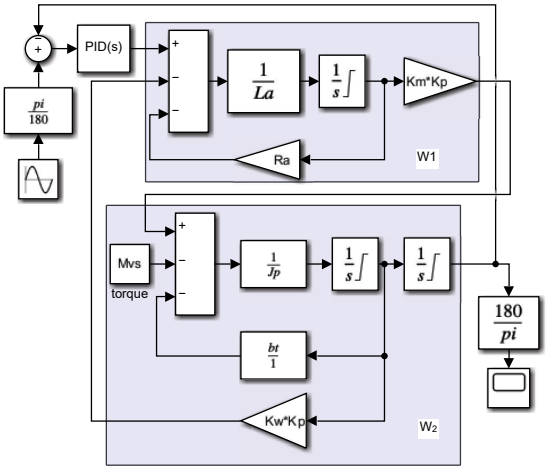
Моделът отчита само вискозното триене; хлабината и сухото триене не се вземат предвид. Като се вземе предвид формула (10), системата от уравнения (4) може да бъде допълнена:

$$\left| \begin{array}{c} U_a = R_a.I_a + L_a\frac{dI_a}{dt} + E \\ J_n\frac{d\omega_2}{dt} + b_t\omega_2 = K_p M_d - M_{vs} \\ M_d = I_a.K_t \end{array} \right. \qquad (11)$$

За да се изследват процесите с помощта на Matlab Simulink се използва структурно представяне на математическия модел на ПТД. За целта се пренаписват уравненията от формула (11) по отношение на производните:

$$\left| \begin{array}{l} \frac{dI_a}{dt} = \frac{U_a - R_a.I_a - E}{L_a} \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{K_p M_d - b_t\omega_2 - M_{vs}}{J_n} \end{array} \right. \qquad (12)$$

На фиг. 5 показва опростен Simulink модел на серво задвижването с редуктора и вграден ПИД регулатор.



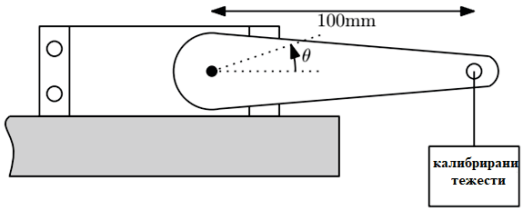
Фиг. 4. *Опростен Simulink модел на серво задвижване с редуктор и ПИД регулатор*

Измерване на параметрите на сервозадвижването

За да се състави пълно математическо описание на системата, базирано на системи от уравнения (13) и съответстващ компютърен модел, разработен в програмата Matlab с помощта на библиотеката Simulink, е необходимо да се намерят всички липсващи параметри на системата, като например: съпротивление R_a, индуктивност L_a ток на котвената намотка I_a. Също така трябва да се намери приложеното натоварване към вала на редуктора, еквивалентният момент на

инерция на вала на редуктора и на вала на двигателя, който е част от системата за електрозадвижване.

Моментът на инерция на стенда (фиг. 5) се изчислява спрямо центъра на масите на платформата. За да се приведе към оста на въртене се използва теоремата на Щайнер [9].



***Фиг. 5** – Стенд за идентификация на параметрите на двигателя*

Моментът на инерция на стенда се изчислява по формулата:

$$J = J_c + \mathrm{m}.d^2 \qquad (13)$$

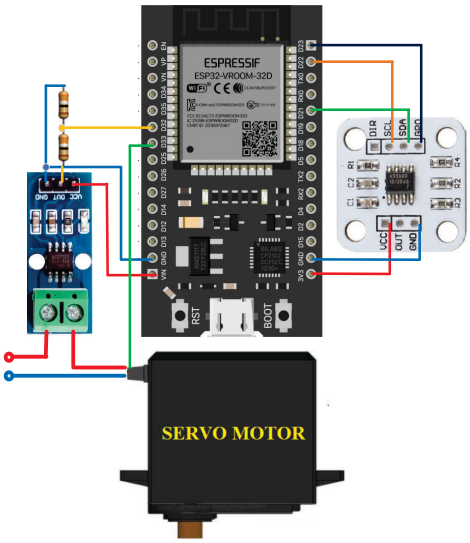
където: J – момент на инерция на тялото спрямо произволна неподвижна ос, kg/m²; J_c – момент на инерция спрямо центъра на масите, kg/m²; m – масата на тялото, kg; d – разстоянието между осите, m.

Изчисленият инерционен момент е:

$J_p = 0{,}0009068\ kg.m^2$.

Измерване на тока на котвата

За измерване на тока I_a, преминаващ през котвената намотка на сервозадвижването, е използвана следната електрическа схема (фиг. 6).



***Фиг. 6** – Електрическа схема на стенда за идентификация на параметрите на двигателя*

Съгласно схемата, двигателят е свързан през сензора за ток ACS712. Модулът е базиран на ACS712ELCTR-30A интегрална схема с висока точност (bi-directional Hall-effect current sensor) и служи за измерване на ток от -30A до +30A. Изхода на сензора е свързан към GPIO33 на ESP32-VROOM-32D. Микроконтролера ESP32 разполага с 15 аналогови входа с 12-битова резолюция.

В микроконтролера е реализиран нискочестотен филтър (НЧФ). Според дефиницията на НЧФ, през него преминават сигнали с честота под честотата на среза, която се определя по формула:

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} \qquad (14)$$

където $\tau = R.C$ е времевата константа на веригата.

Срязващата честотата е $f = 1.5$ kHz, а коефициентът на усилване $K_u = 15$.

Експериментът е проведен при подадено напрежение на двигателя от 1 V, при което е получената средна стойност на тока в намотка на котвата е $I_a = 0.0087$ A

Определяне на електродвижещото напрежение

Електродвижещото напрежение (ЕДН) се определя по формулата:

$$E = K_w.\omega_1 \qquad (15)$$

За да се определи ъгловата скорост ω_1, към оста на серводвигателя бе закрепен магнит срещу който бе монтиран ротационен енкодер AS5600 12bit свързан с ESP32 по I2C интерфейс.

Експеримент беше извършено, когато към двигателя беше приложено напрежение $U_k = 4.8V$. По този начин бяха взети показания от сензора, резултатите бяха обработени в средата на Matlab.

Средната стойност на скоростта е скорост $\omega_1 = 1129.4\ rad/s \approx 179.77$rev/s. Според формула (4), при работа на постоянен токов двигател в установен режим $\frac{dI_a}{dt} = 0$, коефициентът K_w, се изчислява по формулата (16), където шунтиращото съпротивление е в Ω.

$$K_w = \frac{U_a - (R_a + R_ш)\cdot I_a}{\omega_1} \qquad (16)$$

където:U_a е напрежението на котвата; ω_1 е ъгловата скорост;- R_a е съпротивлението на котвената намотка; $R_ш$ е шунтовото съпротивление; I_a е токът на котвата.

Замествайки измерените стойности на тока на котвата $I_a = 0.0087$ A, скоростта на въртене на двигателя и съпротивлението на котвената намотка $R_a = 4.3789\,\Omega$, може да се получи коефициентът на пропорционалност между скоростта и ЕДС $K_w = 0.0042\ V.s/\mathrm{rad}$. Тогава ЕДС на двигателя ще бъде равно на $E = K_w.\omega_1 = 4.7532\ V$

В установен режим, коефициентът на вискозно триене на редуктора b_t може да се изчисли по следната формулата:

$$b_t = \frac{K_p \cdot M_d}{\omega_2} \tag{17}$$

Скоростта на вала след редуктора ω_2 бе определена по аналогичен метод, както при скоростта на вала на серводвигателя.

Средната стойност на скоростта е

$$\omega_2 = 5.82\ rad/s \approx 0.925\ rev/s.$$

Тогава предавателното отношение на редуктора $K_p = 194.05$, което съответства на стойността, посочена в техническите му характеристика. Замествайки намерените стойности във формула (17), коефициентът на вискозно триене на редуктора е: $b_t = 0.0583$

Измервания на блокиращия въртящ момент

Определяне на блокиращият въртящ момент

Блокиращият въртящ момент τ_s описва натоварването върху сервомотора в точката, в която скоростта на въртене става нула, което води до блокиране на мотора. Той носи информация за масата, която може да бъде преместена от мотора на определено разстояние и е полезен за оценка на очакваната производителност под натоварване.

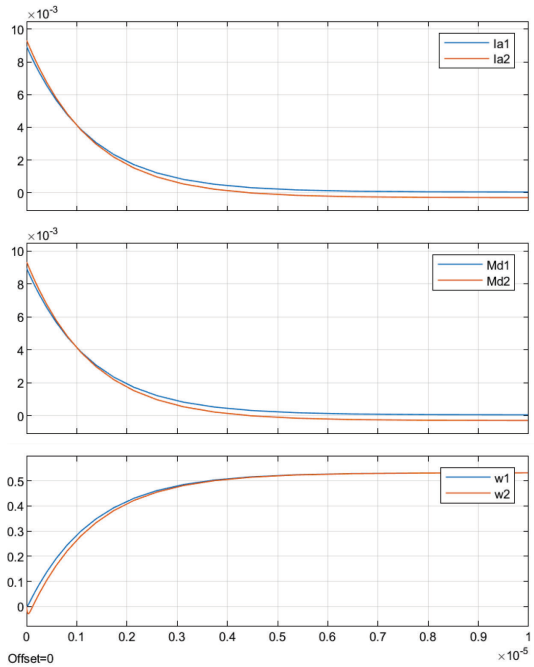
За измерване на базовия блокиращ момент на сервомеханизма бяха използвани калибрирани тежести, които се прикрепяха към свързано със сервото рамо (Фиг. 6). Рамото е с дължина 100 mm, което позволява използването на тежести с по-малка маса за постигане на блокиране. Допълнителните тежести се добавят през стъпка от 10 g, до момента в който моторът достигне точката на блокиране и не може повече да премества рамото в зададената зона θ показана на фиг. 6. Измерванията са проведени при напрежения от 4 V и 6 V, за да се провери линейността на k_T и да се осигури верификация на модела в установен режим.

След измерване на блокиращия въртящ момент τ_s, се изчислява константата на въртящия момент k_T на мотора. Познаването на k_T улеснява изчисляването на пиковия въртящ момент, като се използва пиковият ток I_p, измерен при застопорен мотор, за да се елиминира обратната ЕДС и да се получи точна оценка на натоварването.

$$\tau_p = I_p k_T \tag{18}$$

Оценка на модела на серводвигателя

За верификация на Simulink модела на серводвигателя бяха проведени експерименти при различни честоти и различни входни хармонични сигнали, идентични за модела и реалния серводвигател. Изследванията са направени при модел без симулиран товар и с товар. Резултатите от експериментите са показани на фиг. 7.

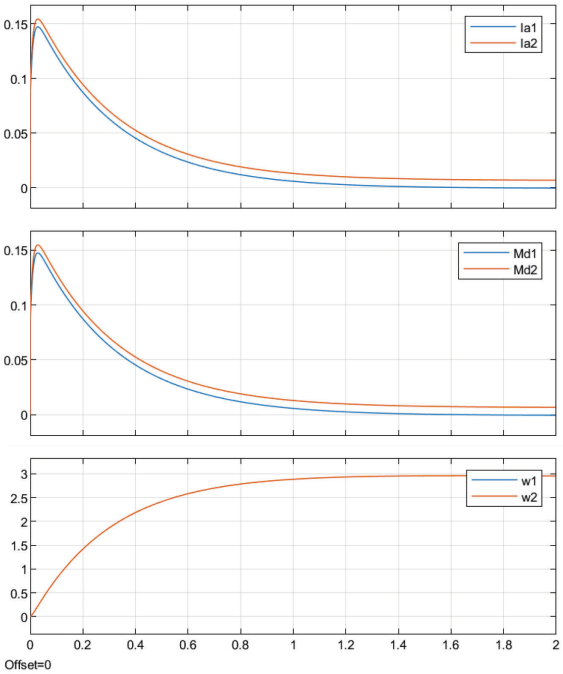


Фиг. 7 – Симулационни изследвания на модела при подаване на единично входно въздействие

От графиките е видно, че при наличие на товар двигателя консумира по-голям ток (I_{a2}). За да се установи коя част от серводвигателя е описана неточно – системата за управление или постояннотоковият двигател с редуктор, в средата на Simulink беше проведен експеримент с подаване на напрежение $U_a = 2.8\,\mathrm{V}$, съответстващо на това, подавано на постояннотоковия двигател при измерване на преминаващия през него ток на котвата.

При анализа на направените изследвания се констатира, че средната стойност на тока е $I_\mathrm{a} = 0.0087\,\mathrm{A}$, докато при модела на серводвигателя е $I_\mathrm{a} = 0.009\,\mathrm{A}$. Следователно, параметрите на системата за управление не са напълно точно определени. Параметрите на ПИД регулатора са определени чрез метода на най-малките квадрати, който както е известно, дава приблизителни стойности на търсените параметри.

На фиг. 8 е показан графикът на движението на серводвигателя, когато на установката е закрепен товар с маса 50 g и включен регулатор.



***Фиг. 8** – Движение на серводвигателя с товар и ПИД регулатор*

Както се вижда от фиг. 9, синята линия представлява движението без товар а червената – движението при натоварване с 20 грама. Основната разлика е в амплитудата: с товар амплитудата е по-малка в повдигнато положение и по-голяма в спуснато положение в сравнение с движението без товар.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статията е представено математическо описание на серво задвижването DM S2006MD и е създаден Simulink модел, базиран на него. Определени и измерени са следните характеристики на серводвигателя DM-S2006MD: индуктивност, съпротивление на котвената намотка, момент на инерция на вала на постояннотоковия двигател, въртящ момент на изходния вал на серводвигателя и консумирана мощност.

Разработен е стенд за идентификация на параметрите на сервомотор с постояннотоков двигател, базиран на микроконтролер ESP32. Синтезиран е математически модел на серводвигателя DM-S2006MD въз основа на измерените параметри. На базата на тези параметри са проведени експерименти с модела и с реалния двигател, последвани от сравнение.

Въз основа на резултатите от сравнението може да се заключи, че разликата между модела и серво задвижването се дължи основно на непълното математическо описание на серво задвижването.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Harprit Singh Sandhu, Running Small Motors with PIC Microcontrollers, McGraw Hill TAB; 1st edition (August 13, 2009)

[2] William S. Levine, The Control Handbook Control System Fundamentals, Second Edition,CRC press, 2011

[3] Tsyganov A.V., Bulychov O.I., Tsyganova Yu.V. *Parallel Hybrid Algorithms for the Parameter Identification Problem in Stochastic Linear Systems.* Ulyanovsk State University, 2011.

[3] Karel J. Keesman, *System Identification. An Introduction*, Textbook, Springer, 2011

[5] Riazollah Firoozian, *Servo Motors and Industrial Control Theory (Mechanical*

Engineering Series), Part of: Mechanical Engineering,Springer, Aug 6, 2014
[6] Austin Hughes and Bill Drury, *DC Motors, Speed Controls, Servo Systems: An Engineering Handbook,* Springer, 2013
[7] Klyuchev V.I., *Theory of Electric Drives.* - Moscov: "Energoatomizdat", 2001. – 105 p.
[8] Lee, S.H., *Modeling, identification and control of a DC-Servomotor*, Polytechnic Institute of New York University – N.Y., 2008. – 2 c.
[9] Beer, F.P., Johnston, E.R., Cornwell, P.J., *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, McGraw-Hill, 2012