

# КАСКАДНО УПРАВЛЕНИЕ НА АВТОМАТИЗИРАН ТРАНСМАНИПУЛАТОР

## CASCADE CONTROL OF AUTOMATED STORAGE/RETRIEVAL MACHINE

### КАСКАДНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СТЕЛЛАЖНОГО КРАНА-ШТАБЕЛЛЕРА

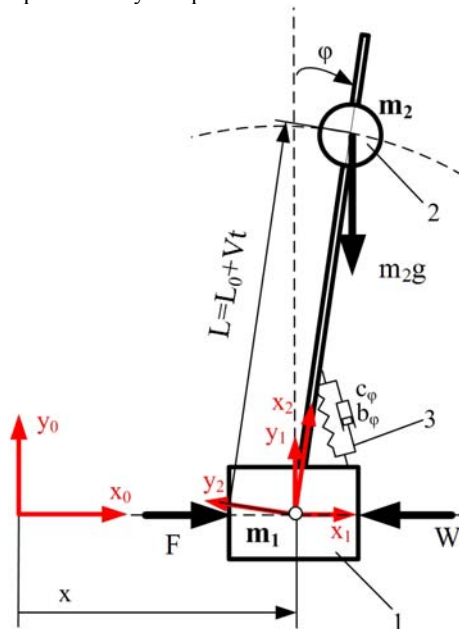
Assist.prof. dr.eng. Ruzhekov G.<sup>1</sup>, Msc.eng.Kalinkov S.<sup>2</sup>, Assist. prof. dr.eng.Mitrev R.<sup>3</sup>, Prof.dsc.eng. Petkov P.<sup>1</sup>  
 Faculty of Automatics<sup>1</sup>, Faculty of Electronic Engineering and Technologies<sup>2</sup>, Faculty of Mechanical Engineering<sup>3</sup> – Technical University of Sofia, Bulgaria

**Abstract:** The present work is devoted to Matlab/Simulink modeling of the cascade control system for control of automated storage/retrieval machine. Based on the developed mathematical model of the mechanical system, mathematical model of the control system is proposed and s-function for modeling of the system behavior is created. A study of the open system is conducted and closed system with velocity and position contours is synthesized. A simulation experiments are conducted and received results are analyzed.

**KEYWORDS:** STORAGE/RETRIEVAL MACHINE, CASCADE CONTROL, SIMULATION MODELLING

### 1. Въведение

Целта на настоящата работа е да се разработи система за каскадно управление на трансманипулатор, базирана на механо-математичен модел на трансманипулатор, предложен и подробно описан в [1] и [2]. На фиг.1 е показан динамичният модел на трансманипулатора.



фиг.1. Двумасов динамичен модел на трансманипулатор с две степени на свобода

В предложения модел движението на товара по височина на колоната е кинематично определено, като изминатия път по височината и път се задава чрез подходяща функция на времето или други параметри. Това позволява да се отчетат инерционните, кориолисовите и центробежните сили от движението на товара по височина на колоната. Еластичността на колоната е представена посредством идеализиран еластичен елемент, притежаващ ъглови еластодемпфиращи параметри  $c_\varphi$  и  $b_\varphi$ , пресметнати по изложената в [1] методика. Означенията в динамичния модел на фиг. 1 са следните: 1-точкова маса, състояща се от масата на опорната рама и добавената към нея част от масата на колоната; 2 – точкова маса, представляваща товара и добавената към нея част от масата на колоната; 3- еластодемпфиращ елемент, репрезентиращ еластичните и дисипативните характеристики на колоната. Параметрите  $c_\varphi$  и  $b_\varphi$  са променливи и са зададени като функция на височината на колоната. За посоченото разположение на локалните  $(XY)_j$  и отправната  $(XY)_0$

координатни системи, векторът на обобщените координати, които отчитаме от равновесното положение на системата, има следният вид:

$$\{q\} = \{x \ \varphi\}^T$$

където чрез  $x$  е означено линейното преместване на началото на локалната координатна система  $(XY)_1$  спрямо неподвижната координатна система, а чрез  $\varphi$  е означено ъгловото преместване на масата  $m_2$  спрямо вертикалната ос на неподвижната координатна система. Въведени са още следните означения:  $F$  - задвижващата сила за хоризонтално движение на машината;  $W$  - съпротивителна сила при движение;  $L_0$  - минимална височина на товара;  $V$  - скорост на равномерно движение на товара.

### 2. Математично моделиране на системата за каскадно управление

Системата диференциални уравнения, описваща движението на елементите на механичната система е изведена в [1]. При равномерно движение на товара по височина на колоната, след извършените опростявания и преобразования придобива следният вид:

$$(1) \quad \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2 \cos(\varphi)(L_0 + V.t) \\ m_2 \cos(\varphi)(L_0 + V.t) & m_2(L_0 + V.t)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \varphi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 [\cos(\varphi)\dot{\varphi}.V - \sin(\varphi)\dot{\varphi}^2(L_0 + V.t)] \\ m_2.V [\cos(\varphi)\dot{x} + 2\dot{\varphi}(L_0 + V.t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F - W \\ m_2 g \cdot \sin(\varphi)(L_0 + V.t) \end{bmatrix}$$

Изследването на динамичните характеристики на обекта се извършва в среда на Simulink на програмния пакет MATLAB [4]. За целта е разработена S-функция, чрез която се моделира обекта на базата на системата нелинейни диференциални уравнения (1). Системата диференциални уравнения (1) се записва като:

$$(2) \quad M \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} + N \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} x_p \\ \varphi \end{bmatrix} + Q = S$$

където

$$M = \begin{bmatrix} m_1 + m_2 & m_2(L_0 + x_{m_2})\cos(\varphi) \\ m_2(L_0 + x_{m_2})\cos(\varphi) & m_2(L_0 + x_{m_2})^2 \end{bmatrix};$$

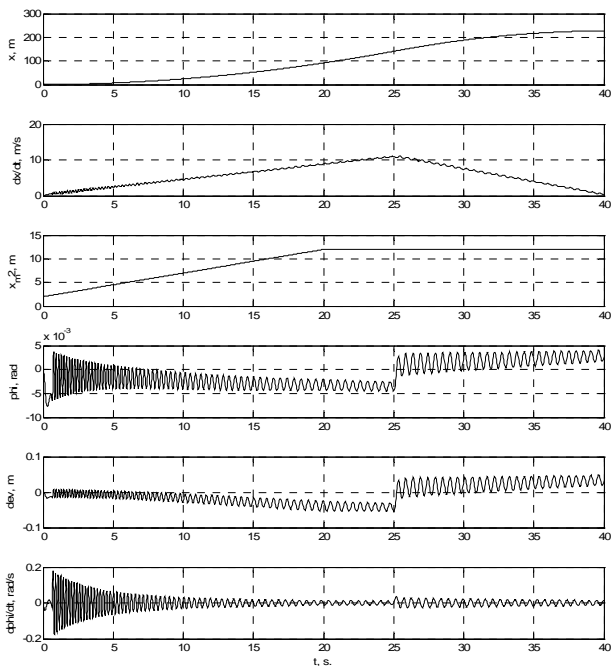


При  $case = 3$ : изчислява се изхода на функцията, като към променливите на състоянието се добавя положението на товара  $x_{m2}$ . Необходимо е да се отбележи, че стойностите на променливата  $case = 2, 4, 9$  не се използват при изчисляването на производните или изхода. Така разработената s-функция е в основата на Simulink модел, който служи за база при разработване на системата за управление. На фиг. 2. е показан Simulink модела на системата в отворен контур. Блокът "Actuator" отразява динамиката на хоризонталното задвижване. Нормално, това е сервосистема, която работи по зададен режим. При тези експерименти сервосистемата е симулирана за работа при константен въртящ момент (респективно кинстантна задвижваща сила  $F$ ). Константата  $V$  е скоростта на движение на товара и за симулационните експерименти е избрана равна на 0.5 m/s. Блокът  $s\_car$  представлява описаната по-горе s-функция и отразява динамиката на системата. Изходът на s-функцията е векторът на състоянието:  $x_p$  – положението по хоризонтала  $x$ ;  $phi$  е ъгъла  $\varphi$ ;  $dx\_pdt$  е скоростта  $\dot{x}$ ;  $dphid$  е ъгловата скорост  $\dot{\varphi}$ ,  $x_{m2}$  е положението на товара във вертикална посока. Тези величини са изведени в отделни графики и могат да бъдат наблюдавани в процеса на симулация на системата.

Важен параметър на механичната система, до голяма степен определящ технико-икономическите показатели на трансманулатора, е отклонението на товара в хоризонтално направление. Това отклонение има стойност  $dev = x_{m2} \cdot \sin(\varphi)$  и се пресмята чрез блоковете в долната дясна част на схемата.

Основните изходни величини, както и симулационното време се извеждат в масивите  $out$ ,  $u\_tau$  и  $t$ . На входа на системата се подава управляващо въздействие 4000 Nm за първите 25 сек., след което -4000 Nm. През първия интервал трансманулаторът се ускорява, а през втория се забавя и спира. На фиг.3 са показани резултатите от симулационните експерименти.

На първата графика е показан изминатия път (хоризонталното положение  $x_p$ , на втората - скоростта  $dx/dt$ , на третата – височината на товара, на четвъртата - отклонението от верикалата  $phi$ , на петата - хоризонталното отклонение на товара и на шестата ъгловата скорост  $dphid$  ( $\dot{\varphi}$ ).



фиг.3 Резултати от симулационните експерименти

Въз основа на резултатите от симулацията на отворената система могат да бъдат направени следните изводи:

- Получените трептения на товара е необходимо да бъдат намалени чрез системата за управление, особено в момента на спиране с цел точно позициониране на товара спрямо стелажната клетка и минимално време на затихване на трептенията;

- Необходимо е да бъде въведено ограничение в скоростта на хоризонталното движение на трансманулатора, тъй като при голяма задвижваща сила може да бъде превишена пределно допустимата скорост на движение;

- Спирането трябва да бъде извършено без пререгулиране, само с използване на основното задвижване в режим на спиране (не е предвидено участие на механична спирачка при спиране).

- Придвижването на товара по дължина на коридора трябва да става за възможно най-кратко време.

Направените изводи от симулацията на отворената система всъщност дефинират изискванията към системата за управление.

Предлага се системата за управление да има следната структура фиг.4. – по [3],[5]. Системата за управление се състои от два каскадно свързани регулатора: CV – регулатор по скорост, чието предназначение е да поддържа зададената скорост  $V$ . Неговата обратна връзка е по скоростта на трансманулатора  $\dot{x}$ ; CP – регулатор по положение, който генерира траектория за движение и задава скоростта.

### 2.1 Затворена система за управление със затворен контур по скорост

Въз основа на отворената система от фиг. 2 и показаната структурна схема на фиг.4 е разработена затворена система с регулатор по скорост (фиг.5). На схемата се вижда добавения PI (Пропорционално-Интегрален) регулатор, на входа на който се подава разликата между скоростта ( $dx\_pdt$ ,  $\dot{x}$ ) и зададената скорост на движение в хоризонтално направление.

Блок схемата на PI регулатора е показана на фиг. 6. Този регулатор е реализиран съгласно следната предавателна функция:

$$(5) \quad W(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right)$$

В схемата на регулатора е въведена допълнителна блокировка за интегралното насищане – при достигане на насищане на изхода на регулатора (по-голям от 4000 N) натрупването на интегралната съставка се блокира – към интегратора се подава константа '0'. Това осигурява правилната работа на регулатора в линеен режим. Изходът на регулатора (задвижващата сила за хоризонтално преместване  $F$ ) чрез блока 'Saturation 1' е ограничен до  $\pm 4000$  N, което представлява максимално допустимата сила за хоризонтално преместване.

Симулационните експерименти със системата се провеждат с тестов сигнал (горния ляв ъгъл на схемата от фиг. 5), който представлява сума от два стъпаловидни сигнала съгласно. Този сигнал представлява заданието по скорост на системата: достигане до скорост 1 m/s, поддържане на тази скорост до време 60 сек., след което следва спиране – скорост до 0 m/s.

На фиг.6, фиг.7 и фиг.8 са показани резултати от симулацията на системата за стабилизация на скоростта. Въведени са следните означения:

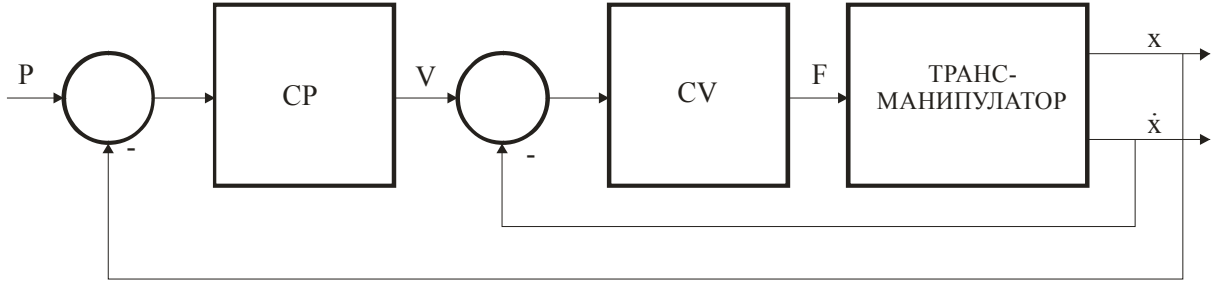
- Movement:  $x$ , m – текущото положение във времето (движението) на трансманулатора;
- Velocity:  $dx/dt$ , m/s – скорост на трансманулатора във времето;
- Load Position,  $x_{m2}$ , m – положение на товара във вертикална посока;
- Force, N – сила за хоризонтално придвижване;
- Deviation:  $dev$ , m – отклонение на товара в хоризонтално направление.

От извършения симулационен експеримент могат да бъдат направени следните изводи:

- Нарастването на скоростта от 0 до 1 m/s се извършва в рамките на 5sec., с незначително пререгулиране. Необходимата задвижваща сила за хоризонталното преместване не надвишава предварително зададената стойност от 4000 N.

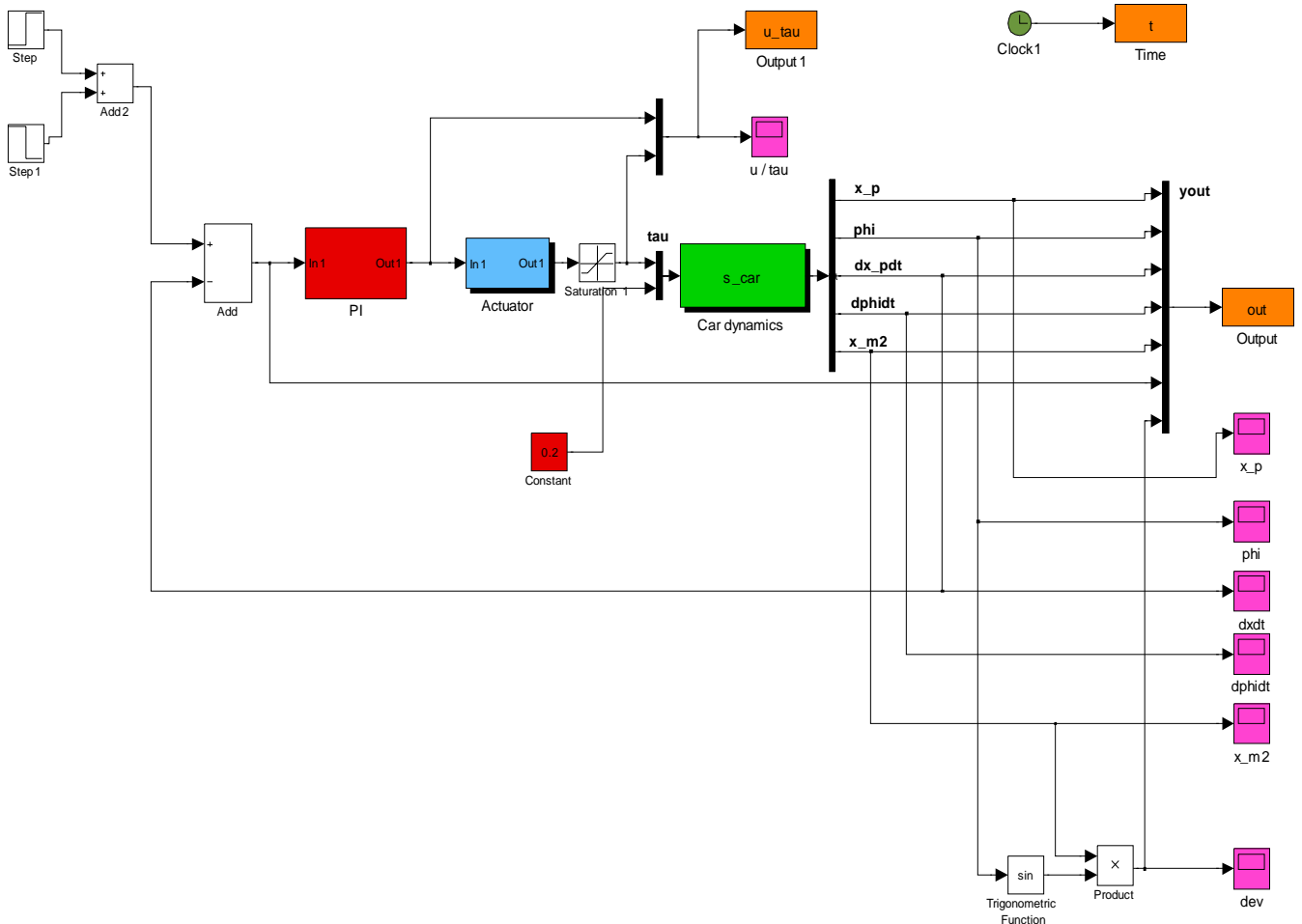
- По време на движението скоростта се поддържа с висока точност, независимо от наличието на трептливо движение на товара.

- Спирането се извършва в рамките на 5 – 6 сек., като отклонението на товара (избран е най-неблагоприятният случай, при който товарът се намира на максимална височина) е около 5 см. в момента на спиране и в рамките на още няколко секунди трептенията напълно затихват.

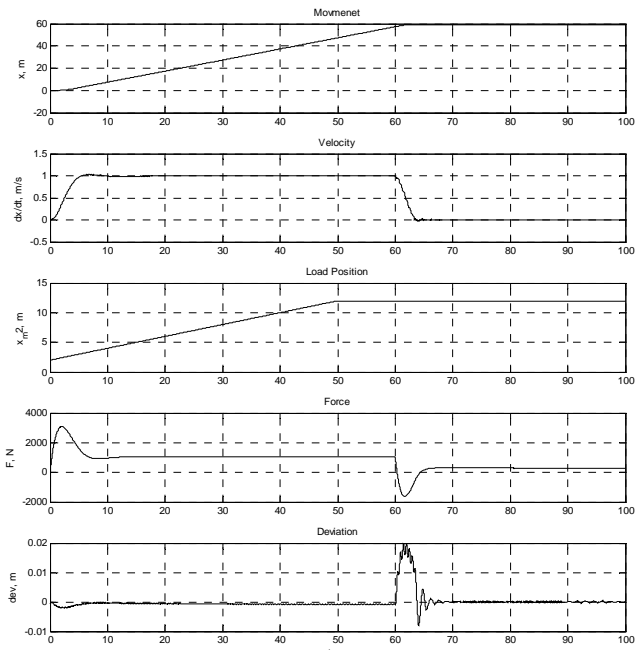


фиг.4 Структура на системата за управление

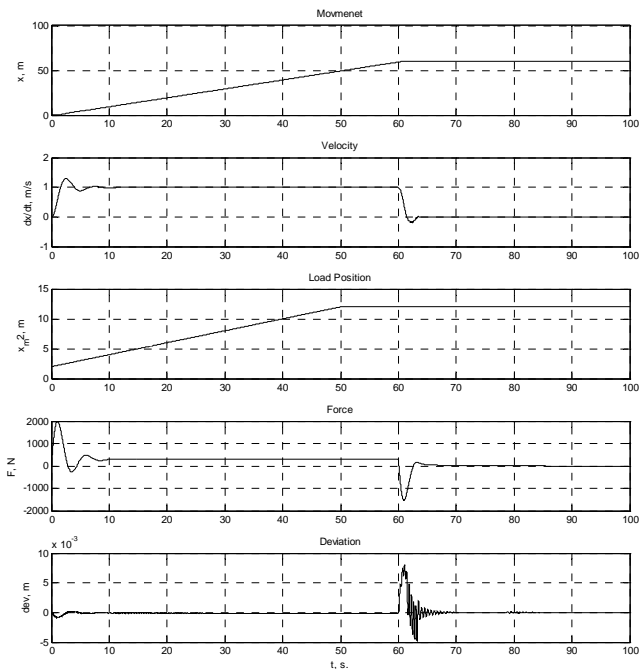
### Closed Loop Control System : Speed Control



фиг. 5. Система за управление на трансманипулатор – контур за управление по скорост



фиг. 6. Резултати от тест на системата за стабилизация на скоростта:  $m_2 = 6000 \text{ kg}$ ,  $K_p = 3800$ ,  $T_i = 10$ .



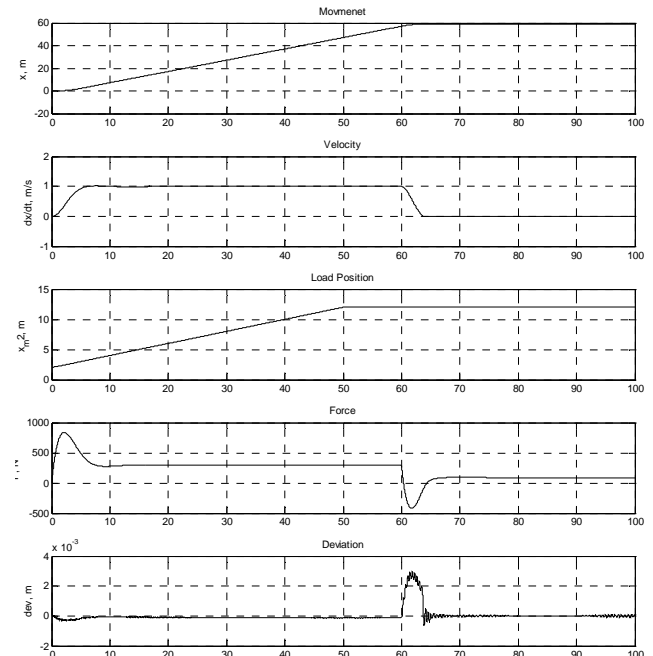
фиг.7 Резултати от тест на системата за стабилизация на скоростта:  $m_2 = 1000 \text{ kg}$ ,  $K_p = 3800$ ,  $T_i = 10$

Получените резултати са при максимален товар от 6000 кг. Промяната на теглото на товара в процеса на експлоатация на машината представлява основен смущаващ фактор в системата за управление, като вследствие на това параметрите на регулатора трябва да се променят при промяна на теглото на товара. На фиг. 9 е показана работата на системата при товар с маса 1000kg. Вижда се, че при потегляне и спиране се получава значително пререгулиране.

В този случай може да се извърши промяна на коефициента на пропорционалност  $K_p$  се намалява, както е показано на фиг. 10. В този случай пререгулирането практически отсъства.

## 2.2 Затворена система за управление със затворен контур по положение

Съгласно фиг. 4. се въвежда регулатор по положение, който задава скоростта за придвижване на трансманипулатора. Блоквата схема представлява разширение на схемата от фиг. 5. и е представена на фиг. 9. Регулаторът по положение е P – регулатор, изхода на който е ограничен в интервала  $\pm 1 \text{ m/s}$ . Изходът на този регулатор представлява заданието по скорост, което се подава на PI регулатора (фиг.5 и фиг.6). За провеждане на тест на входа на системата се генерира задание за положение съгласно фиг. 10. В този случай заданието на регулатора е преместване на 50 м, изчакване, от 60-та секунда връщане до положение 30 м.



фиг. 8. Резултати от тест на системата за стабилизация на скоростта:  $m_2=1000\text{kg}$ ,  $k_p=1000$ ,  $T_i=10$

## 3. Резултати и дискусии

Резултатите от проведения симулационен експеримент посредством създадения модел на системата за управление са показани на фиг. 11 и фиг.12., като е симулирана следната последователност от действия: преместване на позиция 50m., спиране, връщане на позиция 30m. На графиките са означени зоните в които трансманипулаторът потегля и спира. Анализът на представените резултати позволява да бъдат направени следните изводи:

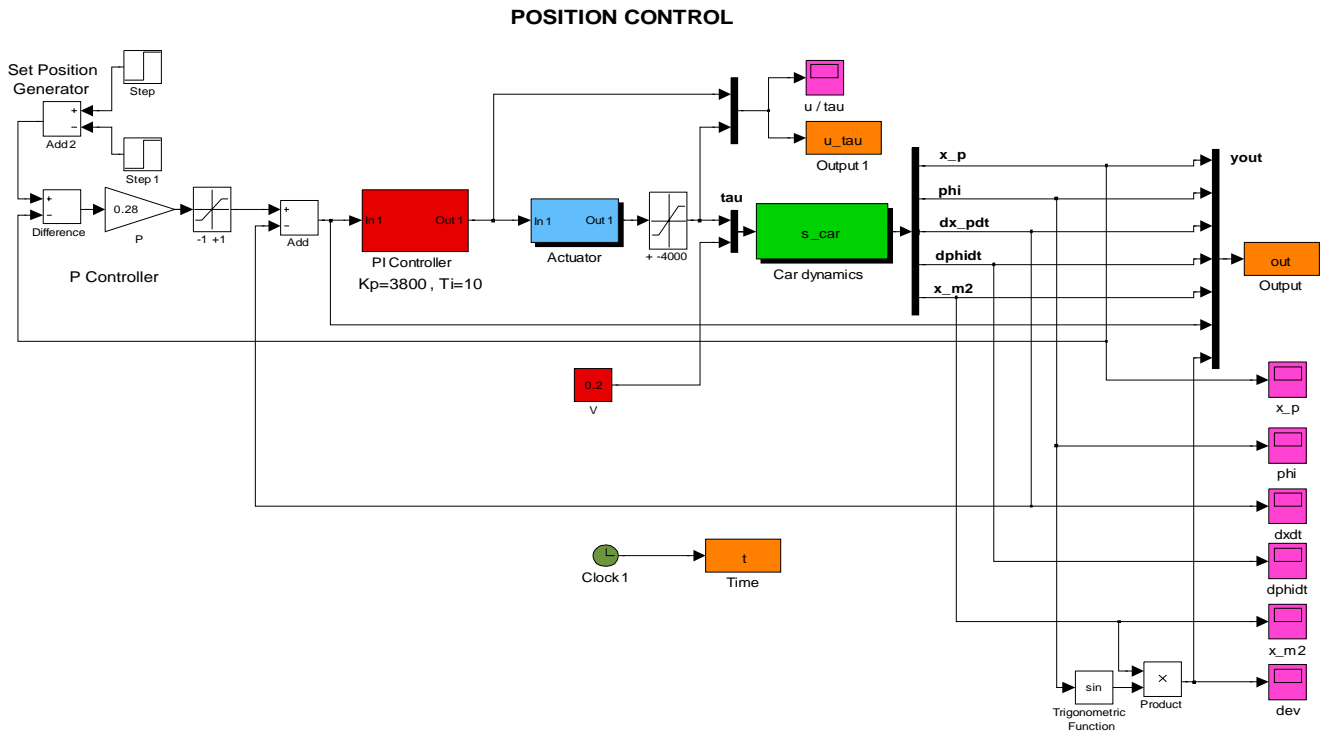
- Нарастването на скоростта на хоризонталното движение на трансманипулатора от 0 до 1m/s се извършва в рамките на 5-6sec., с незначително пререгулиране. Необходимата задвижваща сила за хоризонталното преместване не надвишава 3000N и е по-малка от зададената максимална стойност от 4000N;

- По време на движението скоростта се поддържа с висока точност, независимо от движението на товара във вертикална посока (в случая придвижването на товара във вертикална посока се извършва само в началото, след което товара остава на възможно най-голямата височина);

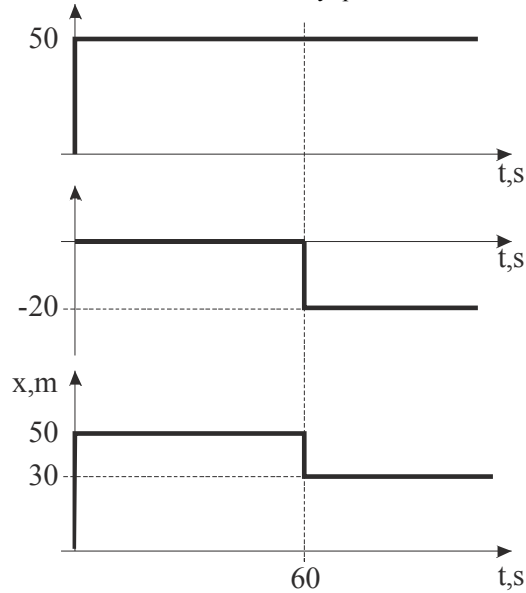
- Спирането се извършва в рамките на 5-6sec., като амплитудата на трептенията на товара в момента на спиране е около 12mm., което позволява придвижване на товара към стелажната клетка без изчакване на затихването на трептенията;

- Позициониране на трансманипулатора се извършва с грешка около 30mm., което е достатъчно за конкретния случай;

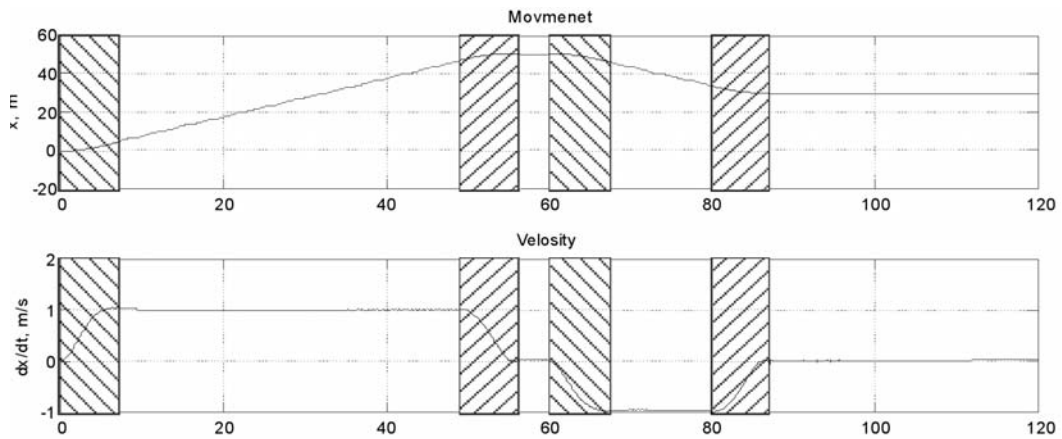
- P – регулаторът определя динамиката и точността на позициониране на трансманипулатора. Настройката на този регулатор се свежда само до задаване на един коефициент, което е съществено предимство за този тип регулатори.



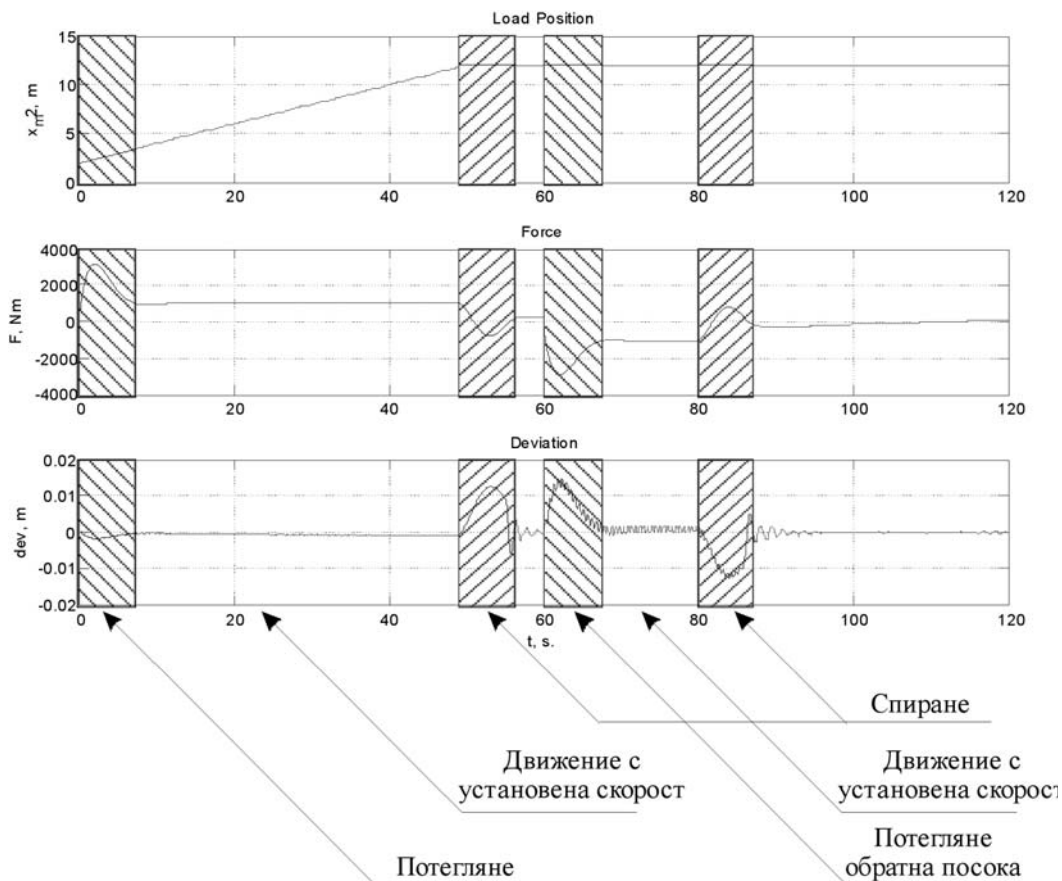
фиг. 9 Блокова схема на система за управление по положение



фиг. 10. Задание на регулатора по положение



Фиг.11. Резултати от симуляция на системата за позициониране.  
Позиция и скорост на трансманипулатора



фиг. 12. Резултати от симулация на системата за позициониране.  
Положение на товара, задвижваща сила и отклонение на товара от вертикалата

достигане до зададено положение отговаря на предварително зададена стойност.

#### 4. Заключение

В резултат на извършените изследвания могат да бъдат направени следните изводи:

- На базата на математически модел на трансманипулатор е разработена S-функция, работеща в среда Matlab и Simulink;
- Разработена е Simulink схема, чрез която се изследва поведението на отворената система при зададени конкретни стойности на параметрите на модела на трансманипулатора;
- Разработен е PI – регулатор с ограничение в изхода за стабилизация на скоростта на движение на трансманипулатора. Извършени са изследвания относно преходните процеси при потегляне и спиране, разгледано е отклонението на товара във възможно най-тежкия случай и е показано, че тази система е в състояние да управлява напълно задоволително скоростта на трансманипулатора и може да се използва като част от каскадна система за управление по положение.
- Разработен е P – регулатор на положение с ограничение в изхода, който представлява част от каскадна система за управление. Изходът на този регулатор представлява задаването по скорост на вътрешния контур, управляващ скоростта на трансманипулатора.
- Извършени са симулационни изследвания на системата като цяло, като са показани графиките от поведението на системата в режим на ускорение, движение с постоянна скорост и спиране в режим на задаване на положение за преместване на трансманипулатора. Показани са преходните процеси в режим на ускоряване и спиране, необходимата задвижваща сила, както и отклонението на товара. Анализът на получените резултати показва, че всички параметри са в допустимите интервали, като времето за

#### 5. Литература:

1. Митрев Р., С. Калинков., Г. Ружеков, Механо-математично моделиране на хоризонталното движение на трансманипулатор с неуправляемо електрозадвижване. Българско списание за инженерно проектиране, бр. 1, 2008г., стр.127-135.
2. Калинков С, Р. Митрев, Г. Ружеков, Симулационно моделиране и изследване на трансманипулатор с управляемо електрозадвижване. Механика на машините, книга 3 (82) 2009г., стр.7-78, ТУ-Варна.
3. Gross H., J. Hamann, G. Wiegartner. Electrical Feed Drives in Automation, MCD Corporate Publishing, Erlangen and Munich, 2001.
4. MATLAB and Simulink. The Math Works, Inc. Natick, MA, USA, 2001.
5. Hughes A., Electric Motors and Drives. Elsevier Ltd, Oxford, 2006.