

# Българско списание за Инженерно ПРОЕКТИРАНЕ

брой №28, януари 2016г.

## ЦЕЛ И ОБХВАТ

„Българско списание за инженерно проектиране” е периодично научно списание с широк научен и научно-приложен профил. Целта му е да предостави академичен форум за обмен на идеи между учените, изследователите, инженерите, потребителите и производителите, работещи в областта на машиностроенето, транспорта, логистиката, енергетиката, технологиите, съвременното компютърно проектиране, а също така и в областта на различни интердисциплинарни научни и научно-приложни проблеми. Издателите приветстват научни публикации с високо качество и значими научни, научно-приложни и творчески приноси.

## РЕДАКЦИОННА КОЛЕГИЯ

### Председател

**Б. Григоров**, ТУ-София, България

<b>М.Т.Георгиев</b>	ТУ-София, България	<b>К.Деметрашвили</b>	ТУ, Тбилиси, Грузия
<b>Г.Дюкенджиев</b>	ТУ-София, България	<b>С.Симеонов</b>	ТУ, Бърно, Чехия
<b>М.Денчев</b>	ТУ-София, България	<b>В.Николич</b>	Университет в Ниш, Сърбия
<b>И.Малаков</b>	ТУ-София, България	<b>А.Янакиев</b>	Nottingham Trent University, UK
<b>П.П.Петров</b>	ТУ-София, България	<b>Н.Чернев</b>	University of Auvergne, France
<b>В.Панов</b>	ТУ-София, България	<b>В.Лepadatescu</b>	Transilvania University of Brashov, Romania
<b>М.З.Георгиев</b>	ТУ-София, България	<b>N.Zrnic</b>	University of Belgrad, Serbia
<b>Н.Л.Николов</b>	ТУ-София, България	<b>M.Jovanovic</b>	University of Nish, Serbia
<b>М.Георгиев</b>	МГТУ Станкин, Москва, Россия	<b>D.Michalopoulos</b>	University of Patras, Greece
<b>В.Христов</b>	ЮЗУ „Н.Рилски” Благоевград, България	<b>N.Kubota</b>	Tokyo Metropolitan Univer- sity, Japan
<b>Ch.Apostolopoulos</b>	University of Patras, Greece	<b>С.Емельянов</b>	Юго-Западный гос. уни- верситет, Курск, Россия
<b>Л.Червяков</b>	Юго-Западный гос. уни- верситет, Курск, Россия	<b>В.Спасов</b>	ВТУ „Т.Каблешков“, Со- фия, България
<b>О.Лисовиченко</b>	Национален технически университет, Украйна	<b>В.Кирилович</b>	Житомирски държавен технологичен университет, Украйна

### Редактор

**Р.Митрев**, ТУ-София, България

**Издател:** Машиностроителен факултет, Технически университет-София. ISSN 1313-7530; **Адрес на редакцията:** София, бул.Климент Охридски №8, Технически Университет-София, бл.4, Машиностроителен факултет; **Електронна версия:** [bjed.tu-sofia.bg](http://bjed.tu-sofia.bg).  
Списание то се индексира в Index Copernicus: [www.indexcopernicus.com](http://www.indexcopernicus.com)

# Bulgarian journal for **Engineering Design**

**issue №28**, January 2016

## AIM AND SCOPE

Bulgarian Journal for Engineering Design is a periodical scientific issue covering wide scientific and application areas of engineering activities. The aim of the journal is to provide an academic forum for exchange of ideas and information between scientists, engineers, manufacturers and customers working in the spheres of mechanical engineering, transport, logistics, power engineering, modern computer – aided design and technology and solving different interdisciplinary scientific and applied problems. The editors welcome articles of substantial quality bearing significant contribution to the engineering knowledge.

## EDITORIAL BOARD

### Chairman

**B.Grigorov**, TU-Sofia, Bulgaria

<b>M.T.Georgiev</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>K.Demetrashvili</b>	TU, Tbilisi, Georgia
<b>G.Diukendzhiev</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>S.Simeonov</b>	TU, Brno, Czech Republic
<b>M.Denchev</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>V.Nikolich</b>	Nish university, Serbia
<b>I.Malakov</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>A.Ianakiev</b>	Nottingham Trent University, UK
<b>P.P.Petrov</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>N.Chernev</b>	University of Auvergne, France
<b>V.Panov</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>B.Lepadatescu</b>	Transilvania University of Brashov, Romania
<b>M.Z.Georgiev</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>N.Zrnic</b>	University of Belgrad, Serbia
<b>N.L.Nikolov</b>	TU-Sofia, Bulgaria	<b>M.Jovanovic</b>	University of Nish, Serbia
<b>M.Georgiev</b>	MGTU Stankin, Moscow, Russia	<b>D.Michalopoulos</b>	University of Patras, Greece
<b>V.Hristov</b>	SWU „N.Rilski” Blagoevgrad, Bulgaria	<b>N.Kubota</b>	Tokyo Metropolitan University, Japan
<b>Ch. Apostolopoulos</b>	University of Patras, Greece	<b>S.Emelianov</b>	South West State University, Kursk, Russia
<b>L.Cherviakov</b>	South West State University, Kursk, Russia	<b>V.Spassev</b>	VTU „T.Kableshkov“, Sofia, Bulgaria
<b>O.Lisovychenko</b>	National technical university, Ukraine	<b>V.Kirilovich</b>	Zhytomyr state technological university, Ukraine

### Editor

**R.Mitrev**, TU-Sofia, Bulgaria

**Publisher:** Mechanical Engineering Faculty, Technical University-Sofia. ISSN 1313-7530; **Publisher Address:** Bulgaria, Sofia, Kliment Ohridski blvd. №8, Technical University-Sofia, Mechanical engineering faculty; **Electronic version:** [bjed.tu-sofia.bg](http://bjed.tu-sofia.bg).

The journal is indexed in Index Copernicus: [www.indexcopernicus.com](http://www.indexcopernicus.com)

## СЪДЪРЖАНИЕ

<b>Относно влиянието на свободно окачен товар върху динамиката на механизъм за пътуване.....</b>	<b>5</b>
Р.Митрев, Б.Григоров	
<b>WEB базирана виртуална логистична складова система за повишаване на конкурентноспособността на малките и средни предприятия.....</b>	<b>15</b>
Д.Туджаров, Н.Казаков	
<b>Системный подход к синтезу роботизированных механосборочных технологий в гибких производственных ячейках.....</b>	<b>26</b>
В.Кирилович	
<b>Метод за обмен на данни между персонален компютър и развойна платка Basys2 .....</b>	<b>41</b>
И.Тиньоков, В.Христов	
<b>Математическо моделиране на динамичното поведение на транспортно средство с свободно окачен товар при удар в буфер .....</b>	<b>49</b>
Р.Митрев, Б.Григоров, И.Минин	
<b>WEB базиран калкулатор на кинематичните характеристики на участващи в ПТП транспортни средства .....</b>	<b>59</b>
Р.Митрев, Б.Туджаров, Д.Колева	

---



## ОТНОСНО ВЛИЯНИЕТО НА СВОБОДНО ОКАЧЕН ТОВАР ВЪРХУ ДИНАМИКАТА НА МЕХАНИЗЪМ ЗА ПЪТУВАНЕ

**Росен МИТРЕВ Божидар ГРИГОРОВ**

катедра „Инженерна логистика, подземно-транспортна и строителна техника”,

Технически университет - София, България

e-mail: [rosenm@tu-sofia.bg](mailto:rosenm@tu-sofia.bg), [b.grigorov@tu-sofia.bg](mailto:b.grigorov@tu-sofia.bg)

**Резюме:** В работата е предложен двумасов динамичен модел с две степени на свобода на транспортно средство със свободно окачен товар. Моделът позволява да се изследва влиянието на параметрите на окачения товар върху кинематичните параметри на системата и по-специално на транспортното средство. Сравнението с класическия едномасов модел показва, че той не винаги дава точни резултати относно видът на промяна на скоростта и ускорението на транспортното средство, а също така и относно ускорението в началния момент от време. Също така, е възможна комбинация на параметри на механичната система, за които ускорението, пресметнато чрез модела с една степен на свобода е по-ниско от допустимото, но при отчитане на разлюляването на товара ускорението надвишава допустимото.

**Ключови думи:** транспортно средство, свободно окачен товар, динамика

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Механизмите за постъпателно движение на различни видове транспортни средства са основни механизми осигуряващи подвижността на съоръженията в една, две или повече посоки, като по този начин формират необходимия работен обем. Пресмятането и избора на елементите на тези механизми - двигатели, редуктори, ходови колела и пр. се извършва в съответствие с разработени процедури и включват статичен и динамичен анализ.

Динамичните изчисления на линейно движение се транспортни средства се извършват основно поради следните причини: 1) при избран двигател се извършва проверка на действителното ускорение при потегляне или спиране и сравняването му със зададено допустимо такова; 2) избор на двигател и трансмисия така, че ускоренията да бъдат по-малки от зададено допустимо ускорение; 3) установяване на натоварването на елементите в трансмисиите на машините, предимно в преходните режими на работа. Допустимото ускорение се задава най-често от условието за отсъствие на буксуване [1], но може да бъде зададено и от други съображения – например в зависимост от вида на товара (течни или взривоопасни товари), както и за ограничаване на натоварването в трансмисията [5,6].

Възприетите процедури за пресмятане и избор на елементите използват динамични изчисления, при които машината се представя чрез едно линейно движещо се или въртящо се тяло с една степен на свобода, към което са приложени двигателна и съпротивителна сили [1,2]. Тук масата на движещия се обект е приведена маса, включваща както линейно движещите се елементи, така и въртящите се такива. Този модел възпроизвежда с голяма точност поведението на реалната система единствено когато товарът е твърдо закрепен към транспортното средство и неговата маса се добавя към собствената маса на последното. В случаите обаче на свободно окачен товар, например чрез въже или лостова система, преместването (вследствие на ускорителните процеси) предизвиква разлюляване на товара и значително променя характера на движението на механичната система. В този случай, следва да се премине към по-точен двумасов динамичен модел, чрез който да се отчете окачването на товара. Някои публикации [3,7] теоретично изследват влиянието на разлюляването върху постъпателното движение, но при линеаризация на моделите и други опростявания и допускания.

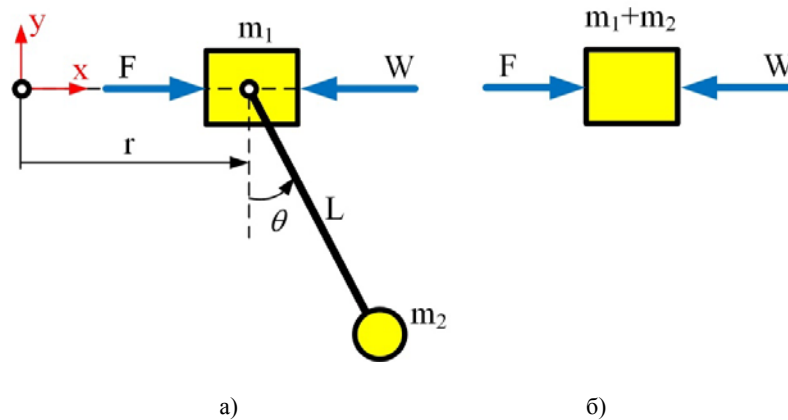
По-задълбочено изследване на поведението на такъв тип механична система е възможно чрез прилагане на CAD/CAE програмни продукти [4] или чрез изследване на по-сложни двумасови динамични модели, чрез които да се отчете на-

личието на свободно окачен товар. Сравняването на резултатите, получени от изследването на модели с една и с две степени на свобода ще покаже доколко точен е в този случай широко използваният в инженерната практика класически едномасов модел с една степен на свобода.

## 2. ДИНАМИЧЕН МОДЕЛ НА ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО СЪС СВОБодно ОКАЧЕН ТОВАР

Ако се абстрахираме от ненужните за целите на изследването характеристики на системата транспортно средство-товар, то транспортното средство се схематизира като точкова маса с го-

лемина  $m_1$ , а товарът като точкова маса с големина  $m_2$ , окачена към безтегловно недеформируемо въже с дължина  $L$ . Приема се, че върху транспортното средство действа съпротивителна сила  $W$ , пропорционална на теглото на цялата система [2]. Динамичният модел е двумасов, с две степени на свобода, като положението на масите се описва чрез две релативни координати – позицията на масата  $m_1$  се описва спрямо неподвижна координатна система  $xu$  чрез обобщена линейна координата  $r$ , а ъгловото завъртане на въжето – чрез ъгъл  $\theta$ , измерван спрямо вертикалната ос през точката на окачване на въжето – фиг. 1а).



фиг.1 Динамични модели на системата: а) двумасов; б) едномасов

Абсолютните декартови координати на точковите маси спрямо неподвижната координатна система (фиг. 1а) се определят чрез обобщените координати по следния начин:

- 1) Координати на маса 1,  $x_1 = r, y_1 = 0$ ;
- 2) Координати на маса 2,  $x_2 = r + L \sin \theta, y_2 = -L \cos \theta$ ;

Чрез диференциране спрямо времето на получените изрази се получават абсолютните скорости на масите:  $\dot{x}_1 = \dot{r}, \dot{y}_1 = 0, \dot{x}_2 = \dot{r} + L\dot{\theta} \cos \theta, \dot{y}_2 = L\dot{\theta} \sin \theta$ .

Диференциалните уравнения на движение, описващи движението на всяка от масите по съответната обобщена координата се получават чрез уравненията на Лагранж от втори род, които

в случая имат следният вид (без отчитане на приложените външни сили):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial K}{\partial r} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

където чрез  $K$  е означен лагранжианът на системата.

Кинетична енергия на системата  $T$  се формира от сумата на кинетичните енергии на двете маси:

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (2)$$

След заместване на изразите за скоростите на масите в (2) и опростяване на получения израз, кинетичната енергия придобива следният вид:

$$T = 0.5(m_2 l^2 \dot{\theta}^2 + 2lm_2 \cos \theta \dot{r} \dot{\theta} + (m_1 + m_2) \dot{r}^2) \quad (3)$$

Потенциалната енергия на системата се формира единствено от сумата на потенциалната енергия на силата на тежестта на двете маси:

$$\Pi = m_1 g y_1 + m_2 g y_2 \quad (4)$$

Отчитайки и изразите за  $y$ -координатите на двете маси, за потенциалната енергия на системата се получава:

$$\Pi = -m_2 g L \cos \theta \quad (5)$$

Лагранжианът на системата е:

$$K = T - \Pi \quad (6)$$

Замествайки в (6) изразите за потенциалната и кинетичната енергии и извършвайки необходимите математически операции в (1) се получават диференциалните уравнения на движение на механичната система:

$$\begin{cases} \dot{r}(m_1 + m_2) + m_2 L(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = 0 \\ m_2 L^2 \ddot{\theta} + m_2 g L \sin \theta + m_2 L \dot{r} \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Система ДУ е нелинейна, но тя може да бъде линеаризирана като се извърши допускането, че трептенията са малки:

$$\begin{cases} \ddot{r}(m_1 + m_2) + m_2 L \ddot{\theta} = 0 \\ L \ddot{\theta} + g \theta + \dot{r} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Поради свободното движение на количката по координатата  $r$ , едната собствена честота на системата е равна на нула, а другата се определя, като от второто уравнение на (8) се изрази  $\dot{r}$  и полученият израз се замести в първото уравнение, което придобива вида:

$$\ddot{\theta} + k^2 \theta = 0$$

където  $k$  е собствената честота:

$$k = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 L}}$$

Ако към системата (7) бъдат добавени и двигателната  $F(\dot{r})$  и съпротивителната  $W$  сили, то тя придобива вида:

$$\begin{cases} \dot{r}(m_1 + m_2) + m_2 L(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) = F(\dot{r}) - W \\ m_2 L^2 \ddot{\theta} + m_2 g L \sin \theta + m_2 L \dot{r} \cos \theta = 0 \end{cases} \quad (9)$$

След преработка уравненията, описващи движението на транспортно средство със свободно окачен товар придобиват следния вид:

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{F(\dot{r}) - W + m_2(L\dot{\theta}^2 + g \cos \theta) \sin \theta}{m_2 + m_1 - m_2(\cos \theta)^2} \\ \ddot{\theta} = -\frac{\left( (F(\dot{r}) - W) \cos \theta + g \sin \theta (m_1 + m_2) + \dots \right) \dots + m_2 L \dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta}{L(m_2 + m_1 - m_2(\cos \theta)^2)} \end{cases} \quad (10)$$

Използвайки вторият закон на Нютон, диференциалното уравнение, описващо движението на едномасовата система с една степен на свобода (фиг.1 б)) се представя в следния вид:

$$\ddot{x} = \frac{F(\dot{x}) - W}{m_1 + m_2} \quad (11)$$

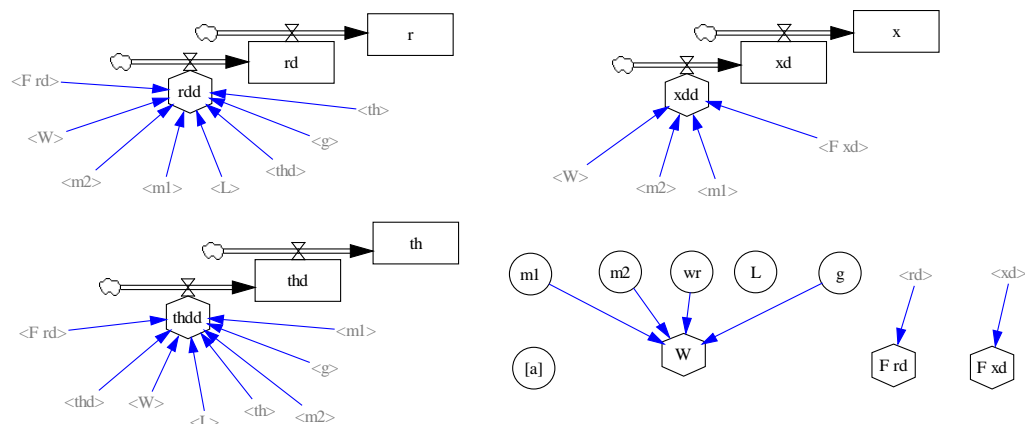
### 3. СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ

Тъй като и едномасовият (11) и двумасовият (10) модели се описват чрез нелинейни диференциални уравнения от втори ред, то единственият възможен подход е численото им решаване чрез програмен продукт, в който са реализирани подходящи числени методи. На фиг.2 е показан графичен модел във Vensim, който репрезентира системата уравнения (10) и уравнение (11). Численото решение се извършва по метода на Рунге-Кута от четвърти ред.

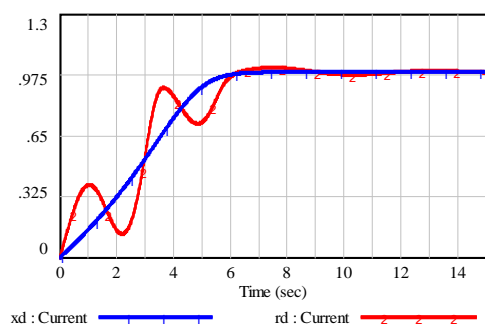
На фиг.3 са показани резултати от численото решаване на (10) и (11) при  $m_1=2200kg.$ ,  $m_2=6000kg.$  и  $L=8m$ : а) скорости на транспортното средство за двата модела, б) ускорение на маса  $m_1$ , в) ъгъл на разлюляване на товара, г) приведена към координата  $r$  механична характеристика  $F(\dot{r})$  на използвания електрически двигател.

От показаните резултати от симулацията (фиг. 3в) става ясно, че при потегляне, свободно окаченият товар се разлюлява, което е причина за периодично намаляване и нарастване на скоростта на транспортното средство по време на неустановения режим (фиг. 3а), като след достигане на номиналната скорост тя остава постоянна. При едномасовият модел, ускорението на транспортното средство е променливо поради нелинейният характер на двигателната сила - (фиг. 3г). При двумасовият модел, първоначалното уско-

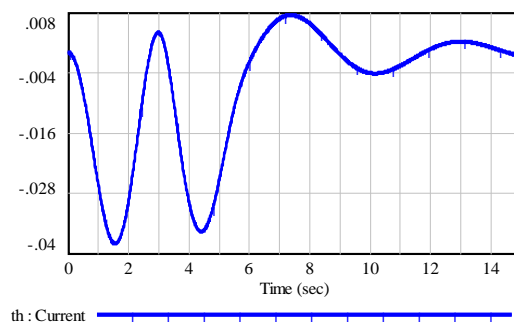
рение е по-високо, отколкото при едномасовият модел – фиг.3б).



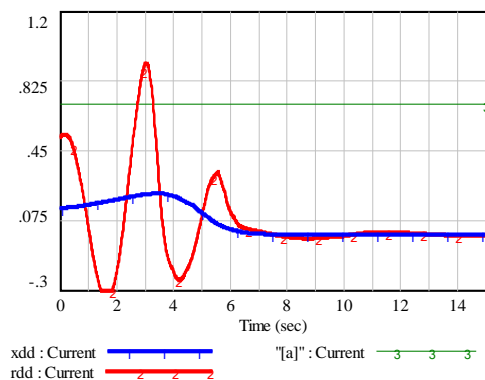
фиг.2 Графичен модел във Vensim



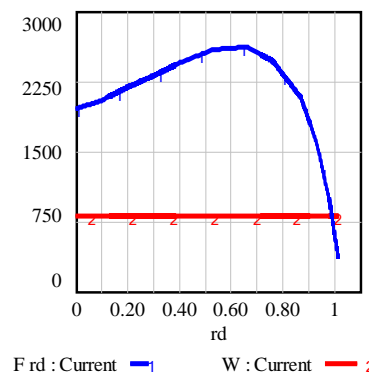
а) скорости  $\dot{x}$  и  $\dot{r}$ , m/s



в) ъгъл на отклонение на товара  $\theta$ , rad



б) ускорения  $\ddot{x}$  и  $\ddot{r}$ , m/s<sup>2</sup>



г) механична характеристика на двигателя  $F(\dot{x})$ , N

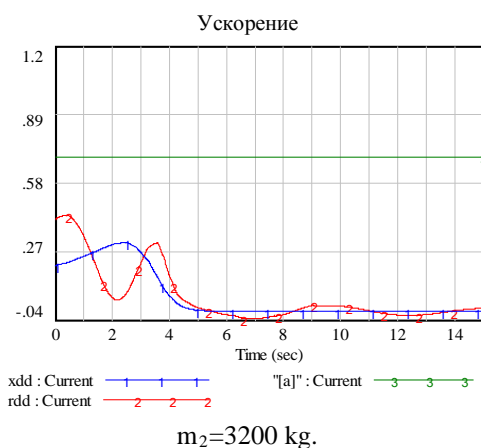
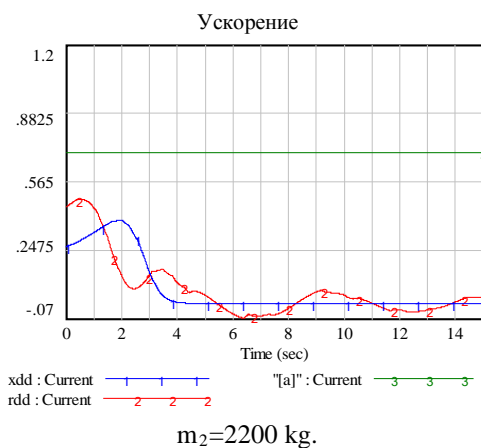
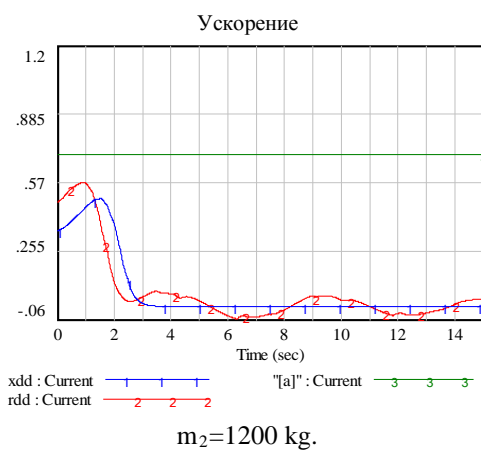
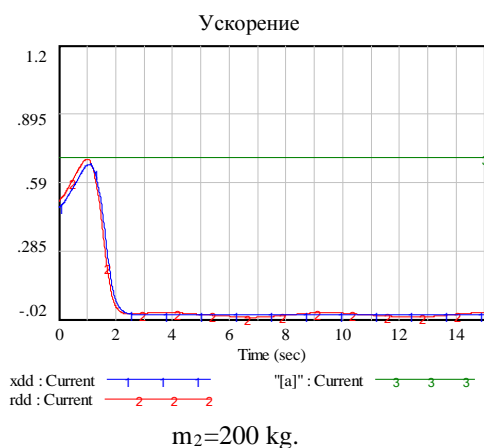
фиг.3. Резултати от симулацията на механичната система

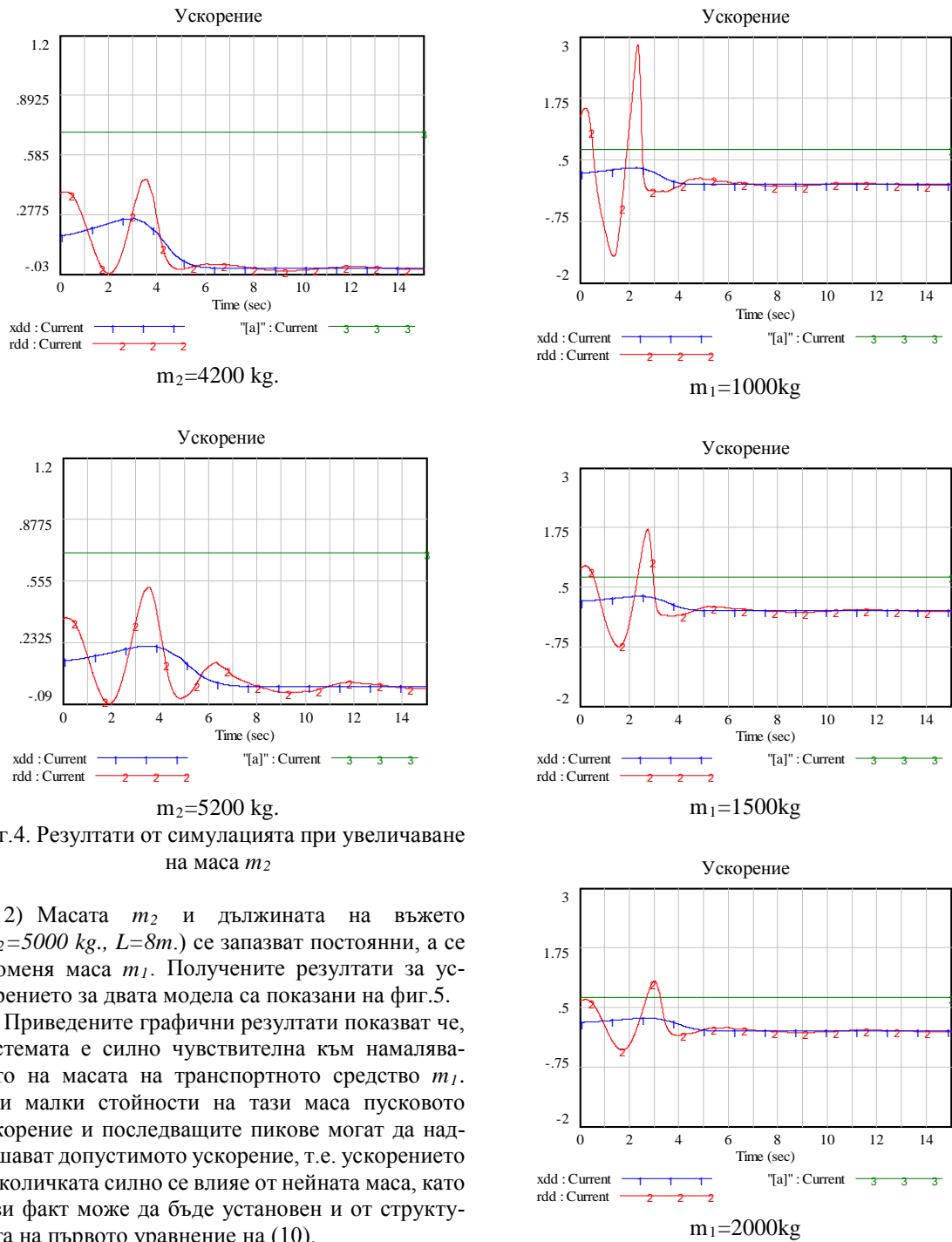


За да се изследва влиянието на масата на транспортното средство  $m_1$ , масата на товара  $m_2$  и дължината на въжето  $L$  върху кинематичните характеристики на механичната система са проведени няколко серии от числени експерименти с различни входни данни.

1) Масата  $m_1$  и дължината на въжето се запазват постоянни ( $m_1=3200\text{ kg.}$ ,  $L=8\text{m.}$ ), а се променя стойността на маса  $m_2$ . Получените резултати за ускорението ( $\text{m/s}^2$ ) за двата модела са показани на фиг.4. На същата фигура чрез права линия е показано зададеното допустимо ускорение  $[a]=0.7\text{ m/s}^2$ .

Както се вижда от поредицата графики, при системата с две степени на свобода, стойността на ускорението в началния момент във всички случаи е по-висока, отколкото при системата с една степен на свобода. Ускорението е променливо, с подчертано колебателен характер, което е предизвикано както от нелинейната механична характеристика на двигателя, така и от разлюляването на товара. Като цяло, при увеличаване на масата  $m_2$  от 200kg до 5200kg първоначалното ускорение на масата  $m_1$  слабо намалява, т.е. увеличаването на масата на товара  $m_2$  не влияе силно върху ускорението на транспортното средство. Също така, с увеличаването на масата  $m_2$  продължителността на неустановеният период на движение очаквано се увеличава. Във всичките случаи ускорението на транспортното средство не надвишава допустимото.

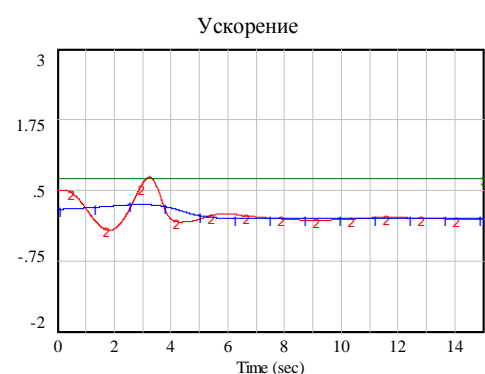




фиг.4. Резултати от симулацията при увеличаване на маса  $m_2$

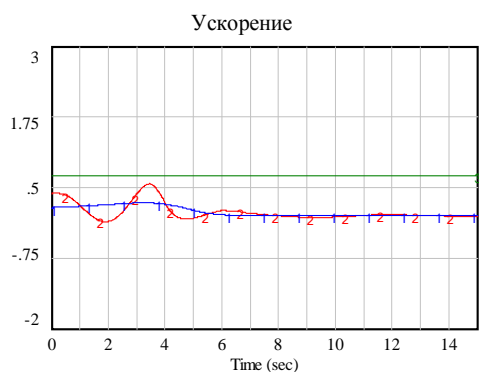
2) Масата  $m_2$  и дължината на въжето ( $m_2=5000$  kg.,  $L=8m$ .) се запазват постоянни, а се променя маса  $m_1$ . Получените резултати за ускорението за двата модела са показани на фиг.5.

Приведените графични резултати показват че, системата е силно чувствителна към намаляването на масата на транспортното средство  $m_1$ . При малки стойности на тази маса пусковото ускорение и последващите пикове могат да надвишават допустимото ускорение, т.е. ускорението на количката силно се влияе от нейната маса, като този факт може да бъде установен и от структурата на първото уравнение на (10).



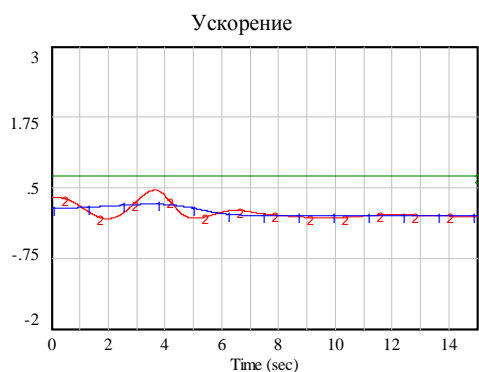
xdd : Current ————  
rdd : Current ————  
[a] : Current ————

$m_1=2500\text{kg}$



xdd : Current ————  
rdd : Current ————  
[a] : Current ————

$m_1=3000\text{kg}$



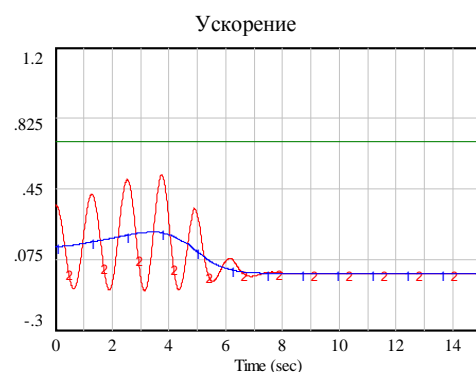
xdd : Current ————  
rdd : Current ————  
[a] : Current ————

$m_1=3500\text{kg}$

фиг.5. Резултати от симулацията при увеличаване на маса  $m_1$

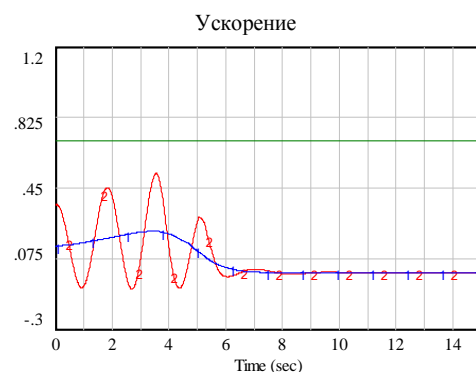
3) Масата  $m_2$  и масата  $m_1$  са постоянни ( $m_2=5000\text{ kg.}$ ,  $m_1=3200\text{kg.}$ ), а се променя дължината на въжето. Получените резултати за ускорението за двата модела са показани на фиг.6.

От графиките на фиг.6 се вижда, че дължината на въжето практически не влияе върху ускорението на транспортното средство, а единствено върху честотата на разлюляване на товара, и то само до определена дължина на въжето, след което честотата се променя много слабо.



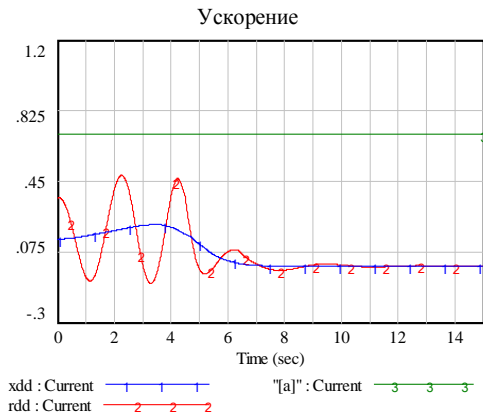
xdd : Current ————  
rdd : Current ————  
[a] : Current ————

$L=1\text{ m.}$

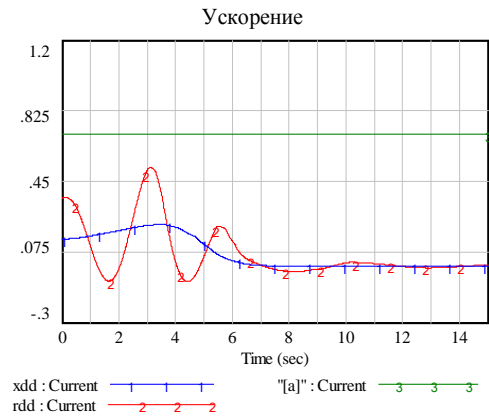


xdd : Current ————  
rdd : Current ————  
[a] : Current ————

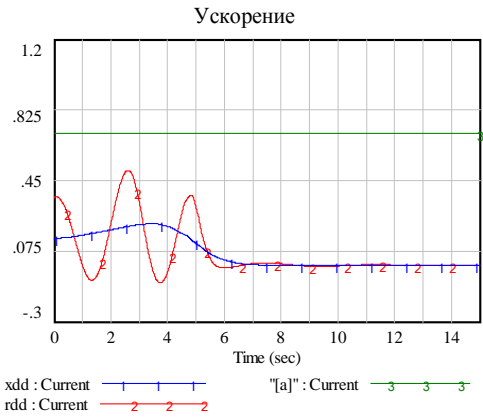
$L=2\text{m.}$



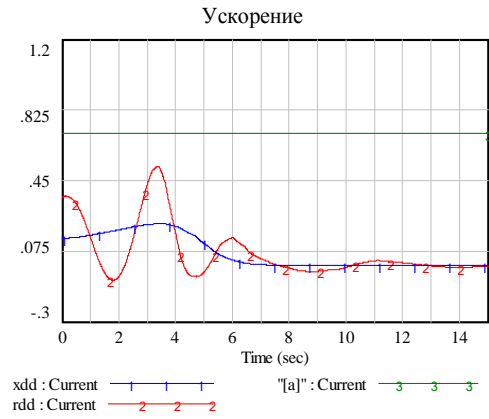
L=3m.



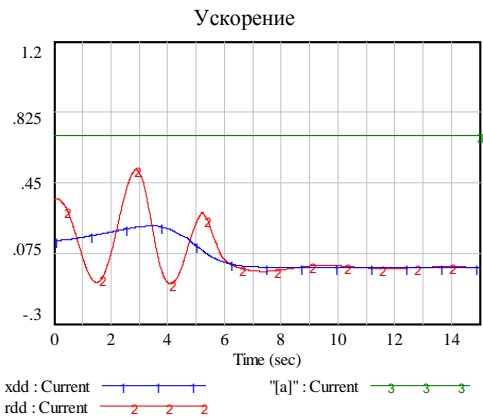
L=6 m.



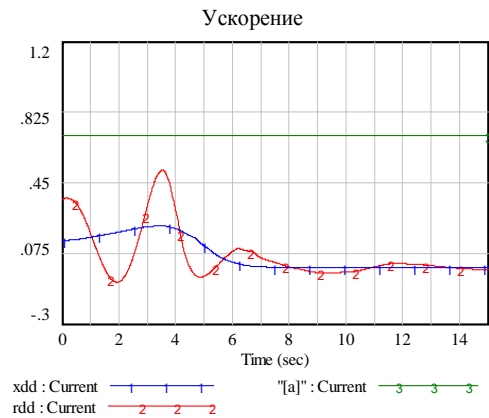
L=4 m.



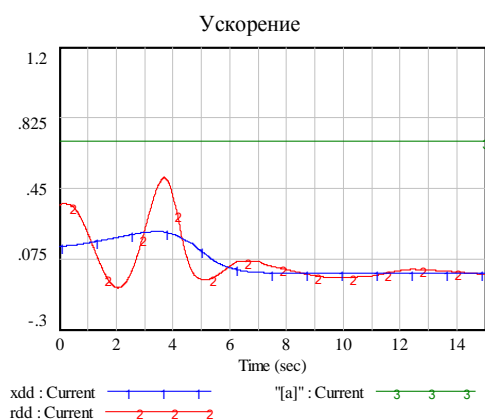
L=7 m.



L=5m.



L=8m.



$L=9m$ .

фиг.6. Резултати от симулацията при увеличаване на дължината  $L$

Проведените симулационни експерименти, показват, че:

1) Класическият едномасов модел с една степен на свобода не винаги дава точни резултати относно закона и стойностите на скоростта и ускорението на транспортното средство, а също така и относно ускорението му в началния момент от време. Висока степен на съответствие между двата модела се получава само относно продължителността на периода на неустановено движение, т.е. средните ускорения при двата модела са еднакви.

2) Възможна е комбинация на параметри на механичната система, за които ускорението,

пресметнато чрез модела с една степен на свобода е по-ниско от допустимото, но ако се отчете разлюляването на товара, то ускорението да надвишава допустимото. Поради тази причина се препоръчва да се използва математическият модел с две степени на свобода, както при проверка на вече съществуваща система, така и при създаването на нова такава. Отчитането на нелинейния характер на диференциалните уравнения и нелинейната механична характеристика на двигателя значително повишава точността на получените симулационни резултати в този случай.

#### Литература:

1. **Вайнсон А.** Подъемно-транспортные машины, учебник для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989.
2. **Дивизиев В.** Основи на товароподемните машини. Техника, 1986.
3. **Иванченко Ф.** Конструкция и расчет ПТМ. Высшая Школа, 1988.
4. **Григоров Б., Митрев Р.** CAD/CAE изследване на движението на транспортна количка с висящ товар при някои екстремални експлоатационни условия. САХ технологии, бр. 3, декември 2015г.
5. **Забавников Н.** Основы теории транспортных гусеничных машин. - М.: Машиностроение, 1975. - 448с.
6. **Минин И., Димитров Д.** Минни машини. Авангард Прима, 2013г.
7. **Казак С.** Динамика мостовых кранов. М.: Машиностроение, 1968 г.



## WEB БАЗИРАНА ВИРТУАЛНА ЛОГИСТИЧНА СКЛАДОВА СИСТЕМА ЗА ПОВИШАВАНЕ НА КОНКУРЕНТНОСТТА НА МАЛКИТЕ И СРЕДНИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Димитър ТУДЖАРОВ<sup>1</sup> Николай КАЗАКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>катедра „Инженерна логистика, подемно-транспортна и строителна техника”, Технически университет - София, България

e-mail: [dtudjarov@tu-sofia.bg](mailto:dtudjarov@tu-sofia.bg)

<sup>2</sup>катедра „Инженерна логистика, подемно-транспортна и строителна техника”, Технически университет - София, България

e-mail: [nkazakov@tu-sofia.bg](mailto:nkazakov@tu-sofia.bg)

**Резюме:** Въпреки широкото използване на Web базирани информационни системи в логистиката все още има дейности, които не са рационално автоматизирани, например: базирано на активни документи и осигурено със стандарти търсене на подходящо решение, въвеждане на качествени характеристики при автоматизирано извършване на оценката на различни възможни варианти, осигуряване на Web базирани средства за решаване на различни оптимизационни задачи и т.н. Целта на работата е да предложи структурно-функционална схема на Web базирана виртуална логистична складова система, решаваща горните проблеми и да представи разработените до момента програмни модули на същата. Очаква се разработката да доведе до повишаване на конкурентоспособността на малките и средни предприятия като осигури на сравнително ниска цена (месечен абонамент) интегрирана среда, реализираща както функциите на достъпните и познати до момента Web базирани складови системи, така и описаните по-горе нови такива.

Представени са структурата на системата и функциите на отделните структурни елементи (модули). Дадени са примери за работата на отделните модули.

**Ключови думи:** логистика, складова система, Web технологии, генетични алгоритми, XML – eXtensible, Markup Language

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

В наши дни сме свидетели на все по-интензивното въвеждане и използване на т.нар. Web базирани информационни системи, целящи да сведат до минимум разходите на средства и време, както и да повишат качеството на услугите. Целта на настоящата работа е свързана именно с реализацията на логистична складова експериментална система (организиране на среда за обмяна на информация и рационализиране на логистичните дейности на ниска цена - абонамент), подпомагаща работата малките и средни предприятия посредством:

1) Осигуряване на складова система с отделен достъп и възможност за генериране XML активни документи;

2) Използване на идеите заложи в стандартите GS1 и новото (от ноември 2015г.) GS1 SmartSearch Implementation решение [7,8] при разработването на експериментален XML документ наименован „Неадресирана поръчка– тър-

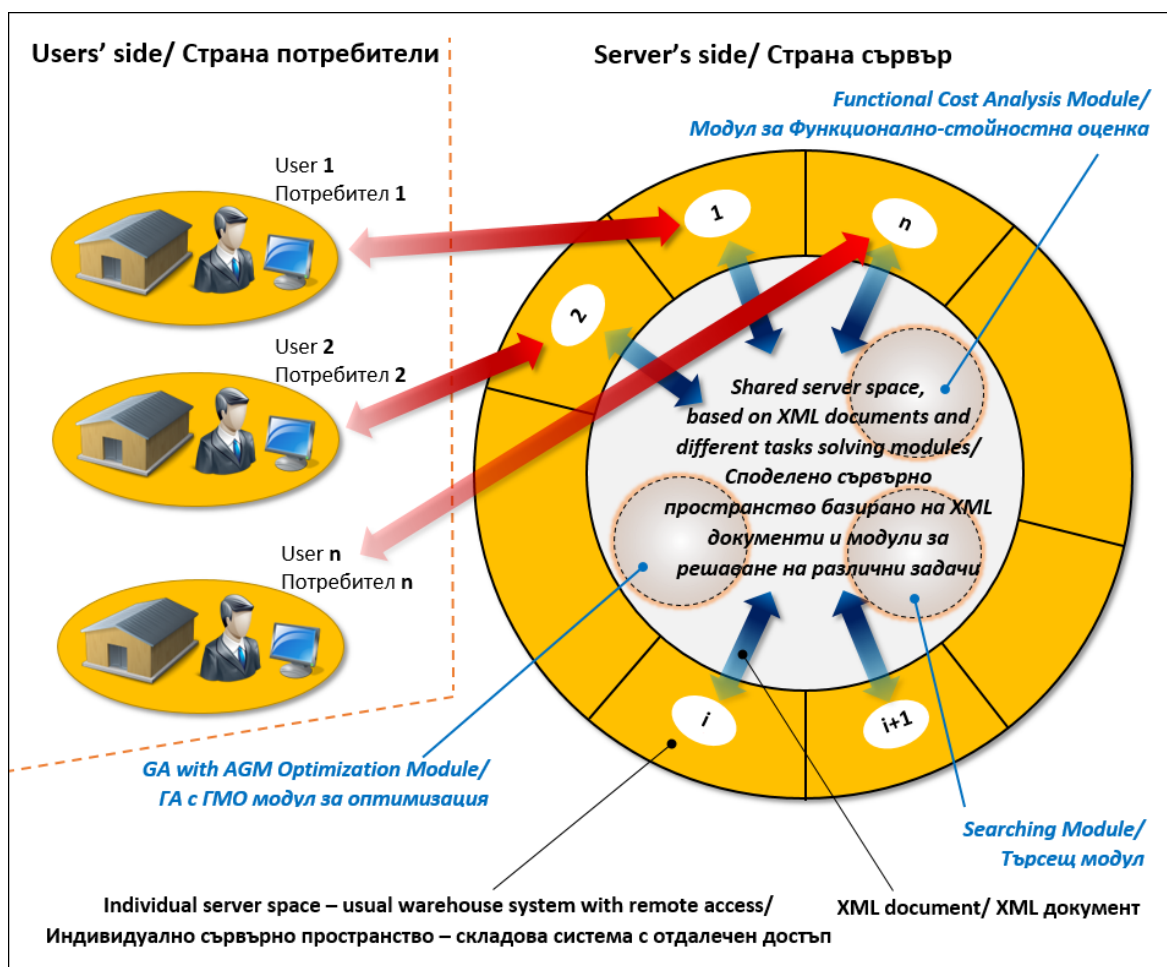
сене“, който да бъде „разчетен“ от търсещата система на средата и използван за намиране на подходящо решение без човешка намеса;

3) Въвеждане на качествени характеристики при оценката на различни възможни варианти, свързани с оптимизацията на логистичните доставки, чрез използване на средствата на Функционално – стойностния анализ (ФСА) [3];

4) Подпомагане на решаването на оптимизационни задачи и вземането на решения чрез разработване на средства за оптимизация в Web среда, базирани на еволюционни алгоритми, в случая генетични алгоритми (ГА) с генетично модифицирани организми (ГМО) [4,10].

### 2. СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛНА СХЕМА НА WEB БАЗИРАНА ВИРТУАЛНА ЛОГИСТИЧНА СКЛАДОВА СИСТЕМА

На фиг. 1 е представена структурно- функционалната схема на предлаганата виртуална логистична складова система.



Фиг.1 Структурно-функционална схема на предлаганата система

Разработваната виртуална логистична складова система, цели да интегрира решаването на горепосочените проблеми към реализираната и позната на авторите функционалност на известните им складови информационни системи с отдалечен достъп.

Предвижда се потребителите на системата да ползват индивидуално сървърно пространство – складова информационна система с отдалечен достъп (експериментални модули на складовата система са реализирани, чрез ползване на HTML[12,13], JavaScript [14], PHP [11,15], MySQL [9], Apache Server [5], XAMPP инсталация [6] – това е само външния слой („обвивката“) на разработваната Web базирана виртуална ло-

гистична складова система . Разработването на оригинална складова система, вместо ползването на готова подобна, позволява интегрирането на различни по функционалност модули („сърцевината“ на системата), като например: модул за стандартизиран обмен на информация, чрез използване на GS1 стандартите в областта на електронния обмен на данни – EDI (Electronic Data Interchange) и др. Възможността за подходящо форматиране на данните за търсене и предлагани продукти и суровини позволява от своя страна автоматизиране на процесите на търсене и оптимизиране чрез използване на активни XML документи, които веднъж генерирани от системата на потребителя се грижат за намирането на



подходящ продукт или суровина (т.е. без човешка намеса тези документи „пуснати“ веднъж във виртуалната складова система следва да „докладват“ на потребителя резултатите от извършеното търсене). Ето защо са анализирани GS1 стандартите и е предложено експериментално съдържание на подобен XML документ.

Също така, на базата на функционално-стойностния анализ [3] е предложен подход и е реализиран експериментален функционален модул за въвеждане на качествени характеристики при оценката на различни възможни варианти на доставки. Дефинирани са показатели за оценка на дисбаланса на функциите и на тяхна основа е определен т.нар. относителен дисбаланс на отделните варианти. ФСА е приложен при различни варианти доставки и възможните начини за предоставяне на информацията от него при вземане на конкретни управленски решения във връзка с доставките са дискутирани.

Изчислителни интелигентни техники (ГА/ГА с ГМО) и Web базирани технологии са комбинирани за създаване на приложение за решаване на различни инженерни оптимизационни задачи с лесен за употреба интерфейс и описание на входната информация (задаване на условията на конкретната задача: описание на функцията за оптимизация, ограничителните условия и параметрите на пресмятане).

### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ МОДУЛИ НА СКЛАДОВА ИНФОРМАЦИОННА СИСТЕМА С ОТДАЛЕЧЕН ДОСТЪП**

На фиг. 2 са представени работни екрани от разработените модули на складовата информационна система с отдалечен достъп. Целта на разработването на системата е да бъде осигурено индивидуално сървърно пространство за потребителите и познавайки функционалността на системата и отсъствието на необходимостта от лицензионни споразумения за интегриране на нови функции (което би било необходимо, в случай че се ползва готова такава комерсиална система) да позволи генерирането на XML документ – наречен по-горе „Неадресирана поръчка – търсене“.

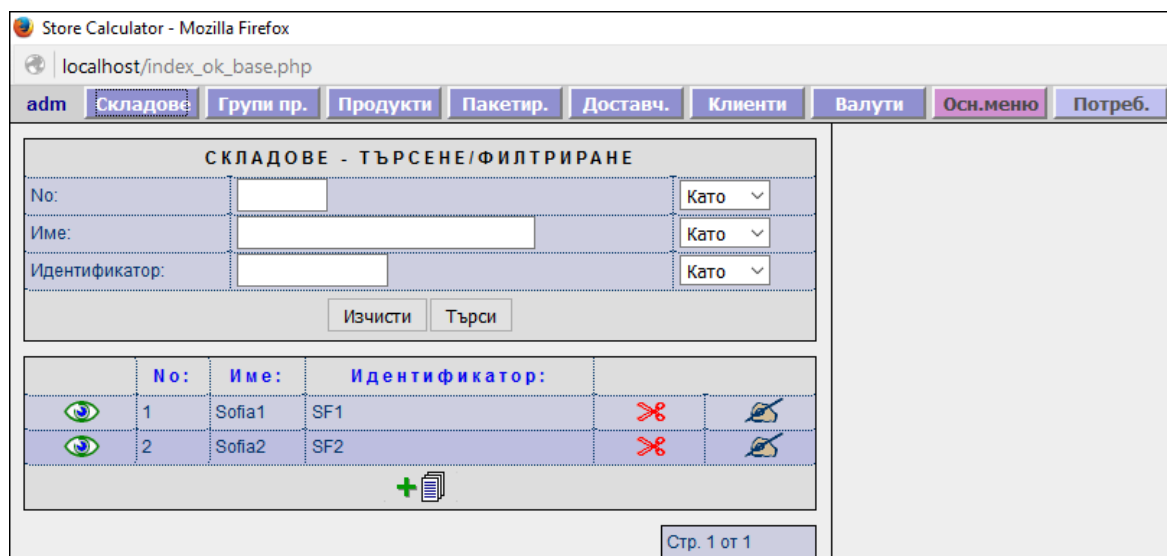
Разработваната складова информационна система позволява организиране на работата с нея за всяко индивидуално сървърно пространство чрез въвеждане на информация за потребителите (включително разрешаване нива на достъп до различни функции на системата). Поддържат се таблици с информация за: складове, групи продукти, продукти и суровини, пакетиране (вкл. начин на транспортиране), валути, доставчици и клиенти. Системата позволява въвеждането и съхраняването на информацията относно различните складови и други операции: продажби, върнати стоки от клиент, доставки, върнати стоки на доставчик, прехвърляне на стоки от един склад в друг, плащания от клиенти и към доставчици, фактуриране, справки: наличности по складове, по отделни стоки, класации по продажби и др.

### **4. GS1 СТАНДАРТИ – ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН XML ДОКУМЕНТ**

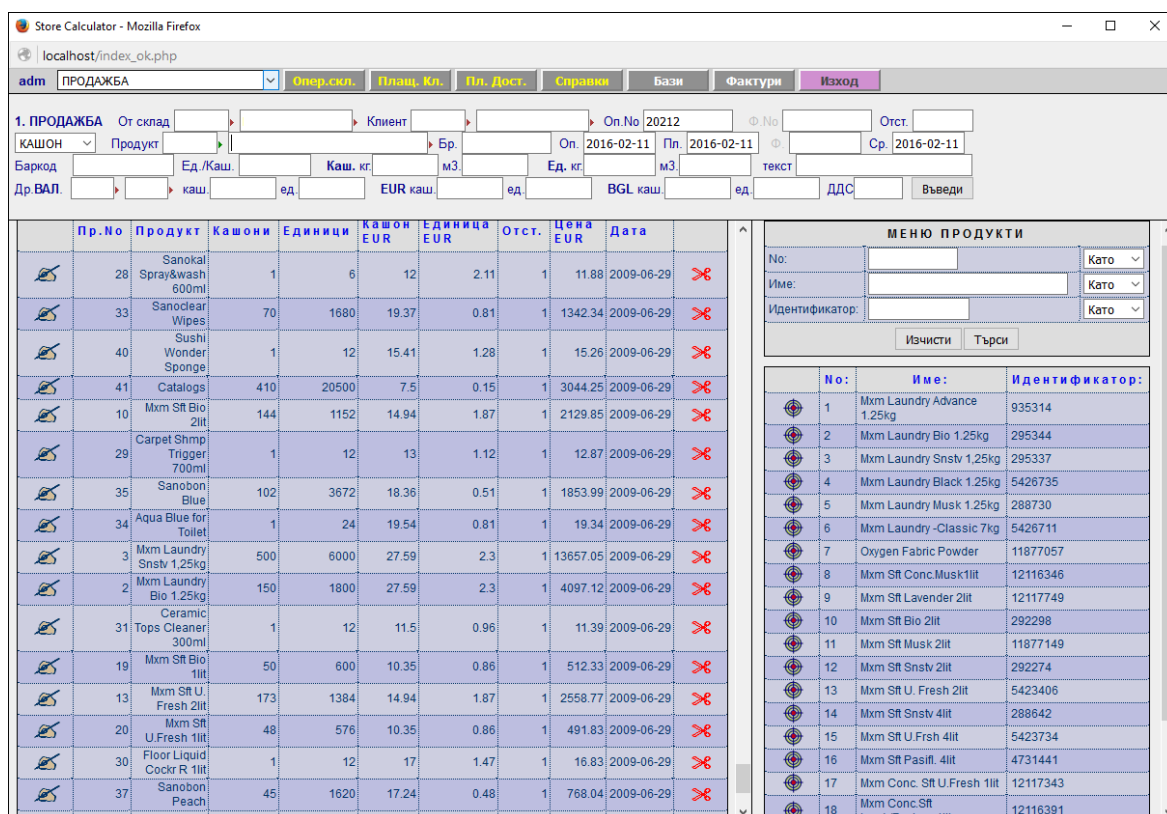
Проучването на GS1 стандартите показва, че до момента в посока на улесняване на търсенето на стоки (продукти и суровини) е направено следното:

- Инициативата от ноември 2015г., наречена GS1 SmartSearch Implementation, използва JSON (JavaScript Object Notation for Linked Data JSON-LD) описание за включване в съдържанието на Web страници на машинно-четими структурирани данни (machine-readable structured data) за продуктите, което прави лесно тяхното откриване;

- Уникалната GS1 идентификация на търговски и логистични единици, услуги, локации и други, която се прилага в цял свят може да се използва за нуждите на логистичните операции, но не е пригодена за нуждите на търсеща система базирана на активни документи (например: глобалният номер на търговската единица GTIN идентифицира фирмата и референтния номер на единицата, определен от фирмата т.е. търсещата система ще бъде улеснена от него единствено ако се търси същата търговска единица от същата фирма);



а) Работен екран – бази на системата

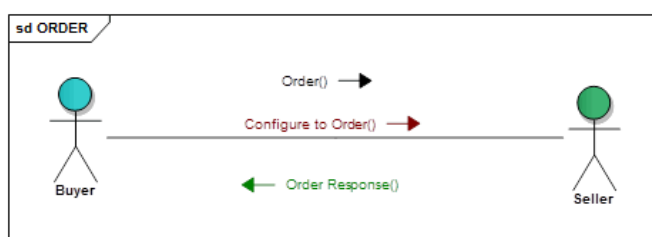


б) Работен екран – операции (основно меню)

Фиг.2 Разработени модули от складова система с отдалечен достъп

- Global Product Classification (GPC) GS1 стандартите са опит за създаване на общ език за групиране на продукти по еднакъв начин, което ще позволи на търговските партньори да общуват по по-ефективен и точен начин, извършвайки различни дейности по веригата на снабдяване;
- GS1 EDI стандартите са с насоченост да осигуряват обмен на съгласувана бизнес информация между търговски партньори по схемата „купувач-продавач“ показана на фиг.3 по-долу, което може да се реализира единствено между конкретизирани вече контрагенти.

Както става ясно от направеното проучване, все още в рамките на GS1 не е предложен стандарт, описващ изискванията на потребителя (търсещ да закупи определен продукт) във формат, който може да се използва за търсене без участие на човека т.е. търсене чрез т.нар. XML активен документ. Естествено е при разработването на този документ да се възползва от GPC GS1 стандартите. Част от такъв документ (разработена по примера на GS1 Toys Games стандарта) е представена на фиг.4.



Фиг.3 Съобщение за поръчка (конфигуриране на поръчка)

```

...
<family definition="" text="Toys/Games" code="86010000">
<class definition="" text="Board Games/Cards/Puzzles" code="86010100">
<brick definition="Includes any products that can be described/observed as a game supported
by a power source, specifically designed for game playing and typically intended as a recrea-
tional activity. Includes products designed for adults or children. Specifically excludes
non-powered games and powered game consoles. Excludes products such as non-powered
board games, card games, computer games and game console software." text="Board Games
(Powered)" code="10005134">
...
<attType definition="Indicates, with reference to the product branding, labelling or packaging, the
descriptive term that is used by the product manufacturer to identify the number of players that
may use the product." text="Number of Players" code="20001253">
<attValue customerRequirement_definition="code" text="2 or 3 PLAYERS"
code="30011508 or 30011509"/>
</attType>
...
</brick>
</class>
</family>
...
    
```

Фиг.4 Част от XML документ „Неадресирана поръчка - търсене“ (“Unaddressed order – Search”)

Разглеждайки предварителното проучване на пазарните възможности (търсене), като описание на бъдеща поръчка при конкретно изяснени изисквания от страна на купувача – т.е. „бих поръчал определена суровина или продукт, в случай че са изпълнени следните условия ...“, по-долу е изложено и анализирано съдържанието на предложени тук XML документ за описание на поръчка. За разлика от GS1 стандарта тук елемента <sh:Receiver> не е необходим, защото документът е адресиран към търсещата машина на „сърцевината“ на системата. Необходимо е, обаче, да бъде добавен нов атрибут за дефиниране на изискванията на потребителя “**cusomerRequirement\_definition**” – виж фиг.4. На нея е представена част от предложени XML документ, като модифицираните елементи и новите атрибути са удебелени и представени с наклонен шрифт.

Стойността на атрибута определя вида на търсене: „code” по съответстваща стойност на атрибута **code** (код) на елемента **attValue**; „text” по съответстващо текстово описание; „max\_value“, „min\_value“ и „value\_of“, съответно при зададени максимална и/или минимална граници или точна стойност. Следователно оформянето на потребителската заявка в този формат се свежда до добавяне на нови елементи **attValue**, които описват конкретните изисквания на потребителя в съответствие със съответните GPC GS1 стандарти. XML е маркиращ език (стандарт, описващ правилата, за създаване на нови стандарти – документни модели) четим и от хора и от машини. Така, чрез генерирането на този XML документ, става възможно търсещата система на средата да „разчете“ неговото съдържание и да провери съответствието му с наличните предлагани суровини и продукти без да е необходима човешка намеса. В края на процеса на търсене следва да се генерира подобен XML документ, наречен „Отчет по неадресирана поръчка“ (“Unaddressed order – Report”), от който след минимални уточнения автоматизирано да се генерира стандартизираното вече съобщение за поръчка. По този начин става възможно и добавянето на още една функционалност в използването на GS1 стандартите – подпомагане търсенето по предварително уточнени критерии чрез използване на активни XML документи.

## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ НА ЛОГИСТИЧНИТЕ ДОСТАВКИ С ФУНКЦИОНАЛНО – СТОЙНОСТНА ОЦЕНКА

В складовите системи се обръща основно внимание на минимизирането на разходите, като възможностите за предварителен качествен контрол и управление на доставките се считат за по-трудни за формализиране и от там за по-трудни за автоматизиран анализ и оптимизация.

В [3] е предложен подход и е структурирана информацията за разработване на системен модул за ФСА с възможности за интегриране (вграждане) в автоматизирана складова система, което да води до осигуряване на качествени детайли, материали и др. при възможно минимални разходи. Дефинират се показатели като: дисбаланс на функция по отношение на относителната ѝ значимост, по отношение на относителните ѝ разходи и комплексен дисбаланс на функция. От дисбалансите по функции лесно се изчисляват подобни сборни показатели по варианти и се подпомага вземането на решение (в случая избор на вариант). Освен това тези показатели позволяват да се сменя „гледната точка“ – т.е. приоритет да се дава на относителните значимости, разходи или усреднено на значимостите и разходите.

ФСА е приложен при различни варианти на доставки и е анализирана ролята на възможните начини за предоставяне на информацията от него (от различните „гледни точки“) при вземането на конкретни управленски решения.

## 6. WEB БАЗИРАНО ГА/ГА С ГМО ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА РЕШАВАНЕ НА ОПТИМИЗАЦИОННИ ЗАДАЧИ

По принцип, решаването на всяка задача може да се разглежда като процес на търсене на подходящо решение в пространството на възможните стойности на променливите величини. Представяйки отделните решения като „хромозоми“ (набори от гени) и интересувайки се от “добри” (най-добри) решения, можем да представим ГА като процес на еволюция (оптимизация), който протича по следния начин [4,10]:

1) Генерира се начална случайна популация от  $n$  хромозоми (решения на проблема);

2) Изчислява се „жизнеспособността“  $f(x)$  на всеки хромозом  $n$  в популацията (съгласно определената целева функция – наричана „фитнес функция“);

3) Извършва се подреждане на хромозомите по резултатите от изчислената жизнеспособност;

4) Запазват се първите хромозоми („най-жизнеспособните“), които се използват за създаване на следващата популация ( $m$  на брой,  $m < n$ ) и се премахват останалите  $n-m$  хромозоми;

5) Започва процеса на допълване на популацията с нови индивиди, като броят на новосъздадените индивиди се нулира  $i=0$ ;

6) Добавя се нов индивид в популацията, който получава своя пореден номер  $i=i+1$ ;

7) Избират се два родителски хромозома от запазените жизнеспособни  $m$  хромозоми;

8) Кръстосват се родителските хромозоми и се създава новия  $i$  индивид;

9) Новосъздадения  $i$  индивид мутира по време на самостоятелното си съществуване;

10) Прави се проверка дали популацията е допълнена с нови индивиди (хромозоми) и ако не е, алгоритъмът се връща в 6) за добавяне на нова хромозома, а в случай че популацията е пълна се преминава към следващата стъпка;

11) Проверяваме дали условието за спиране на алгоритъма е изпълнено (най-често то е достигнат брой генерации – брой последващи популации) и ако „не“ ГА се връща в 2) и започва създаване на следващата популация, в случай на „да“ ГА преминава на последната стъпка;

12) ГА извежда решение и спира.

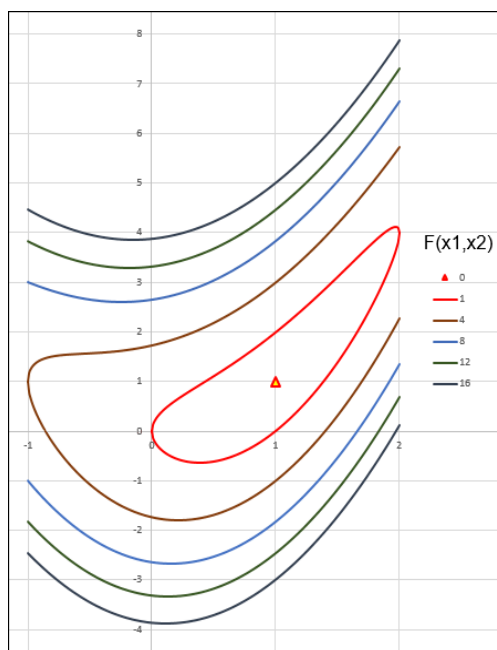
При ГА с ГМО [4] се предлага механизъм за вграждане на изчислителен модул с повишена (свързана с вида на решаваната задача) насоченост. След етап 4) запазване на  $m$  от най-добрите хромозоми се добавя нов етап в алгоритъма, като останалите етапи се запазват същите и само се преномерират. При новия етап се извършва аналогична на съзнателната генно-инженерна намеса (ГМО), изразена в модифициране на гените по избран за конкретната задача метод. По този начин е определено място в алгоритъма за включване на различни изчислителни модули за генна модификация и е реализирана пилотна система, която използва два метода на търсене, условно

наречени: „случайно търсене в намален диапазон“ и „генериране на ГМО без повторения в стойностите на гените“.

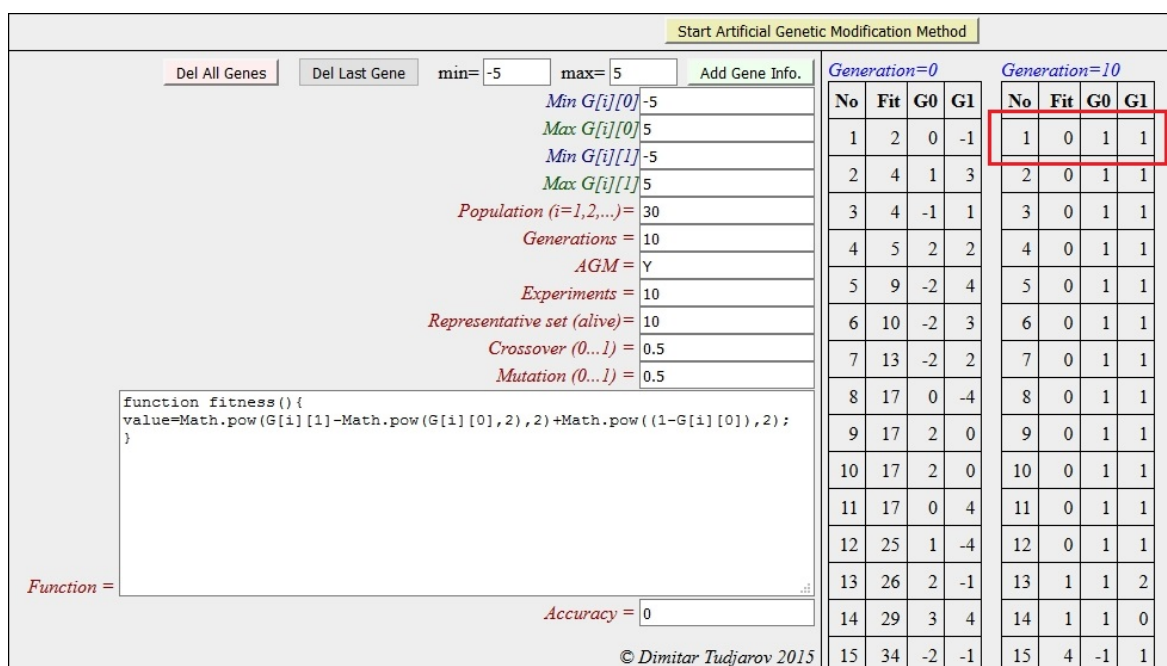
Разработен е експериментален Web базиран моделиер и калкулатор на ГА с ГМО с широка приложимост - с възможности за решаване на широк кръг оптимизационни задачи. При разработването за използвани HTML и JavaScript, като синтаксиса на писане на фитнес функцията следва също правилата на и JavaScript. С калкулатора са решавани задачи свързани с разпределението на материален поток в логистична система, задачата за търговския пътник [1,4] и др. Тук с цел само да се илюстрира работата на този модул за оптимизация е публикувано решение на задача за намиране на минимум на функция на две променливи, като е използвана тестова функция дадена в [2]:

$$F(x_1, x_2) = (x_2 - x_1^2)^2 + (1 - x_1)^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

Графичното представяне на функцията е дадено на фиг. 5, а работен екран с резултатите от решението на фиг. 6.



Фиг.5 Графично представяне на функцията



Фиг.6 Тестова функция – резултати ГА с ГМО

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основните резултати от работата са:

1) Предложена е структурно-функционална схема на Web базирана виртуална логистична складова система и са дискутирани връзките между отделните модули и предимствата на предложението;

2) С цел автоматизиране на дейностите по търсенето на подходящи контрагенти е направено проучване на GS1 стандартите и е предложен и представен експериментален XML документ за описание на потребностите на потребителя;

3) Представени са: разработени основни експериментални модули на складова система с отдалечен достъп, модул за използване на ФСА при вземане на решение за избор на вариант на доставка и Web базирано средство за решаване на оптимизационни задачи.

### Литература

1.Геров Г., Иванчев Д. Ръководство за упражнения по математични методи при комплексната автоматизация на дискретното производство. София, Печатна база при ВМЕИ “В. И. Ленин“, 1983, 109 с.

2.Стоянов С. Оптимизация на технологични процеси, Издателство Техника, ISBN 954-03-0256-0, 1993, 472 с.

3.Туджаров Д. Един подход за приложение на функционално - стойностен анализ (ФСА) при оптимизиране на логистичните доставки, „Българско списание за инженерно проектиране“, ISSN 1313-7530, бр.18/2013, 29-36 стр.

4.Туджаров Д. Използване на генетично модифицирани организми (ГМО) в генетичните алгоритми, „Българско списание за инженерно проектиране“, ISSN 1313-7530, бр.27/2015, 75-82 стр.

5.<http://www.apache.org> Посетен на 10.12.2015г.

6.<https://www.apachefriends.org/index.html> Посетен на 10.12.2015г.

7.<http://www.gs1.org> Посетен на 10.01.2016г.

8.<http://www.gs1bg.org/> Посетен на 10.01.2016г.

9.<https://www.mysql.com> Посетен на 10.12.2015г.

10.<http://www.obitko.com> Посетен на 10.12.2015г.

11.<https://secure.php.net/manual/bg> Посетен на 10.01.2016г.

12.<http://www.w3.org/html> Посетен на 10.12.2015г.

13.<http://www.w3schools.com/html> Посетен на 10.12.2015г.

14.<http://www.w3schools.com/js> Посетен на 10.12.2015г.

15.<http://www.w3schools.com/php> Посетен на 10.12.2015г.

## WEB-BASED VIRTUAL WAREHOUSE LOGISTICS SYSTEM TO ENHANCE THE COMPETITIVENESS OF SMALL AND MEDIUM ENTERPRISES

**Dimitar TUDJAROV<sup>1</sup> Nikolay KAZAKOV<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Logistics engineering department, Technical University-Sofia, Bulgaria  
e-mail: [dtudjarov@tu-sofia.bg](mailto:dtudjarov@tu-sofia.bg)

<sup>2</sup>Logistics engineering department, Technical University-Sofia, Bulgaria  
e-mail: [nkazakov@tu-sofia.bg](mailto:nkazakov@tu-sofia.bg)

**Abstract:** Despite the widespread use of Web-based information systems in logistics there still have activities, which are not rational automated, for example: searching for a suitable solution based on standardized active document, usage of quality characteristics for the automated assessment of the various possible variants, providing Web-based tools to solve different optimization problems, etc. The aim of the work is to propose a structural scheme of the Web-based virtual warehouse logistics system, which includes usual warehouse modules and provides developed software modules for to solve the problems pointed above. The development of such a system leads to increasing the competitiveness of SMEs (small and medium enterprises) by providing on relatively low cost (monthly subscription) of one integrated environment with new functionalities.

The structure of the system and the functions of the structural elements (modules) are represented. Examples are given for the explanation of the work of the individual modules.

**Keywords:** logistics, warehousing system, Web technology, genetic algorithms, XML - eXtensible, Markup Language





## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МЕХАНОСБОРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЯЧЕЙКАХ

Валерий КИРИЛОВИЧ

кафедра „Автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий”, Житомирский государственный технологический университет – Житомир, Украина  
e-mail: [kiril\\_va@yahoo.com](mailto:kiril_va@yahoo.com)

**Аннотация:** Предложены составляющие комплексного подхода к интерпретации роботизированных механосборочных технологий (РМСТ) машино- и приборостроения как систем и к их синтезу в гибких производственных ячейках (ГПЯ). При этом ГПЯ рассматриваются как система, для которой анализируются ее кибернетические принципы и аспекты, раскрывается их содержательная сущность для условий роботизированного производства. Процесс синтеза РМСТ также рассматривается как система, где анализируются такие составляющие как предложенные концепция синтеза РМСТ, принципы, парадигма, аксиомы. Их содержание раскрывается в контексте использования промышленных роботов как универсальных средств автоматизации с учетом выделенных проявлений РМСТ.

**Ключевые слова:** системный подход, роботизированная механосборочная технология, система, синтез, принцип, аспект, аксиома, концепция, парадигма, промышленный робот, траектория

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Реальная инженерная практика синтеза роботизированных механосборочных технологий (РМСТ) для гибких производственных ячеек (ГПЯ) характеризуется наличием ситуации, когда известны предварительно выбранные единицы основного (например, металлорежущие станки, штампы, прессы, автономные сборочные устройства и механизмы и т.д.), вспомогательного (например, промышленные работы (ПР), устройства ориентирования, транспортирования и т.д.) технологического оборудования (соответственно ОТО, ДТО), другое технологическое оснащение, т.е. известен технический базис (ИТБ), а также заготовки, сборочные элементы (для роботизированного производства рассматриваются как объекты манипулирования – ОМ). Элементы ИТБ являются составляющими рабочих позиций (РП) общим количеством  $T$ , на множестве которых необходимо синтезировать оптимальную в заданном смысле соответствующую роботизированную механообрабатывающую или сборочную технологию, т.е. РМСТ [1, 2, 32–34].

В пределах рассматриваемой проблемы содержательная сущность РМСТ с использованием

ПР в данной постановке характеризуется [9, 11, 13–17, 25, 26, 36, 37]:

- общностью выполняемых при этом *технологических функций вспомогательного характера*, заключающихся в выполнении манипуляционных действий с ОМ для обеспечения последующего выполнения на основных РП, т.е. ОТО, основных технологических операций по известному технологическому маршруту (ТМ) технологического воздействия на  $d$ -ый ОМ  $g$ -ой группы изделий –  $TM^{dg}$ ;
- общностью физико-механических характеристик ОМ (заготовок, деталей, сборочных компонентов, сборочных единиц, сборочных изделий), имеющие в большинстве случаев пространственную и / или прочностную целостность;
- общностью интервалов рабочих параметров перемещений ОМ, соизмеримых с размерами звеньев манипуляционной системы (МС) ПР – величин перемещений, их скоростей и ускорений, обусловленных конструктивно-геометрическими параметрами ОМ, ТО и ПР;
- определенной общностью массо-габаритных параметров ОМ на различных операциях целенаправленного технологического воздействия на ОМ согласно  $TM^{dg}$  и т.п.

Сочетание технологической общности как роботизированных технологий механообработки, так и сборки с общностью возможных вариантов роботизированных структур ГПЯ и с общностью интервалов значений (величин) геометрических, кинематических, технологических и технико-экономических параметров ПР и ОМ дает основание для утверждения о технологически-топологической общности использования ПР в механосборочных ГПЯ машино- и приборостроения. Технологически-топологическая общность указанных ГПЯ обуславливает аналогичность, а часто и идентичность задач, выполняемых при этом ПР [1, 2, 5, 8, 10–16, 18–22, 26, 36, 37].

С учетом указанного РМСТ как одну из видов общего понятия "технология" в контексте содержательной сущности рассматриваемой проблемы и особенностей предметной области можно определить как *систематизированную на научной основе совокупность оптимальных в принятом понимании манипуляционных действий схвата (Сх) ПР с / без ОМ при межагрегатном перемещении, технологическом обслуживании каждой рабочей позиции в заданной технологическом маршрутом последовательности и технологическом взаимодействии Сх с ОМ на известном техническом базисе ГПЯ с целью получения готовой продукции заданного качества, необходимо количество и принятой эффективности* [5, 15].

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Анализ теоретических и практических наработок по роботизированным технологиям в металлообработке и сборке, а также соответствующих программных продуктов, позволяющих автоматизированно решать соответствующие задачи, показывает, что, несмотря на очевидные научно-практические достижения робототехники наряду с полученными реальными практически результатами, важная научно-техническая проблема автоматизированного синтеза (АС) РМСТ на ИТБ ГПЯ далеко не исчерпана, так как существующие положение, содержание и достижения соответствующих наработок не позволяют с максимально полным учетом всех ограничений и условий комплексно находить варианты эф-

фективных в принятом смысле системных технологических решений (СТР). Соответственно последствия неоптимальных решений могут привести к нерациональному и неэффективному использованию (эксплуатации) всех капиталоемких (относительно стоимости и эксплуатационных расходов) составляющих ГПЯ и последних как таковых в целом, что выражается в их (ГПЯ) технических и эксплуатационных показателях [9, 25, 27, 36, 37]. Указанное определяется тем, что эвристичность, декларативность, фрагментарность и т.д., имеющие место при рассмотрении глобальной проблемы АС РМСТ, не всегда являются действенными в современных условиях с учетом возможностей и ресурсов вычислительной техники, когда многовариантность и широкие интервалы возможных промежуточных и конечных решений-альтернатив не подлежат в полной мере обоснованному рассмотрению / анализу, исключают возможность их полного перебора и анализа качества всех сгенерированных вариантов СТР, т. е. РМСТ на ИТБ ГПЯ.

В значительной степени такое положение объясняется отсутствием комплексного подхода к АС РМСТ, который в свою очередь базируется на принципах системного подхода. Это означает отсутствие рассмотрения ГПЯ как единой технологической системы со своей структурой, внешними и внутренними связями, параметрами, отношениями между составляющими и т.д. То есть на сегодня с единых системных позиций не решены задачи, воспроизводящие по своему содержанию прежде всего особенности применения ПР в РМСТ и содержательно определяющие решение множества задач технологического взаимодействия Сх ПР с ОМ, технологического обслуживания (загрузка, переустановка – перезагрузка, разгрузка) ПР рабочих позиций ГПЯ, межагрегатных перемещений Сх с / без ОМ между рабочими позициями ГПЯ, выполняемых по соответствующим траекториям, с соответствующими технологическими параметрами и законами управления как Сх, так и звеньев МС ПР.

Таким образом, АС РМСТ на ИТБ ГПЯ означает автоматизированное генерирование множества РМСТ на множестве известных элементов – ОТО, ВТО и ОМ с последующим автоматизированным выбором оптимальной РМСТ по пред-

варительно выбранному критерию и принятым ограничениям.

АС РМСТ на ВТБ ГПЯ является обязательной и неотъемлемой составляющей автоматизированного проектирования ГПЯ как составляющих гибких производственных систем (ГПС) [1, 2, 32, 36].

Целесообразно отметить, что в большинстве имеющихся на сегодня информационных источниках стран СНГ термин "гибкая производственная ячейка" (ГПЯ, англ. FMC – flexible manufacturing cell) фактически является аналогом более распространенного термина "роботизированный технологический комплекс" (РТК).

Изложенное выше однозначно указывает на необходимость скорейшего решения всего комплекса вопросов по совершенствованию существующих и разработке новых подходов к проектированию / синтезу РМСТ и обуславливает актуальность и большую прикладную значимость в контексте всевозрастающего выпуска и внедрения ПР [38], всех вопросов, связанных с проектированием ГПЯ, неотъемлемой составляющей которого (проектирования) является синтез РМСТ на ИТБ ГПЯ [1, 2, 32, 36].

Излагаемое ниже раскрывает содержание и интерпретацию предложенных составляющих комплексного подхода к РМСТ как объекта синтеза, основанное на общих кибернетических принципах и аспектах при рассмотрении ГПЯ как системы, предложенных парадигме, концепции, принципах, аксиомах АС РМСТ, выделенных составляющих РМСТ и технологических особенностях использования ПР при механосборке в машино- и приборостроении.

### 3. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Представляя РМСТ как объект синтеза и соответственно как систему с заданными целью функционирования и желаемыми свойствами, проектант формирует его (объекта) возможные схемы, планы и структуру. Указанное объясняется тем, что система является научным инструментом исследования объектов, процессов и управления ими [3, 4, 23].

В общем виде под *системой* можно понимать совокупность или комбинацию взаимосвязанных

элементов или частей, формирующих комплексное единое целое, определенным образом взаимодействующих для достижения заданной цели.

Поэтому под *технологической роботизированной системой* (ТРС) можно понимать совокупность взаимосвязанных структурных элементов (ОТО, ВТО, ПР) и ОМ, формирующих ГПЯ механосборки и технологически взаимодействующих во времени и пространстве с целью выпуска продукции заданного качества, количества и эффективности.

Между элементами (частями) в системе устанавливаются определенные отношения, обладающие теми или иными свойствами. Эти свойства и отношения, характеризующие взаимосвязь, упорядоченность и взаимодействие данных элементов, являются конкретным проявлением *главного принципа системного подхода – целостности системы*. Этим принципом системный подход рассматривает как материальные объекты, так и отображения процессов мышления во взаимосвязи, единстве и динамическом взаимодействии [27].

Кроме указанного принципа целостности при системном подходе к синтезу РМСТ целесообразно рассматривать и другие принципы кибернетики, которые априори необходимы в контексте рассматриваемой проблемы, а именно: принципы необходимого разнообразия, эмерджентности, внешнего дополнения, обратной связи и выбора решений [27].

Следует заметить, что указанные принципы системного подхода к РМСТ как объекта синтеза содержательно пересекаются (частично совпадают) в несколько иной терминологии с принципами, на которых базируется АС РМСТ [12] (частично см. далее).

Принцип *необходимого разнообразия* формулируется следующим образом: наиболее эффективной системой является такая, в которой количество разнообразных элементов (составляющих, компонентов) и их состояние ограничены как по максимальным, так и по минимальным их количествам. Отсюда и на основании представленного выше определения системы и ТРС можно сделать вывод, что при синтезе РМСТ должны быть учтены составляющие и факторы, обусловленные научными представлениями о структурной целесообразности как РМСТ, так и

системы, реализующей их (РМСТ) автоматизированный синтез.

Из этого принципа следует положение, согласно которому для повышения упорядоченности сложная и большая система, в которую должны входить система РМСТ и система их (РМСТ) синтеза, должна состоять из достаточного и необходимого количества составляющих, обеспечивающих задачу наличия законченных частей целого – конечного целевого результата. Уместной по поводу указанного выше есть цитата Эшби Р.: "разнообразие сложной системы требует управления, которое само обладает некоторым разнообразием" [30].

Принцип необходимого разнообразия предполагает наличие определенного количества составляющих, которые должны использоваться при системном подходе к РМСТ как объектов синтеза, и рассматривает объект (РМСТ) и субъект (проектировщик, разработчик) системы как единое целое во взаимосвязи и взаимодействии их элементов.

Принцип *эмерджентности* в определенном смысле означает, что не только система может обладать свойствами, не присущими подсистемам, а и подсистема может обладать свойствами, не присущими системе в целом. Это означает возможность несовпадения локальных целей и критериев отдельных составляющих процесса синтеза РМСТ как системы, являющейся результатом функционирования ГПЯ как системы.

Содержание принципа *внешнего дополнения* сводится к необходимости предвидения определенных возможностей, а практически всегда имеющих отклонений при реализации системного подхода к рассматриваемой проблеме. Поэтому для локализации возможных возмущений при этом обязательно наличие необходимых и достаточных резервов различного происхождения и проявления, так как только избыточная система является надежной, а значит и эффективной относительно ее функционирования. Относительно синтеза РМСТ как такового, то в данном смысле резервом является профессиональный опыт, осмысление масштабности и детализации проблемы прежде всего проектировщиком (разработчиком) системы.

Принцип *обратной связи* между взаимосвязанными и взаимодействующими составляющими

ми, которые учитываются при системном подходе, обеспечивает организацию эффективности управления процессом синтеза РМСТ на научно обоснованной основе. Известно, что любые производственные, проектные или синтезирующие системы являются открытыми, а замкнутость их обеспечивается только через контур прямой и обратной связи. Данный принцип можно с некоторыми оговорками отождествлять с принципом *итерационности* [12].

Принцип *выбора решения* по содержанию фактически соответствует принципу *результативности* [12] и указывает на то, что во всех случаях окончательное решение необходимо принимать на основании многоальтернативного выбора. Отсюда становится понятным, что системный подход к синтезу РМСТ должен гарантировать и обеспечивать многовариантность промежуточных и конечных результатов.

Взаимосвязь, единство и взаимодействие структурных элементов системы обуславливается наличием функционального, элементного и организационного *аспектов системного подхода*, которые в свою очередь базируются на указанных выше кибернетических принципах системного подхода к РМСТ как объектов синтеза.

Множество функций, которые должна реализовать система и ее отдельные подсистемы (составляющие), устанавливается *функциональным аспектом*. Упорядоченное функционирование составляющих фактически определяет логику функционирования всей системы, так как их (составляющих) функционирование определяется конечным множеством взаимосвязанных функций с одинаковой целевой направленностью.

Построение и исследование процесса синтеза РМСТ как системы и установление его (процесса) элементного состава указывает на наличие *элементного аспекта*. Его учет необходим для обоснованного анализа и обеспечения целостности РМСТ как системы при ее синтезе.

Установление структуры системы, четкой и точной цели для каждой ее структурной составляющей и реализация задач, установленных функциональным назначением, обеспечивается наличием *организационного аспекта* системного подхода.

Вышеуказанные кибернетические принципы и аспекты РМСТ как объекта синтеза определяют

PMCT как систему. Их (принципов и аспектов) реализация невозможна без системного подхода к самому процессу синтеза PMCT, что содержательно заложены в понятии "АС PMCT на ИТБ ГПЯ" [12]. При этом множество известных принципов ( $P_{AC}$ ) является результатом интегрированного рассмотрения множества принципов технологии механосборки ( $P_{MC}$ ), роботизированных технологий ( $P_{PP}$ ), синтеза и как такового, и как неотъемлемой составляющей процесса проектирования ( $P_C$ ), автоматизации процесса синтеза ( $P_A$ ) и гибкого производства ( $P_T$ ):

$$(P_{AC}) = (P_{MC}) \cap (P_{PP}) \cap (P_C) \cap (P_A) \cap (P_T) \quad (1)$$

В [12] выделены следующие принципы ( $P_{AC}$ ): абстрагирования, модульности, иерархии, структурированности, системности, целостности, эмерджентности, устойчивости, типизации, параллелизма, рекуррентности, итерационности, самостоятельности (автономности, независимости), инвариантности, корреляционности, концептуальности, гипотетичности, аксиоматичности, декомпозиции и композиции, а также результативности (завершенности).

Указанные принципы множества ( $P_{AC}$ ) допускают внутреннюю композицию в определенных сочетаниях, что обусловлено интегрированностью подхода к формированию ( $P_{AC}$ ) и содержательной особенностью постановок задач рассматриваемой проблемы.

Использование аксиоматического подхода воспроизводит одноименный принцип АС PMCT на ИТБ ГПЯ, обеспечивает сущность построения и функционирования соответствующей функции автоматизированного синтеза (ФАС) PMCT [16], призвано ограничить свободные (субъективные) определения научных и прикладных решений и рассматривается как свидетельство постоянства знаний о роботизированных гибких производственных системах и их составляющих. Указанное воспроизводится разработанной системой (множеством) аксиом [7]. При этом выдержаны требования *непротиворечивости* (из аксиом невозможно получить противоречивая умозаключения), *полноты* (обеспечивается вывод с аксиом необходимых аналитических и регулярных выражений при формировании ФАС) и *независимости* (аксиома есть таковой тогда и только то-

гда, когда каждая из аксиом не выводится из других аксиом и не зависит (не определяется) от основных положений формирования ФАС, т.е. других аксиом).

Предложенные аксиомы, из которых путем выводов преимущественно или исключительно логическими средствами имплицитно выводится состав действий по дальнейшему формированию ФАС, которые положены в основу вычислительных процедур АС, являются семантически непротиворечивыми, так как формально интерпретированы, то есть имеют модели, представляющие собой приближенное описание с использованием математической символики истинной интерпретации формального исчисления сущности аксиом. При формировании аксиоматического подхода к процессу синтеза и сущности PMCT в качестве средств формулировки аксиом использованы вычисления предикатов I-го порядка и вычисления высказываний как средства вычисления предикатов. Именно формализация сущности каждой аксиомы приводит к непротиворечивости, полноте и независимости всей *системы аксиом*.

Аксиоматизация основных положений сущности и синтеза PMCT на ИТБ ГПЯ создает надежную логико-математическую формальную основу для дальнейшего формирования и реализации ФАС PMCT на ИТБ ГПЯ как основы вычислительных процедур указанного процесса.

Предложенная система из 12 аксиом условно разделена на 3 группы: 1 группа – аксиомы А1–А5, раскрывающие "внутреннее" содержание и структуру PMCT; 2 группа – аксиомы А6–А8, раскрывающие "внешние" отношения между структурными элементами ИТБ ГПЯ и PMCT как таковыми; 3 группа – аксиомы А9–А12, связанные с синтезом PMCT [8, 15, 16].

Общая задача АС PMCT представляет собой решение определенного множества задач анализа и синтеза, решение которых значительно облегчается и трактуется при условии их целенаправленного и упорядоченного решения с учетом конечной цели АС PMCT. Указанное может быть реализовано при условии наличия концепции, являющейся составляющей при рассмотрении PMCT как объекта синтеза.

Основой принятой *концепции* является следующее: АС PMCT на ИТБ ГПЯ рассматривается

как определение так называемых условий решаемости (УР), которые обусловлены содержательной сущностью и постановкой общей задачи синтеза. Определяются УР поэтапно путем генерирования множества параметров РМСТ, являющихся допустимыми и оптимальными на рассматриваемом уровне в принятом смысле, и выбора оптимальной РМСТ по выбранному глобальному критерию. Содержание определения УР структурированно базируется на декомпозиции общей задачи синтеза на составляющие, в соответствии с чем последовательно определяются так называемые условия функциональной, параметрической и критериальной реализуемости (соответственно УФР, УПР и УКР) [12, 16].

УФР определяют некоторое множество условий, параметров, характеристик, определяющих возможность ПР функционально реализовать технологическое взаимодействие между составляющими ИТБ и ОМ в соответствии с известным  $TM^{dg}$  и других условий и ограничений. УФР определяются множеством одноименных ФАС  $({}_f\varphi(\tau)_{i_f} | i_f = \overline{1, n_f})$ , где  $n_f$  – их общее количество.

Наличие УПР означает формирование также одноименных ФАС  $({}_p\varphi(\tau)_{i_p} | i_p = \overline{1, n_p})$  количеством  $n_p$ , определяемых на множестве решений задач УФР (а значит соответствующих функций  ${}_f\varphi(\tau)_{i_f}$ ) с целью отбора вариантов РМСТ предыдущего УФР-го уровня, которые пригодны для дальнейшего рассмотрения.

Определение УКР выполняется на множестве имеющихся функций УПР для определения оптимальной РМСТ по принятому критерию оптимальности с решением конечного множества задач мощностью  $n_c : ({}_c\varphi(\tau)_{i_c} | i_c = \overline{1, n_c})$ . Оптимальной является та функция  ${}_c\varphi(\tau)_{i_c}$ , которой соответствует экстремум принятого критерия  $F_{opt_{i_c}} \rightarrow extr$  с учетом принятых ограничений.

Указанная концепция, которую можно назвать "концепцией решаемости", целесообразна и уместна в исследованиях по АС РМСТ, так как:

- воспроизводит реальность и очевидное наличие проблемы в инженерной практике при

отсутствии научно обоснованных основ решения содержательной совокупности задач рассматриваемой проблемы;

- в значительной мере компенсирует отсутствие системности и интегрированности в имеющихся наработках, а также опыта проектирования / синтеза РМСТ в ГПЯ;

- акцентировано воспроизводит именно "роботизированную" составляющую РМСТ в ГПЯ;

- принципиально может быть использована при АС РМСТ как таковых;

- предоставляет дополнительные возможности при решении ряда технологических задач анализа при выборе технологического оборудования, например, ПР и т. п.

По результатам анализа содержательности РМСТ сущность выполняемых ПР функций при реализации РМСТ по  $TM^{dg}$  может быть охарактеризована как технологически закономерная эволюция во времени и пространстве состояния и состава так называемого технологического роботизированного комплекта ( $TRK^{dg}$ ), являющегося неотъемлемой составляющей технологической роботизированной системы ТРС, которая (эволюция) сопровождается изменением во времени  $\tau$  информационных  $I(\tau)$ , материальных  $M(\tau)$  и энергетических  $E(\tau)$  потоков, связанных со структурными составляющими ТРС и процессно-событийными явлениями, протекающими в ней (ТРС) [10, 12, 15, 16, 31]. При этом в состав ТРК входят Сх ПР,  $OM_{t-1}^{dg}/OM_t^{dg}$  (см. далее), приспособление (Пр) каждой  $t$ -ой РП –  $Pr_t$ . Указанное является содержанием принятой *парадигмы*, рассматриваемой в качестве составляющей системного подхода к синтезу РМСТ.

Параметры и составляющие ТРК как составляющей ТРС впервые описаны в [16] и в [12] представлены как иллюстрация принципа гипотетичности, а также принципов абстрагирования, системности, типизации, декомпозиции и композиции при АС РМСТ.

На основании анализа многих информационных источников, интегрировано представленных в [15] и с учетом [6, 28, 29, 35, 39], можно утверждать, что любая РМСТ в общем случае (на определенном уровне абстрагирования) может

быть представлена графом  $G^{dg}$ , вершинами  $S^{dg}$  которого являются отдельные составляющие, а ребра есть связи  $R^{dg}$  между составляющими  $S^{dg}$ , которые в случае ориентированных и взвешенных ребер можно рассматривать как методическую последовательность определения множества отношений при определении составляющих РМСТ:

$$G^{dg} = (S^{dg}, R^{dg}, (S_i^{dg}; S_j^{dg})) S^{dg} \in \\ \in (Gm, Kn, Dn, Ct, En, Tr, \tau(Q), Rl, Ec, Ac, Fc, F_{opt}); \\ i \neq j; (S_i^{dg}; S_j^{dg}) \in S^{dg} \quad (2)$$

где  $Gm, Kn, Dn, Ct, En, Tr, \tau(Q), Rl, Ec, Ac, Fc, F_{opt}$  – составляющие РМСТ (элементы  $S^{dg}$ ), соответственно геометрические, кинематические, динамические, управленческие, энергетические, траекторные, временные (производительность), надежностные, экономические, точностные, силовые и критериальные (оптимизационные);

$R^{dg} \in (\rightarrow, \leftrightarrow, \leftarrow, \dots)$  – отношения соответственно порядка, равноценности, предшествования и т.п.

Фактически каждое ребро между двумя составляющими РМСТ  $S_i^{dg}$  и  $S_j^{dg}$  может быть формально представлено следующим образом:

$$R^{dg}(S_i^{dg}; S_j^{dg}) = S_i^{dg} R^{dg} S_j^{dg} \quad (3)$$

Необходимо отметить, что на сегодня отсутствует единая комплексная методика упорядоченного проектирования / синтеза и расчета параметров составляющих РМСТ с интегрированным учетом выражений (2) и (3).

Содержание любой РМСТ на уровне материальных потоков может интерпретироваться как трансформация заготовки (сборочных компонентов)  $OM_o^{dg}$   $d$ -го изделия из их  $g$ -ой группы, поступающей (подаваемой) на вход ГПЯ –  $PP_I$ , в готовое изделие (сборочную единицу, сборочный изделие)  $OM_T^{dg}$ , которое снимается (удаляется) с  $T$ -ой конечной рабочей позиции  $PP_T$  – выход ГПЯ [9, 15]. При этом ПР перемещает  $OM_i^{dg}$  между рабочими позициями, технологически обслуживает каждую  $PP_i$  объектами манипули-

рования (загружает  $PP_i$  объектом  $OM_{i-1}^{dg}$ , а разгружает  $PP_i$  объектом  $OM_i^{dg}$ ). Именно указанные технологически согласованные взаимодействия между ПР,  $OM_i^{dg}$ ,  $PP_i$  и  $PrPP_i$  на уровне информационных, энергетических и материальных взаимокорелированных потоков воспроизводят фактор роботизации, определяемый использованием ПР, и содержательные особенности РМСТ, реализуемых в ГПЯ [15].

Таким образом, главной отличительной чертой РМСТ есть технологически обусловленный технологическим маршрутом  $TM^{dg}$  набор движений (перемещений)  $Sx$  ПР с/без  $OM_{i-1}^{dg}/OM_i^{dg}$ , что целесообразно рассматривать как траекторное пространство  $TrSp^{dg}$  [16], выполняемое с определенными законами управления, имеющими определенные параметры функционирования.

В качестве единицы технологического деления РМСТ (элемента, элементарной составляющей) целесообразно принять технологический переход перемещения ТРК между двумя технологически последовательными (соседними) опорными точками  $TrSp^{dg}$ , который назван *элементарным роботизированным перемещением* (ЭРП). В основу любого ЭРП положено перемещение ( $Tr$ )  $Sx$  ПР, определяемое взаимным расположением звеньев МС ПР из множества допустимых (т.е. конфигурационным пространством МС ПР [18–20]), который в свою очередь определяется величинами значений и изменений обобщенных координат (ОК)  $q^{dg}(\tau)$ , их скоростями  $\dot{q}^{dg}(\tau)$  и ускорениями  $\ddot{q}^{dg}(\tau)$ . Последние необходимы для определения законов управления каждой  $q$ -ой ОК –  $u_q^{dg}(\tau)$ .

Очевидно, что упорядоченное множество ЭРП формирует соответствующие траектории перемещений  $Sx$  ПР при обработке (сборке) определенной партии  $OM$  (изделий) при следующих *режимах функционирования ПР*, названных *партионными*:

- выходе на установившийся режим (В на УР); при этом анализируется состав движений и их продолжительность от начала функционирования ГВК с первым  $OM_o^{dg}$  до выхода на уста-

новившийся режим по составу движений (перемещений) и времени (продолжительности) их выполнения;

- установившийся режим (УР) как таковой, когда на каждой  $РП_i$  выполняется технологическое действие на  $ОМ_i^{dg}$ , то есть задействованы все единицы ТО ГПЯ, с повторяемой одинаковой продолжительностью и составом выполнения манипуляционных действий ПР, что называется длительностью цикла работы ГПЯ;

- выходе из установившегося режима (В из УР), когда последовательность и продолжительность технологического обслуживания рабочих позиций с момента окончания наличия объектов  $ОМ_o^{dg}$  на входе ГПЯ до получения на выходе, то есть на  $ПР_T$ , последнего  $ОМ_T^{dg}$ ; параметры В из УР формируются путем последовательного исключения из  $ТМ^{dg}$  тех РП, на которых уже не выполняется технологическое действие на  $ОМ_i^{dg}$  по  $ТМ^{dg}$ .

Указанные режимы функционирования ПР (В на УР, УР, В из УР) выполняются (реализуются) за счет:

- упорядоченной последовательности отработок перемещений определенной  $i^{dg}$ -ой ОК, тогда  $Tr^{dg} = \left\langle q_{i^{dg}} \mid i^{dg} = \overline{1, n^{dg}} \right\rangle$ , где  $n^{dg}$  – количество активных ОК по  $ТМ^{dg}$  из числа активированных  $n$ ,  $n^{dg} < n$  [17], что характерно и типично для ПР с цикловой и позиционной (обозначение в ПР производства стран СНГ – Ц и П, Ф2) системами управления (СУ);

- одновременной и согласованной отработки перемещения нескольких ОК из числа  $n^{dg} \leq n$  с выполнением сложных, иногда "сглаженных", в том числе с обходом препятствий, траекторий  $Tr^{dg}(\tau)$  и  $TrSp^{dg}(\tau)$ , что характерно для ПР с контурной (К, Ф3) СУ.

Поэтому в общем случае  $Tr^{dg}(TrSp^{dg})$  перемещения Сх (ТРК) с / без  $ОМ_{i-1}^{dg}/ОМ_i^{dg}$  является упорядоченным множеством ЭРП, каждое из которых реализуется или при активной одной

$q_{i^{dg}}$ -ой ОК, или при согласованно активных двух и более ОК:  $\left( q_{i^{dg}} \mid i^{dg} = \overline{1, (n^{dg} \leq n)}; \mid n^{dg} \geq 2 \right)$ .

Таким образом, указанное выше позволяет констатировать, что системный подход к синтезу РМСТ определяют следующие составляющие: исходные данные (есть общими вообще), принципы АС, предложенные концепция, парадигма, аксиомы и РМСТ как таковые (см. рис. 1). На основании [15] и содержания рис. 1 можно утверждать, что на определенном уровне абстрагирования синтез оптимальной в заданном смысле РМСТ обеспечивается наличием множества функций автоматизированного синтеза (ФАС)  $\varphi(\tau)_{i_F}$  мощностью  $n_F$ , которое (множество) с учетом перечисленных составляющих определяет наличие экстремума принятого критерия оптимальности  $F_{opt_{ic}} \rightarrow extr$ :

$$\left( \varphi(\tau)_{i_F} \mid i_F = \overline{1, n_F} \right):$$

$$\left[ \begin{array}{l} \left( \left( I(\tau)_{in} \times M(\tau)_{in} \times E(\tau)_{in} \right) \times \right. \\ \left. \times (P_{AC}) \times \left\langle {}^{In}TPK_{cm} \right\rangle \times \right. \\ \left. \times \left( {}_f\varphi(\tau) \times {}_p\varphi(\tau) \times {}_c\varphi(\tau) \right) \right) \\ \left. \rightarrow \left( I(\tau)_{ou} \times M(\tau)_{ou} \times E(\tau)_{ou} \right) \right] \rightarrow \quad (4) \\ \rightarrow (F_{opt_{ic}} \rightarrow extr).$$

Отдельной интерпретации, объяснений и комментариев требует одна из технологических особенностей использования ПР в механосборке (см. рис. 1), а именно – траектории перемещения элементов МС ПР – звеньев и Сх. Последний особенно важен, так как являясь конечным конструктивным элементом МС ПР, непосредственно технологически взаимодействует с  $ОМ$  при перемещениях технологического содержания [15, 16, 19–22].

На рис. 2 представлен пример графической интерпретации возможных траекторий перемещения полюса Сх, т.е.  $Tr^{dg}(\tau)$ , и / или  $TPK^{dg} \supset Сх$ , рассматриваемых как траекторное пространство отработки траекторий при изготовлении  $d$ -го  $ОМ$   $g$ -ой группы изделий.



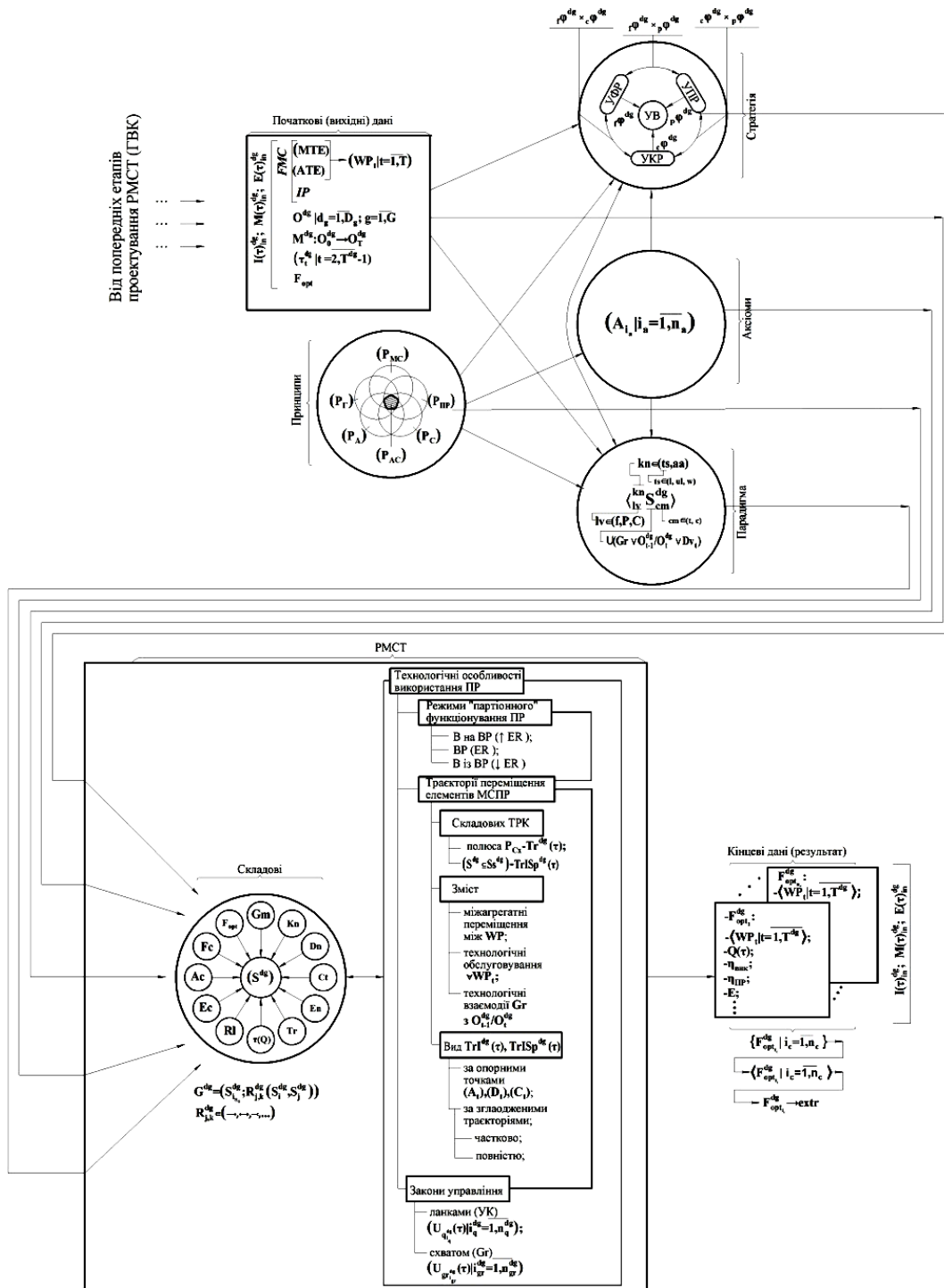


рис. 1 Обобщенная схема составляющих, определяющих системный подход к синтезу РМСТ на ИТБ

ГПЯ

На основании вышеизложенного и содержания рис. 2 предлагается рассматривать  $Tr^{dg}(\tau)$  и/или  $TrSp^{dg}(\tau)$  как реализуемые по:

- аналитически определенным координатам множества опорных точек  $(A_t)$ ,  $(C_t)$ ,  $(D_t)$ ,  $t = \overline{1, T}$ ;
- полностью сглаженным траекториям между конечными опорными точками  $(C_i)$  и  $(C_j) \forall (i \neq j) = \overline{1, T}$ ;
- частично сглаженным траекториям между опорными точками  $(D_i)$  и  $(D_j)$ ;  $(D_i)$  и  $(C_j)$ ;  $(C_i)$  и  $(D_j) \forall (i \neq j) = \overline{1, T}$ .

Указанное систематизировано и представлено в таблице 1.

Упомянутые виды перемещений (межагрегатные, технологического обслуживания, технологического взаимодействия) полюса  $P_{Cx}$  с / без ОМ в  $Cx$  по технологическому маршруту  $TM^{dg}$  соответствуют траекториям  $Tr^{dg}(\tau)$ , реализуемых на упорядоченных множествах опорных точек  $(A_t)$ ,  $(D_t)$  и  $(C_t)$ , т.е.:

$$Tr^{dg}(\tau) = \left\langle \begin{array}{l} C_{t-1} - D_{t-1} - A_{t-1} \\ -A_t - D_t - C_t \end{array} \middle| t = \overline{1, T} \right\rangle. \quad (5)$$

С учетом геометрических форм и размеров звеньев МС ПР,  $Cx$  и  $OM^{dg}$ , то есть с учетом 3D-параметров составляющих ТРК [16], имеем:

$$\begin{aligned} TrSp^{dg}(\tau) &= tr_{u(\tau)}^{dg}(TPK^{dg}) = \\ &= \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg}) = \\ &= \left\langle \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg})_{C_i \dots C_j} \middle| (i \neq j) = \overline{1, T} \right\rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

Указанные в (6) обозначения расшифрованы ниже.

При реализации указанных видов перемещений соответствующие траектории могут быть "сглаженными", т. е. выполняться в виде аппроксимирующих кривых с учетом известных координат точек  $(C_t | t = \overline{1, T})$ . В этом случае перемещения полюса  $Cx$  ПР может быть представ-

лено соответствующей траекторией следующим образом:

$$\begin{aligned} Tr^{dg}(\tau) &= \left\langle C_1 \dots C_i \dots C_j \dots C_T \middle| t = \overline{1, T} \right\rangle = \\ &= \left\langle C_i \dots C_j \middle| (i \neq j) = \overline{1, T} \right\rangle. \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) с учетом 3D-параметров всех элементов ТРК можно представить (как и выражение (5)) как траекторное пространство, формируемое как след  $tr(TPK^{dg})$  определенного состава ТРК, перемещаемого по закону  $u(\tau)$ :

$$\begin{aligned} TrSp^{dg}(\tau) &= tr_{u(\tau)}^{dg}(TPK^{dg}) = \\ &= \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg}) = \\ &= \left\langle \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg})_{C_i \dots C_j} \middle| (i \neq j) = \overline{1, T} \right\rangle \end{aligned} \quad (8)$$

Возможна ситуация, когда четко определенными условиями синтеза РМСТ есть координаты опорных точек траектории  $(C_t)$  и  $(D_t) \forall t = \overline{1, T}$ , обусловленные конструктивными особенностями и геометрическими параметрами элементов  $TPK^{dg}$ .

В этом случае имеет место частичное сглаживание траектории, когда перемещения  $TPK^{dg}$  между любыми точками  $(C_t)$  и  $(D_t)$ , а также между  $D_t$  и  $C_t$  выполняются по предварительно рассчитанным определенным образом координатам точек  $C_t$  и  $D_t$ , а перемещения как таковые, например, между точками  $D_i$  и  $D_j$ , выполняются по сглаженным траекториям.

Поэтому с учетом выражений (5) и (7) траектория полюса  $Cx$  ПР  $Tr^{dg}(\tau)$  может быть формально представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} Tr^{dg}(\tau) &= \left\langle C_t - D_t \dots (A_t \dots A_{t+1}) \dots D_{t+1} - C_{t+1} \middle| t = \overline{1, T} \right\rangle = \\ &= \left\langle C_i \dots D_i \dots D_j \dots C_j \middle| (i \neq j) = \overline{1, T} \right\rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

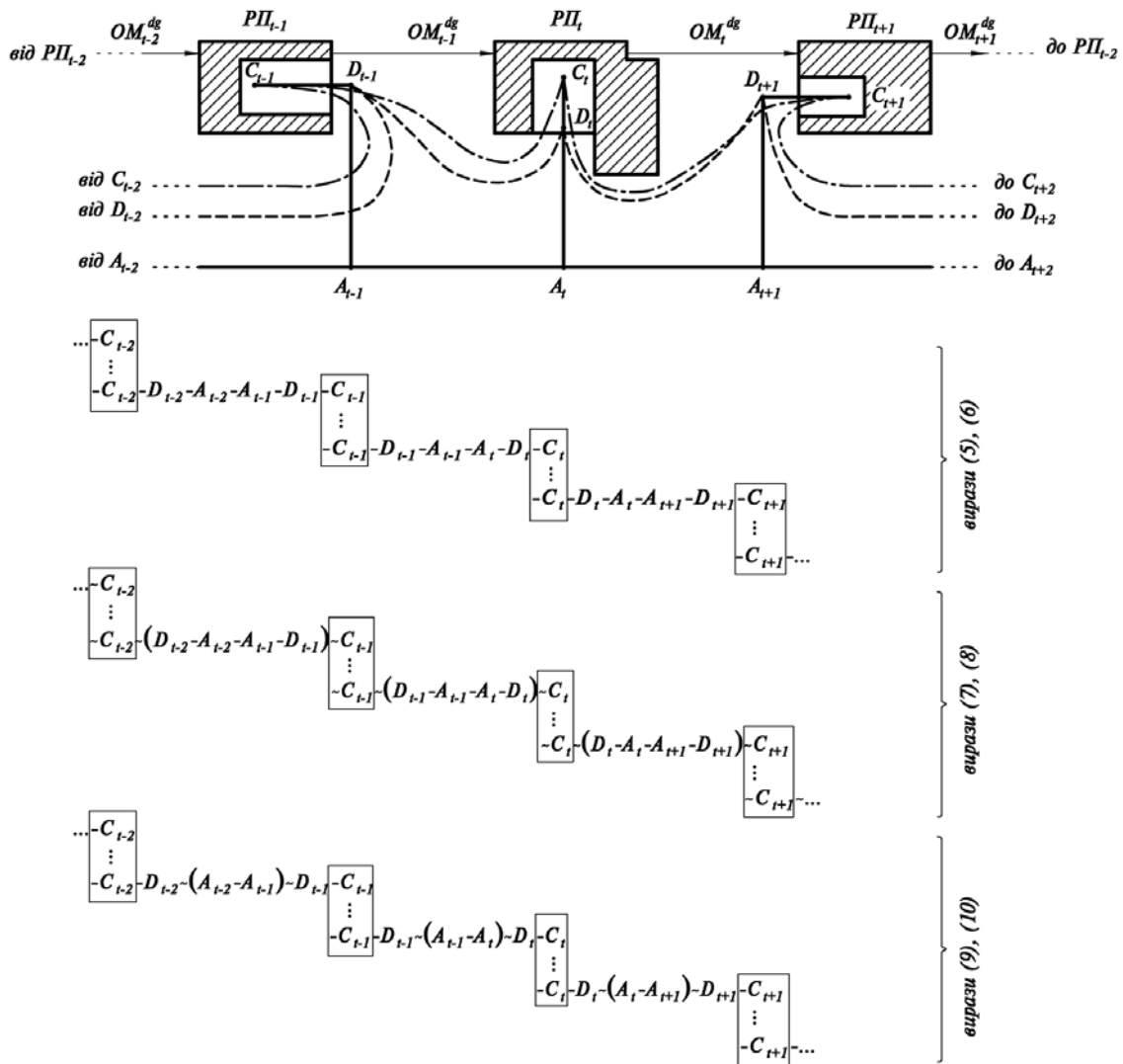
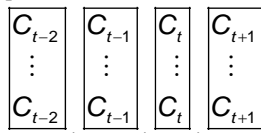


рис. 2 Пример графической интерпретации  $Tr^{dg}(\tau)$  и  $TrSp^{dg}(\tau)$  :

- при аналитически определенным координатам точек  $(A_i)$ ,  $(D_i)$  и  $(C_i)$  по выражениям (5), (6);
- · - · - полностью сглаженными траекториями между опорными точками  $(C_i)$  и  $(C_j)$  ( $i \neq j$ ) =  $\overline{1, T}$  по выражениям (7), (8);
- - - - частично сглаженными траекториями между опорными точками  $(D_i)$  и  $(D_j)$  ( $i \neq j$ ) =  $\overline{1, T}$  по выражениям (9), (10);



— технологическое действие на  $OM_{t-3}^{dg}$ ,  $OM_{t-2}^{dg}$ ,  $OM_{t-1}^{dg}$ ,  $OM_t^{dg}$ , ... соответственно на  $PP_{t-2}$ ,  $PP_{t-1}$ ,  $PP_t$ ,  $PP_{t+1}, \dots$

**табл. 1** Виды  $TrSp^{dg}(\tau)$  перемещений  $(Cx \pm OM_{t-1}^{dg}/OM_t^{dg}) \subseteq TPK^{dg}$  технологического содержания

№ п/п	Перемещения		
	название	по траекториям с опорными точками $(A_i), (D_i), (C_i)$	по "сглаженным" траекториям
1	межагрегатные между $PP_i$ та $PP_j$	$\langle A_i - A_j   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle$	$\langle D_i - D_j   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle \nabla$ $\nabla \langle C_i - C_j   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle \nabla$ $\nabla \left( \langle C_i - D_j \rangle \nabla \langle D_i - C_j \rangle \right)   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T}$
2	технологического обслуживания $\forall PP_i   t = \overline{1, T}$	$\langle (A_i - D_i - C_i) - (C_i - D_i - A_i)   t = \overline{1, T} \rangle$	$\langle D_i - (D_j - C_j)   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle \nabla$ $\nabla \langle C_i - (D_j - C_j)   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle \nabla$ $\nabla \langle C_i - C_j   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle$
3	технологического взаимодействия $Cx$ с $(OM_t^{dg} + PrPP_t)$	$\langle (D_i - C_i) - (C_i - D_i)   \forall t = \overline{1, T} \rangle$	$\langle (D_i - C_i) \rangle \nabla \langle D_i - C_j \rangle \nabla$ $\nabla \langle C_i - C_j   \forall (i \neq j) = t = \overline{1, T} \rangle$

Здесь: –  $A_i - A_j$  – движения межагрегатных перемещений ТРК  $(Cx \pm OM_{t-1}^{dg}/OM_t^{dg})$ , реализуются глобальными перемещениями звеньев МС стационарных ПР;  
 –  $A_i - D_i$  – движения входа РТК  $(Cx \pm OM_{t-1}^{dg})$  в рабочее пространство (РПр)  $PP_i$ , реализуются региональными перемещениями звеньев МС ПР;  
 –  $D_i - C_i$  – движения установки ТРК  $(Cx \pm OM_{t-1}^{dg})$  в  $PrPP_t$ , выполняются локальными движениями звеньев МСПР;  
 –  $C_i - D_i$  – движения полюса  $Cx$  при снятии геометрически-силовых связей РТК  $(OM_t^{dg} + Cx)$  с  $PrPP_t$  (локальные движения МС ПР);  
 –  $D_i - A_i$  – движения выхода ТРК  $(Cx \pm OM_{t-1}^{dg})$  РПр  $PP_i$  (региональные движения);  
 –  $\nabla$  – символ логической операции "исключающее ИЛИ";  
 – "+" или "-" – соответственно наличие или отсутствие  $OM$  в  $Cx$  ПР

В терминах ТРК по аналогии с выражениями (6) та (8) имеем:

$$TrSp^{dg}(\tau) = tr_{u(\tau)}^{dg}(TPK^{dg}) = \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg}) = \left\langle \bigcup_{p(TPK^{dg}) \in TPK^{dg}} tr_{u(\tau)}^{dg} p(TPK^{dg})_{C_i - C_j \dots D_j - C_j} | (i \neq j) = \overline{1, T} \right\rangle \quad (10)$$

В выражениях (5) – (10) символы "-" и "~" указывают на траектории перемещения соответственно между определенными опорными точками и сглаженные траектории.

Траектории перемещения полюса  $Cx$  –  $Tr^{dg}(\tau)$  и  $TPK^{dg} - TrSp^{dg}(\tau)$  по выражениям (5) – (6), (7) – (8) и (9) – (10) на рис. 2 проиллюстрированы соответственно сплошной – (—); штрих-пунктирной (— · — ·) и пунктирной – (---) линиями.

Очевидно, что в реальной практике  $Tr^{dg}(\tau)$  и  $TrSp^{dg}(\tau)$  могут быть сгенерированы как сочетание в любой последовательности указанных видов траекторных перемещений, т.е. может иметь место комбинированное сглаживание (комбинированная траектория).

Указанные режимы функционирования и перемещения  $Sx$  (траектория полюса  $Tr^{dg}(\tau)$ ) и  $TPK^{dg}$  (тракторное пространство  $TrSp^{dg}(\tau)$ ) технологического содержания при синтезе РМСТ на известном множестве  $(PP_i | t = \overline{1, T})$  и  $OM^{dg}$ , будучи одной из составляющих содержательной сущности РМСТ как таковых, указывают на необходимость синтеза соответствующих законов управления как каждым  $i_q^{dg}$ -ым активным звеном ( $q_i^{dg}$ -ой ОК) –  $u_{q_i^{dg}}(\tau)$ , так и их (ОК)

упорядоченным множеством  $\left\langle u_{q_i^{dg}}(\tau) \Big|_{i_q^{dg}} = \overline{1, n_q^{dg}} \right\rangle$ ,

где  $n_q^{dg}$  – количество ОК, являющихся активными при реализации РМСТ по  $TM^{dg}$ , что в свою очередь определяют законы управления перемещения полюса  $Sx$  ПР –  $\left( u_{q_{igr}^{dg}}(\tau) \Big|_{igr} = \overline{1, n_{igr}^{dg}} \right)$ .

Указанное выше позволяет с некоторым допущением трактовать законы управления как технологические параметры перемещений звена / звеньев и  $Sx$  с / без  $OM_{t-1}^{dg} / OM_t^{dg}$  (аналогично подачам, скоростям и т.п. при проектировании и реализации технологических процессов механообработки резанием [5]) как по величине каждой обобщенной координаты  $q^{dg}(\tau)$ , ее скорости  $\dot{q}^{dg}(\tau)$  и ускорения  $\ddot{q}^{dg}(\tau)$ , так и по усилиям, моментам и т.д., возникающих в соответствующих приводах отдельных активных степеней подвижности МС ПР, или должны быть обеспечены при этом.

#### 4. ВЫВОДЫ

Предложенные составляющие комплексного подхода, а именно аксиомы, парадигма, концепция, аспекты и принципы, как общие кибернетические, так и принципы синтеза РМСТ на ГПЯ, а также выявленные составляющие проявления РМСТ вместе с определенными технологическими особенностями использования ПР в механосборочных технологиях дают возможность реализации системного (комплексного) подхода к решению задач АС РМСТ на ИТБ ГПЯ на каче-

ственно новой основе за счет учета наибольшего количества параметров, условий, критериев и ограничений. Кроме того, предложенный поход к синтезу РМСТ на ИТБ ГПЯ создает предпосылки для разработки формальной теории автоматизированного синтеза РМСТ как методической основы повышения эффективности технологической подготовки роботизированных механосборочных производств машино- и приборостроения.

#### Литература

1. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: [підручник] Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін та ін. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 680 с.
2. Гнучкі комп'ютерно-інтегровані системи: планування, моделювання, верифікація, управління: [підручник] / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 786 с.
3. Губанов В. А. Введение в системный анализ: [учебн. пособие] / Губанов В.А., Захаров В.В., Коваленко А.Н. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1988. – 232 с.
4. Директор С. Введение в теорию систем / С. Директор, Р. Рорер; пер. с англ. В.Н. Бусленко и Н.И. Осетинского; под. ред. Н. П. Бусленко. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
5. Жолобов О.О. Технологія автоматизованого виробництва: [підручник] / О.О. Жолобов, В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 1014 с.
6. Кирилович В.А. Адаптивність сватів промислових роботів механообробних ГВК / В.А. Кирилович, І.Ю. Черепанська, А.Ю. Сазонов // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла. – Дніпропетровськ, Наука і освіта. – 2010. – Вип. №11. – С.119–125.
7. Кирилович В.А. Аксиоматичний підхід до сутності роботизованих механоскладальних технологій та їх синтезу / Кирилович В.А. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2013 – 263–271. Кирилович В.А. Геометричний аспект тракторних задач роботизованих механоскладальних технологій / Валерій Кирилович, Ілона Сачук // Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КДТУ. – 2003. – Вип. №12. – С.210–214.
9. Кирилович В.А. Графо-аналітичне дослідження робочих зон портальних промислових роботів для автоматизованого синтезу роботизованих

- механоскладальних технологій / Валерій Кирилович, Олександр Козловський // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих учених 11-15 мая 2010г. "Прогресивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта". – Севастополь. – 2010. – С.247–248.
10. **Кирилович В.А.** Інформаційна модель об'єктів маніпулювання для умов роботизованих механоскладальних технологій / В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2009. – №4(51). – С.27–36.
11. **Кирилович В.А.** Корегування програмних траєкторій руху робочих органів промислових роботів при обході перепон / В.А. Кирилович, М.В. Богдановський // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2011. – №5(7)(53). – С.53–59.
12. **Кирилович В.А.** Принципи автоматизованого синтезу роботизованих механоскладальних технологій на відомому технічному базисі гнучких виробничих комірок / В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир, 2011. – №3(58). – С.33–47.
13. **Кирилович В.А.** Програмне забезпечення автоматизованого визначення циклової продуктивності механообробних ГВК / В.А. Кирилович, О.В. Підгиченко // Науковий вісник ХДМІ. Науковий журнал. – Херсон: Видавництво ХДМІ. – 2011. – №1(4). – С.286–300.
- Кирилович В.А.** Точність технологічного обслуговування промисловими роботами робочих позицій механообробних гнучких виробничих комірок // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті" MINTT-2011. 23–25 травня 2011р., м. Херсон. – Т. 1. – С.147–149.
15. **Кирилович В.А.** Теоретико-множинна інтерпретація проектування роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир, 2010. – №2(53). – Т.І. – С.35–43.
16. **Кирилович В.А.** Умови функціональної вирішуваності при автоматизованому синтезі роботизованих механообробних технологій в гнучких виробничих комірках / В.А. Кирилович // Науковий журнал "Технологічні комплекси". – Луцьк. – 2010. – №1. – С.136–145.
17. **Кирилович В.А.** Формування функціональних моделей маніпуляційних систем промислових роботів / В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, О.О. Писарчук, І.Ю. Черепанська // Міжнародний збірник наукових праць "Прогресивні технології і системи машинобудування". – Донецьк: ДонНТУ. – 2011. – Вип. №42. – С.118–124.
18. **Кобринский А.А.** Манипуляционные системы роботов: Основы устройства, элементы теории / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука, 1988. – 344 с.
19. **Корендяев А.И.** Теоретические основы робототехники: В 2 кн.: монография. Кн. 1 / под ред. С.М. Каплунова. – М.: Наука, 2006. – 383 с.
20. **Корендяев А.И.** Теоретические основы робототехники: В 2 кн.: монография. Кн. 2 / под ред. С. М. Каплунова. – М.: Наука, 2006. – 376 с.
21. **Мельничук П.П.** Задачі технологічної взаємодії схватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання в механоскладальних гнучких виробничих комірках / П.П. Мельничук, В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Збірник наукових праць Житомирського державного технологічного університету "Процеси механічної обробки в машинобудуванні". – Житомир, 2011. – Вип. №10. – С.24–41.
22. **Мельничук П.П.** Семантична модель технологічної взаємодії сватів промислових роботів з об'єктами маніпулювання / П.П. Мельничук, В.А. Кирилович, Р.С. Моргунов // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – Житомир, 2011. – №1(56). – С.24–31.
23. **Месарович М.** Общая теория систем: математические основы / М. Месаревич, Я. Такахара; пер с англ. Э.Л.Наппельбаума; под ред. В.С. Емельянова. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
24. **Месарович М.** Теория иерархических многоуровневых систем / Месарович М., Мако Д, Такахара И.; пер с англ. И.Ф. Шахнова. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
25. Методика автоматизованого кінематичного формування траєкторій переміщення схвата промислових роботів при синтезі роботизованих механоскладальних технологій / **М.В. Богдановський, В.А. Кирилович, М.О. Ковбаса, Т.Є. Нужда** // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. – 2004. – №4(31). Т.ІІ. – С.92–102.
26. **Пасічник В.А.** Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва: авторефер. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.А. Пасічник. – Київ, НТУУ "КПІ", 2009. – 36 с.
27. **Петров В.А.** Планирование гибких производственных систем / В.А. Петров, А.Н. Масленников, Л.А. Осипов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1985. – 182 с.
28. **Проць Я.І.** Захоплювальні пристрої промислових роботів: [навчальний посібник]. – Тернопіль, Тернопільський державний технологічний університет ім. І. Пулюя, 2008. – 232 с.

29. **Челпанов И.Б.** Схватыв промышленных роботов / И.Б. Челпанов, С.Н. Колпашников. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отделение, 1989. – 287 с.
30. **Эшби У.Р.** Введение в кибернетику / У.Р. Эшби. – Л.: ИИЛ, 1959. – 432 с.
31. **Angeles J.** Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms / Angeles J. – Second edition. – Springer. Verlag New York Inc., 2003. – 522 p.
32. **Keramas James G.** Robot technology fundamentals./ Keramas James G. – New York. Delmar Publishers, 1999. – 408 p.
33. **Kyrylovych V.** Automated technological equipment layout in industrial robots working area having complicated shape / Valeriy Kyrylovych, Oleksandr Pidtychenko // Proceeding of the International Scientific Conference MECHANICS 2008 / Scientific Bulletins. – Rzeszow, July 2008. – P.189–196.
34. **Kyrylovych V.** Computer-aided forming of working position service route by industrial robots / Valeriy Kyrylovych, Oleksandr Pidtychenko // Acta Mechanica Slovaca. – №2-A / 2006. – Košice, Jasná – Nízke Tatry Technical University of Košice, 2006. – P.297–304. (8<sup>th</sup> International conference ROBTEP 2006. Automation / Robotics in Theory and Practice, May 31 – June 2, 2006, Ročnik 10, Jasná – Nízke Tatry, Slovak Republic).
35. **Monkan. G. J.** Robot grippers / G. J. Monkan, S. Hesse, R. Steinmann, H. Schunk. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. – 452 p.
36. **Siciliano Bruno.** Springer Handbook of Robotics / Bruno Siciliano, Oussama Khatib. – Berlin: Springer, 2008. – 1631p.
37. **Spong M. W.** Robot Modeling and Control / M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar. – New York, John Wiley & Sons Inc., 2005 – 408 p.
38. Statistics, Market Analysis, Forecasts Case Studies and Profitability of Robot Investment. World robotics [електронне періодичне видання] – режим доступу: [http://www.worldrobotics.org/uploads/media/2015\\_Executive\\_Summary.pdf](http://www.worldrobotics.org/uploads/media/2015_Executive_Summary.pdf) [11.12.15].
39. **Xiong Chiahua.** Fundamentals of robotic grasping and fixturing / Chiahua Xiong, Han Ding, Youlun Xiong– USA: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2007. – 229 p.

## SYSTEMATIC APPROACH TO SYNTHESIS OF ROBOTIC MECHANICAL ASSEMBLY TECHNOLOGIES IN FLEXIBLE MANUFACTURING CELLS

**Valerii KYRYLOVYCH**

Technological Processes Automated Control and Computer Technologies Department,  
Zhytomyr State Technological University, Ukraine  
e-mail: [kiril\\_va@yahoo.com](mailto:kiril_va@yahoo.com) [ime@tu-sofia.bg](mailto:ime@tu-sofia.bg)

**Abstract:** The components of complex approach to the interpretation of robotic mechanical assembly technologies (RMAT) of machinebuilding and instrumentation and their synthesis as the systems in flexible manufacturing cells (FMC) are proposed. In this the FMC viewed as a system for which the cybernetic principles and aspects are analyzed and the nature of their content for robotic production conditions is disclosed. The RMAT synthesis process is also seen as a system, in which the such components as the proposed concept, principles, paradigm and axioms of the RMST synthesis are analyzed too. Their content is disclosed in the context of the use of industrial robots as an universal means of automation taking into account the selected of RMAT's components.

**Keywords:** systemic approach, robotic mechanical assembly technology, system, synthesis, principle, aspect, axiom, concept, paradigm, industrial robot, trajectory.





## МЕТОД ЗА ОБМЕН НА ДАННИ МЕЖДУ ПЕРСОНАЛЕН КОМПЮТЪР И РАЗВОЙНА ПЛАТКА BASYS2

Илия ТИНЬОКОВ Валентин ХРИСТОВ

катедра „Комуникационна и компютърна техника и технологии”, Югозападен университет “Неофит Рилски” - Благоевград, България  
e-mail: [iltiniokov@abv.bg](mailto:iltiniokov@abv.bg)

**Резюме:** Развойната платка Basys2 е удобно средство за проектиране на цифрови устройства върху FPGA интегрални схеми и провеждане на различни експерименти с тях. При някои проекти е необходимо да се осъществи предаване на данни от компютъра към Basys2 и/или обратно. За тази цел в практиката най-често се прибегва до използването на интерфейс RS-232. Това налага използването на допълнителен хардуер (разширителна платка, кабел, преходник USB към RS-232) и писането на допълнителен код за реализиране на протокола. В настоящата статия е представен друг подход за реализиране на обмен на данните, като върху развойната платка се имплементира DEPP интерфейс за комуникация с платките и се извикват подходящи API функции, извлечени от DLL библиотеките на програмата Adept. Предлаганият метод улеснява програмирането и хардуерната реализация – използва се само USB кабел, включен в комплекта на Basys2. Така усилията на проектанта могат да бъдат насочени към предметната задача на проекта, вместо към реализацията на предаването на данните. Освен това в края на настоящата статия е показан пример за практическото приложение на метода за обмен на данни. Използван е програмният език Delphi за да бъде реализиран метода за обмен на данни, което значително би улеснило програмисти на този език при реализирането на подобни проекти.

**Ключови думи:** развойна платка Basys2, обмен на данни, API функции на Adept2, DEPP интерфейс.

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Интегралните схеми от тип FPGA представят електрически конфигурируеми интегрални схеми с голяма и свръхголяма степен на интеграция. Те съдържат двумерна матрица от голям брой електрически конфигурируеми блокове, изпълняващи логически и аритметически функции и друга конфигурируема двумерна матрица от свързващи линии и шини. Развойната платка Basys2 на фирмата Digilent представлява удобно средство за проектиране, имплементиране и тестване на различни цифрови устройства върху FPGA интегрални схеми. Много често за устройства изискващи комуникация между персоналния компютър и развойната платка се използва стандартният интерфейс RS-232 [1,7], което води до допълнителни хардуерни разходи, както от страна на развойната платка (добавяне на разширителни платки), така и от страна на компютъра (много от съвременните компютри нямат RS-232 портове и трябва да се използва преходник USB към RS-232).

За работа с всички свои продукти фирмата производител на Basys2 разпространява свободно специализираната програмна система Adept2 [10].

В практиката Adept2 се използва най-често единствено за конфигуриране на FPGA матрицата чрез зареждане на създадения от потребителя конфигурационен файл от компютъра в FPGA интегралната схема на Basys2. Но възможностите на Adept2 не се ограничават само до това. Програмната система може да се използва също така и за тестване на развойната платка, за разширяване на нейните възможности чрез добавяне на виртуални входно/изходни устройства и за осъществяване на комуникацията между компютъра и платката. Всичко това се реализира посредством използването на специални DLL библиотеки, предоставящи разнообразни API функции за управление на развойните платки.

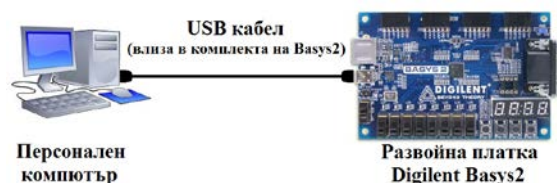
Наличната функционалност в разпространяваните с Adept2 библиотечни DLL файлове предполага да бъдат разработвани и собствени програмни комуникационни приложения. За улеснение на програмистите при работата им с API функциите на Adept2 е разработен пакетът за софтуерна разработка Adept SDK (SDK – Software Development Kit) [9]. Той включва документация с описание на различните модули и функциите в тях, примери за тяхното използване и набор от необходимите свързващи файлове за импорти-

ране на функциите и типовете от DLL файловете (".h" и ".lib" файлове). Adept SDK е разработен за програмния език C++ и е приспособен за използване на Visual Studio. DLL библиотеките при Windows са универсален начин за многократното използване на кода. Нещо повече, даден DLL файл може да бъде използван от различни програми, които при това могат да бъдат написани на различни програмни езици. В настоящата статия е представено как на базата на Adept SDK (написан на C++) да бъде реализиран API механизъм за комуникация с Basys2 чрез използването на друг широко разпространен език за програмиране Delphi. При направеното литературно проучване не бяха открити Delphi (Object Pascal) реализации, а използването на предлагания метод позволява бързото, лесно и без допълнителни разходи за хардуер, реализиране на проекти, изискващи комуникация между персонален компютър и Basys2. Сигналите между тях се предават по USB кабела за конфигуриране на развойната платка, който се предоставя в комплект с нея (фиг.1).

Целта на настоящата статия е да бъде представено реализирането на метод за комуникация между персонален компютър и развойната платка Basys2 посредством използването на API функциите на Adept2. По този начин осъществяването на комуникацията между компютъра и Basys2 се улеснява значително и отпада необходимостта от използване на допълнително оборудване.

## 2. ПРЕДАВАНЕ НА ДАННИ, ИЗПОЛЗВАЙКИ API ФУНКЦИИТЕ НА ADEPT

Както бе споменато по-горе, DLL библиотеките, включени в състава на Adept2, позволяват създаването на собствени програмни приложения, които да комуникират с развойните платки на Digilent. При необходимост от обмен на данни между компютъра и развойната платка е достатъчно в разработваната програма да се извикат съответните API функции на Adept2 (експортирани от DLL файловете). Тези API функции използват т.нар. DEPP интерфейс за обмен на данни с платката. Наименованието произтича от голямото сходство на Digilent Asynchronous Parallel Interface с EPP режима на работа на паралелния порт на компютъра [5].



фиг.1 Свързване на Basys2 с компютъра

DEPP интерфейсът работи на базата на един адресен регистър и набор от 8-битови регистри за данни. Данните се прехвърлят като първоначално в адресния регистър се зареди адресът на желанния регистър за данни и след това се заредят или прочетат самите данни. Размерът на адресния е ограничен до 8 бита. Той съхранява адреса на регистъра за данни, който се използва в момента. След като адресът на съответния регистър за данни е зареден в адресния регистър, може да се извършва многократно четене и/или запис в съответния регистър за данни. Броят на регистрите за данни зависи от адресния регистър и може да достига до 256. В FPGA матрицата не е необходимо да бъдат реализирани всички възможни регистри за данни – трябва да бъдат реализирани само необходимите за конкретната задача регистри [5].

Отделните API функции за работа с развойните платки са групирани (в зависимост от тяхното предназначение) в отделни DLL файлове. Функциите, с помощта на които се осъществява предаването на данни между компютъра и платката, са разположени в *depp.dll*. Тези функции позволяват записа и четенето на единичен регистър, записа и четенето на набори от регистри и записа и четенето на потокови данни от единичен регистър. За осъществяването на комуникацията също така са необходими някои функции от *dmgr.dll* (DMGR – Digilent Adept Device Access Manager). С тяхна помощ се осъществява свързване към устройството, което е имплементирано (върху развойната платка).

За реализирането на обмен на данни между компютъра и развойната платка Basys2 е необходимо да бъдат извикани някои от API функциите в следната последователност:

1) *DmgrOpen* (експортирана от *dmgr.dll*) – като входен параметър на тази функция се подава името на развойната платка (в случая 'Basys2'). Функцията се опитва да осъществи връзка с уст-

ройството. При успех се получава уникален идентификатор на осъществената връзка (хендъл на интерфейса, уникално цяло число), който впоследствие се използва при извикването на останалите API функции за да укаже отвореното устройство (Basys2);

2) *DeppEnable* (експортирана от *depp.dll*) – функцията се използва за инициализиране на DEPP интерфейса. Тази функция трябва да бъде извикана преди използването на останалите функции от *depp.dll*;

3) *DeppPutReg* (експортирана от *depp.dll*) – функцията се използва за запис на единичен байт данни в регистър с посочен адрес;

4) *DeppDisable* (експортирана от *depp.dll*) – използва се за прекратяване на стартирания DEPP интерфейс;

5) *DmgrClose* (експортирана от *dmgr.dll*) – прекратява връзката с устройството. При това се освобождава хендъла на интерфейса и той впоследствие не може да бъде използван за достъп до устройството.

Ако е необходимо прочитане на данни от развойната платка, то може да бъде използвана функцията *DeppGetReg* (експортирана от *depp.dll*). Тя извлича съдържанието на указания регистър за данни.

Подробно описание на използваните функции е дадено в ръководствата за програмиста за DMGR и DEPP [3,4]. Декларациите на функциите на езика C++ са дадени във файловете *dmgr.h* и *depp.h* от Adept SDK (разположени в директорията `\include\`) [9].

### 3. DELPHI РЕАЛИЗАЦИЯ НА МЕХАНИЗМА НА КОМУНИКАЦИЯ

За да се осъществи обмен на данни между компютъра и развойната платка Basys2 следва да бъде написана програма, използваща API функциите на Adept2 (която ще се изпълнява на компютъра) и освен това е необходимо в FPGA матрицата да се имплементира периферната част на DEPP интерфейса.

Библиотечните DLL файлове при Windows представляват универсален метод за многократното използване на кода. Ето защо, макар че Adept SDK е написан на C++, реализацията на механизма за комуникация на програмния език

Delphi също е възможна. За целта е необходимо описаните по – рано функции да бъдат експортирани по подходящ начин от съответните DLL файлове. При това функциите само се декларират в програмния код и се насочват към компилирания изпълним код от DLL библиотеките, т.е. за използването им е необходимо да се знаят само имената на функциите, типовете и предназначението на входните параметри и типа и значението на връщания резултат.

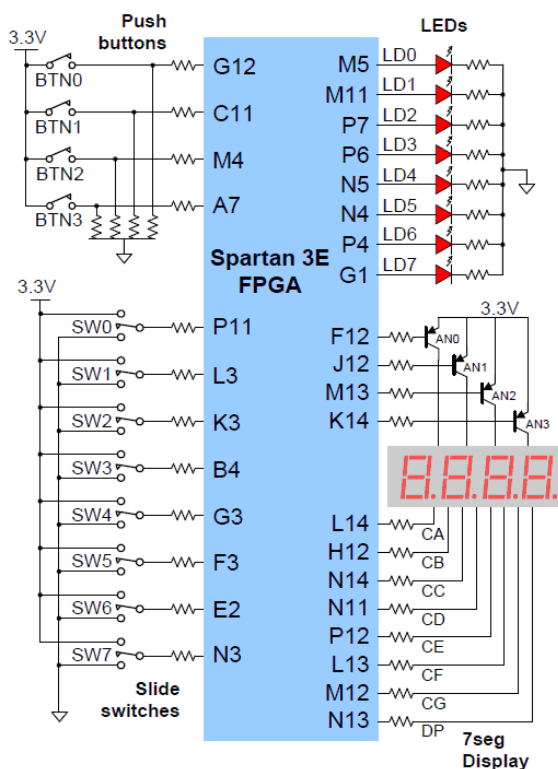
Експортирането на нужните API функции е възможно да бъде както имплицитно (DLL файловете се зареждат автоматично), така и експлицитно (програмистът зарежда DLL файловете ръчно тогава, когато това е необходимо). В настоящата работа се реализира експлицитно експортиране, тъй като то е по-гъвкаво и позволява програмата да провери дали всички необходими DLL файлове съществуват (ако на компютъра не е инсталиран Adept2 и липсват необходимите DLL файлове, то програмата ще покаже съобщение за грешка, но изпълнението няма да бъде прекратено). Освен това отпада необходимостта от допълнителни програмни модули, които да бъдат включени към *uses*.

При експлицитното експортиране програмистът първоначално зарежда необходимия DLL файл с функцията *LoadLibrary* (като параметър към нея се подава името на DLL файла). При успешно зареждане на файла, функцията връща хендъл (цяло число, уникален идентификатор), чрез който впоследствие се осъществява достъпът до DLL библиотеката. След това се осъществява свързване на декларираните в кода функции с експортираните от DLL библиотеката функции чрез извикването на *GetProcAddress*. Функцията приема като параметри хендъла към съответния DLL и публичното наименование на необходимата функция от DLL библиотеката. Най-накрая DLL модулът се освобождава чрез извикване на функцията *FreeLibrary* (като параметър се подава хендълът за съответния DLL) [11].

По-долу е дадена написаната процедура за изпращане на данни към Basys2 (използвана е интегрираната среда за разработка Delphi 2007):

```
procedure SendData(RegAddress, RegData : Byte);
var
  dmgrHandle, deppHandle : THandle;
  hif : LongInt;
```





Фиг.2 Входно/изходни линии и периферия в Basys2

Важна особеност, която трябва да се има в предвид, е начинът на използване на булевите променливи. Всяка от използваните функции връща като резултат псевдо булеви стойности – целочислени стойности, които имат булево значение, т. е. при стойност *false* (неуспешно изпълнение) функцията връща цялото число нула, а при *true* (успешно изпълнение) функцията връща цяло число, което е различно от нула.

#### 4. ИМПЛЕМЕНТИРАНЕ НА DEPP ИНТЕРФЕЙС В РАЗВОЙНА ПЛАТКА BASYS2. ПРИМЕР

Развойната платка Basys2 на Digilent представлява завършена, готова за използване платформа за проектиране и изграждане на реални цифрови устройства. Платката се състои от набор от периферия (фиг. 2) свързана към входно/изходните линии на FPGA матрицата, което позволява създаването на множество проекти без необходимост от включване на допълнителни

компоненти. С нейна помощ могат да бъдат изградени различни цифрови устройства – от различни логически схеми до сложни контролери [2,6,8].

Развойната платка Basys2 е базирана на чипа Xilinx Spartan-3E. Тя е проектирана за работа със свободната версия на средата за разработка ISE WebPack от Xilinx. USB кабелът в комплекта се използва както за предаване на данни между компютъра и платката, така и за нейното захранване. Освен това има възможност и за външно захранване. Функциите на Basys2 могат да бъдат разширени чрез включване на широк набор от допълнителни аналогови и цифрови входно/изходни PMOD модули (АЦП и ЦАП, драйвери за мотори, различни сензори). Някои от основните характеристики на развойната платка са представени в таблица 1.

На фиг.2 е показано свързването на входно/изходните устройства и съответните адреси на изходите на Spartan-3E.

За да се осъществи обмен на данни между компютъра и Basys2 не е достатъчно само да бъде написана програмата, използваща API функциите на Adept2 (която ще се изпълнява на компютъра). Освен това е необходимо във FPGA матрицата да се имплементира периферната част на DEPP интерфейса.

Интерфейсът DEPP се изгражда от една 8-битова двупосочна шина за данни (*DB0 – DB7*) и 4 контролни сигнала (*WRITE, ASTB, DSTB, WAIT*). Описание на сигналите, тяхното предназначение и режимите на работа са дадени в [5]. Примерен VHDL код за реализирането на DEPP интерфейса е даден в *dpimref.vhd*, който се намира в *\samples\depp\DeppDemo\logic\* директорията на Adept SDK [9]. Този VHDL код изгражда в FPGA матрицата един адресен регистър, 8 вътрешни регистра за данни (с адреси от 0 до 7), един регистър за прехвърляне на данни към Basys2 (с адрес 10) и два регистра за четене на данни от Basys2 платката (с адреси 8 и 9).

табл.1 Основни характеристики на Basys2

Характеристика	Описание
тип на програмируемата логическа матрица	Xilinx Spartan-3E със 100K или 250K гейта
свързване с развойния компютър	USB 2 порт за конфигуриране на FPGA чипа и за пренос на данни

конфигуриране на FPGA матрицата	от компютъра през USB порта или от XCF02 флаш ROM памет
честота на тактуване	25, 50 и 100 MHz, задавана от потребителя; има допълнително гнездо за поставяне на втори осцилатор
входно/изходни устройства	8 светодиода, 4-цифров седемсегментен дисплей, 4 бутона, 8 плъзгащи превключвателя, PS/2 порт, 8-битов VGA порт
разширяване на възможностите на развойната платка	четири на брой 6-пинови съединителя за свързване на външни входно/ изходни устройства или за включване на спомагателни Digilent PMOD платки

```

NET "DB<0>" LOC = "N2" ;
NET "DB<1>" LOC = "M2" ;
NET "DB<2>" LOC = "M1" ;
NET "DB<3>" LOC = "L1" ;
NET "DB<4>" LOC = "L2" ;
NET "DB<5>" LOC = "H2" ;
NET "DB<6>" LOC = "H1" ;
NET "DB<7>" LOC = "H3" ;
NET "EppASTB" LOC = "F2" ;
NET "EppDSTB" LOC = "F1" ;
NET "EppWAIT" LOC = "D2" ;
NET "EppWRITE" LOC = "C2" ;
NET "sw<0>" LOC = "P11" ;
NET "sw<1>" LOC = "L3" ;
NET "sw<2>" LOC = "K3" ;
NET "sw<3>" LOC = "B4" ;
NET "sw<4>" LOC = "G3" ;
NET "sw<5>" LOC = "F3" ;
NET "sw<6>" LOC = "E2" ;
NET "sw<7>" LOC = "N3" ;
    
```

По-долу е даден един пример за реализиране на цифрово устройство върху Basys2, което: 1) предава към компютъра кодовете постъпващи от превключвателите и бутоните на Basys2; 2) получава от компютъра двоични данни и ги визуализира посредством четирите седемсегментни индикатора на Basys2.

При създаването на частта от проекта за предаване на кодовете, съответстващи на превключвателите и бутоните, от Basys2 към компютъра файлът *dpimref.vhd* е използван без изменения.

Необходимо е само двоичните кодове, съответстващи на осемте превключвателя и на четирите бутона на Basys2 да се запишат съответно в регистъра с адрес 8 и в регистъра с адрес 9. За целта е разработен тъй наречения UCF файл за свързване на портовете от VHDL описанието (*dpimref.vhd*) с изводите на FPGA матрицата с превключвателите и бутоните (фиг.2). Подробно описание на назначенията на изводите на Spartan-3E, включително и на адресите, свързани към USB контролера, е дадено в ръководството за работа с платката [6].

Разработеният файл изглежда по следния начин:

```

NET "bm<0>" LOC = "G12" ;
NET "bm<1>" LOC = "C11" ;
NET "bm<2>" LOC = "M4" ;
NET "bm<3>" LOC = "A7" ;
NET "clk" LOC = "B8" ;
    
```

При създаването на частта от проекта за визуализиране на подаваните двоични числа от компютъра върху четирите седемсегментни индикатора, основната функционалност на разработваното устройство трябва да бъде запрограмирана допълнително, тъй като използвайки само *dpimref.vhd* може да се осъществи показване на получените данни чрез 8-те светодиода на развойната платка. За целта първо се инициира комуникационна сесия с платката и се зарежда нейният регистър за данни с адрес 10. Впоследствие тези данни се визуализират посредством четирите седемсегментни индикатора на платката Basys2. Блоквата схема на устройството, което управлява извеждането на цифрова информация е показана на фиг.3.

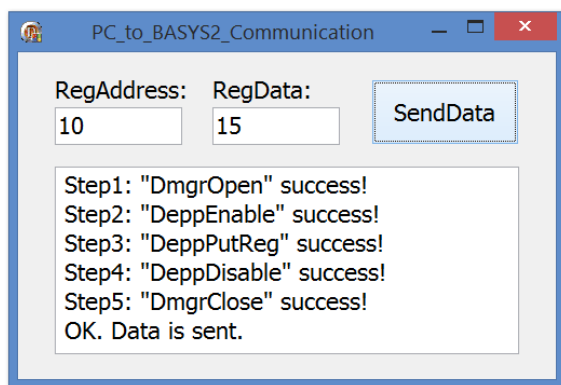
В развойната среда Webpack се стартират и изпълняват процесите на проектиране на цифровото устройство от VHDL описанието съответстващо на тази блоквата схема, в резултат на което се получава конфигурационният файл за FPGA чипа на развойната платка .

На фиг. 4а е показан работен екран на разработеното Windows приложение, което при натискане на бутона "SendData" проверява дали въведеното в полето "RegData" число е в диапазона 0-255, след което го прехвърля по DEPP интерфейса към развойната платка.

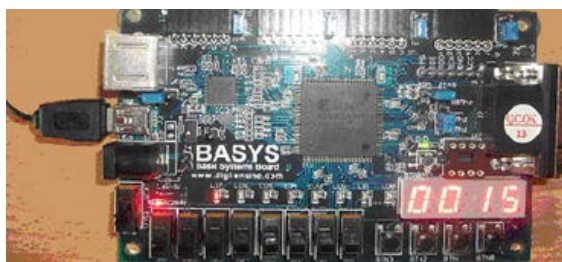




Фиг.3 Блокова схема на проектираното устройство



Фиг.4а Работен екран на Windows приложението



Фиг.4б Тестване работата на проектираното устройство

Накрая, както е показано на снимката (фиг. 4б), работата на проектираното устройство е тествана, като от приложението (компютъра) се въвежда число (например, 15), същото се прехвърля в регистра за данни на развойната платка и се визуализира посредством блока седемсегментни индикатори.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящата статия е предложен метод за обмен на данни между компютър и развойната платка Basys2, основаващ се на API функциите на Adept2. Особеност на конкретната работа е това, че реализацията на механизма е направена на програмния език Delphi. За конфигурирането на FPGA матрицата основно е използван VHDL кодът от файла dprimref.vhd, с който се реализира периферната част на DEPP интерфейса. За реализирането на управлението на седемсегментната индикация е написан допълнителен VHDL код. Представеният подход осигурява бързо и лесно изграждане на проекти изискващи комуникация между персоналния компютър и развойната платка, като при това отпада необходимостта от използване на допълнителен хардуер – използва се USB кабелът, който е включен към комплекта на развойната платка. По такъв начин разработчикът получава възможност да насочи усилията си върху реализацията на предметната задача, заобикаляйки изграждането на самата комуникация.

Предстои дейности по реализирането на управлението на структурен анализатор EPIQUANT посредством компютър и платка Basys2, като за комуникацията между тях се използва предложеният по-горе в настоящата работа метод.

#### Литература

1. **Маноилов П.** Проектиране и изследване на мулти-ядрена система върху FPGA – чип. *Computer & Communication Engineering*, vol.9, No.1/2015, p.9-14.
2. **Cholakov A., Slavov Y., Manoilov P.** Design and implementation of a pipelined image processing FPGA architecture. *Annual Journal of Electronics*, 2013.
3. **Digilent Inc.** Digilent Adept Device Access Manager (DMGR) Programmer's Reference Manual. Doc: 506-018, Adept SDK, 2010.
4. **Digilent Inc.** Digilent Adept Asynchronous Parallel Port Interface (DEPP) Programmer's Reference Manual. Doc: 506-022, Adept SDK, 2010.
5. **Digilent Inc.** Digilent Asynchronous Parallel Interface (DEPP). Doc: 564-000, Adept SDK, 2010.
6. **Digilent Inc.** Digilent Basys2 Board Reference Manual. Doc: 502-155, 2010.
7. **Manoilov P.** Design and Investigation of a Multi-Core System on Chip. *Annual Journal of Electronics*, 2014, p.112-115.
8. **Panagiev O.** Method for securing pay TV channels. *ICEST, Proc. of Papers*, vol.1, Nish, 25-27 June 2008, p.24-27.
9. [https://www.digilentinc.com/Data/Products/adept2/digilent.adept.sdk\\_v2.3.1.zip](https://www.digilentinc.com/Data/Products/adept2/digilent.adept.sdk_v2.3.1.zip). Посетен на 27.01.2016г.
10. <https://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?Prod=ADEPT2>. Посетен на 27.01.2016г.
11. <http://www.drBob42.com/delphi/headconv.htm>. Посетен на 27.01.2016г.

## A METHOD FOR DATA TRANSMISSION BETWEEN PERSONAL COMPUTER AND BASYS2 DEVELOPMENT KIT

Valentin HRISTOV, Iliya TINYOKOV

Department of Communication and Computer Engineering, South-West University "Neofit Rilski", Blagoevgrad, Bulgaria  
e-mail: [iltiniokov@abv.bg](mailto:iltiniokov@abv.bg)

**Abstract:** The Basys2 printed circuits board is convenient kit for designing and implementing on FPGA chip of various digital devices, as well as testing them. In some projects it is necessary to transmit data between personal computer and Basys2. Usually, in practice the RS-232 interface is used for this purpose. This requires the use of additional hardware (expansion card for Basys2, RS-232 cable, and USB to RS-232 adapter for the computer) and writing additional VHDL code for the implementation of the data communication protocol on the FPGA chip. In this article is presented a method for data communication between personal computer and Basys2 development kit. For this purpose DEPP communication interface is implemented on the board, as well as the appropriate API functions from DLL libraries of Adept SDK are called. The proposed method facilitates the programming and hardware realization of the data communication between personal computer and Basys2 (using only USB cable included in the Basys2 kit). So, the designer's efforts can be focused on the subject of the project task, instead of the data communication protocol. In addition, at the end of the article an example of the practical application of the method for data transmission is shown. It is used the programming language Delphi to be implemented the method for exchanging data, which greatly facilitate programmers in that language in the implementation of similar projects.

**Keywords:** FPGA, Basys2 development kit, data transmission, Delphi (Object Pascal), Adept2 API, DEPP interface



## МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ДИНАМИЧНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО С СВОБОДНО ОКАЧЕН ТОВАР ПРИ УДАР В БУФЕР

Росен МИТРЕВ<sup>1</sup> Божидар ГРИГОРОВ<sup>1</sup> Иван МИНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>катедра „Инженерна логистика, подемно-транспортна и строителна техника”, Технически университет - София, България

e-mail: [rosenm@tu-sofia.bg](mailto:rosenm@tu-sofia.bg), [b.grigorov@tu-sofia.bg](mailto:b.grigorov@tu-sofia.bg)

<sup>2</sup>катедра „Механизация на мините”, Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София, България  
e-mail: [mininivan@abv.bg](mailto:mininivan@abv.bg)

**Резюме:** В работата е предложен и изследвана математически модел на транспортно средство със свободно окачен товар при удар в буфер. За получаване на математическия модел, реалната система е представена като двумасова система с две степени на свобода, а чрез уравненията на Лагранж от втори род са изведени нелинейните диференциални уравнения, описващи поведението на механичната система. Буферът е представен като еластодемпфиращ елемент с линейна характеристика. Чрез прилагане на теорията на динамичните системи е извършено качествено изследване на характера на движението на системата след удара. Установен е характерът на удара и кинематичните и силовите параметри на системата по време и след удара.

**Ключови думи:** транспортно средство, свободно окачен товар, динамика

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Авариите на промишлени машини и съоръжения представляват внезапно възникващи опасни Происшествия от техногенен характер, което могат да доведат до големи разрушения, до сериозно нарушаване на технологичния процес, както и да застрашат или отнемат живота на хора. Авариите възникват поради комбинация на множество случайни, непредвидими фактори и събития, водещи до излизане от строя на техника и/или злополуки с хора. Причините за аварии са различни – функционални откази на оборудването, човешки грешки, действия на околната среда и др. В определени случаи, аварията на промишлените машини и съоръжения са свързани със значителни материални, социални и психологически последствия за всички страни, които засяга аварията. Приоритетна цел на изследователи и инженери е намирането на ефективни подходи и методи за анализ, оценка на безопасността, превенция и разработване на конструкции, водещи до намаляването на аварията.

Поради случайния характер на причините за възникване на аварията е практически невъзможно предварително да се предвиди моментът на тяхното появяване. Към аварията са възможни два подхода – пасивен и активен. Пасивният

подход обикновено се състои в регистриране на аварията и събиране на статистическа информация за тях за изминал период от време. Такъв подход не позволява да бъде намалено количеството на аварията, но дава допълнителна количествена информация, която може да се използва за прогнозиране, взимане на решения, свързани с превенцията на аварията и тяхното намаляване. Получената статистическа информация позволява да се извърши класификация на аварията и техните причини, която да насочи изследователите към разработване на мерки и усъвършенстване на машините в посока намаляване на аварията или снижаване на тежестта им. На база официални регистри на аварии, определени публикации извършват статистически анализ и класификация на аварията по видове машини, видове причини и последствия от аварията [4]. Значителен процент от аварията са причинени от функционални откази на механичната конструкция поради различни причини.

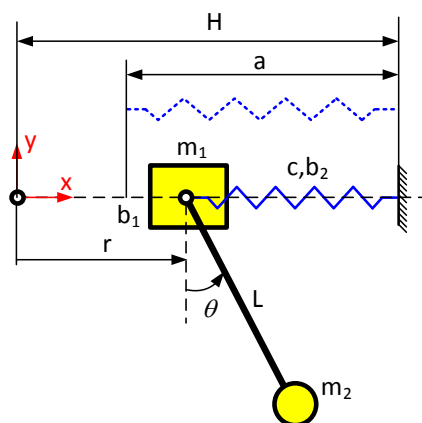
Активният подход често представлява продължение на пасивния, и се състои в предприемане на различни мерки и извършване на мероприятия, намаляващи количеството на аварията. Това са предимно организационни мерки – подобряване на организацията на работата и повишаване на техниката на безопасност, както и

технически мерки като усъвършенстване на конструкциите на машините. Конструктивните мероприятия по подобряване на безопасността на машините са особено ефективно средство за намаляване на аварията или последствията от тях.

Едно често срещано събитие, водещо в определени ситуации до аварии с или без злополуки е ударът на транспортно средство, носещо свободно окачен товар в буфер, ограничаващ движението и омокотяващ удара. Това събитие е възможно при товароподемни кранове, транспортни и технологични машини в железопътното и строителното производство, строителни манипулатори и др. Такъв тип авария не се дължи толкова на организационни причини и техника на безопасност, колкото на технически причини – то се случва най-вече при функционален отказ на спирачната уредба на машината или разрушаване на трансмисията и може да премине както без последствия за машината и персонала, така и със значителни материални щети и злополуки. Дори и да възникне такова събитие, подходящата конструкция както на транспортното средство, така и на буфера и неговата носеща конструкция може да предотврати по-сериозни материални щети или злополуки. Разработването на математически модел, чрез който да се оценяват поведението на механичната система при удар в буфер, а по-точно нейните кинематични и силови характеристики, ще позволи да се оценяват натоварванията в конструкцията на машината и носещата метална конструкция. Изследването на такъв тип система се усложнява от наличието на свободно окачен товар, който се разлюлява и внася допълнителни динамични натоварвания в механичната система. Възможността за възникване на големи отклонения на товара също така изисква създаването и решаването на нелинейна система диференциални уравнения. В [1] и [2] са приведени някои опростени математични модели на аварийни ситуации при удар в буфер. В работата [3] е използван CAD/CAE подход за създаване на динамичен модел и изследването на удар в буфер при наличието на двигателна сила.

## 2. ДИНАМИЧЕН МОДЕЛ НА УДАР НА ТРАНСПОРТНО СРЕДСТВО С ОКАЧЕН ТОВАР В БУФЕР

Нека разгледаме движението на транспортно средство с свободно окачен товар без приложена двигателна сила и свободно въртене на колелата, чието движение се ограничава от еластичен буфер. Ако се абстрахираме от ненужните за целите на изследването характеристики на системата транспортно средство-товар, то транспортното средство се представя като точкова маса с големина  $m_1$ , а товарът като точкова маса големина  $m_2$ . Товарът е окачен към безтегловно недеформируемо въже с дължина  $L$  – фиг.1. Приема се, че върху  $m_1$  действа съпротивителна сила, пропорционална на скоростта с коефициент на пропорционалност  $b_1$ . Буферът се представя като еластичен елемент с дисипативни свойства, характеризиращ се с коефициент на еластичност  $c$  и коефициент на демпфиране  $b_2$ . Динамичният модел е с две степени на свобода, като положението на масите се описва чрез две релативни координати – позицията на масата  $m_1$  се отчита спрямо неподвижна координатна система чрез обобщена линейна координата  $r$ , а ъгловото завъртане на въжето – чрез ъгъл  $\theta$ , измерван спрямо вертикалната ос през точката на окачване. За положителна посока на промяна на ъгъла е приета посоката против часовниковата стрелка. На фиг.1 чрез  $a$  е означена свободната дължина на буфера, а чрез  $H$  – разстоянието между началото на неподвижната координатна система и неподвижната точка на окачване на буфера.



фиг.1 Динамичен модел на механичната система

Абсолютните декартови координати на точковите маси спрямо неподвижната координатна

система се определят чрез обобщените координати по следния начин:

1) Координати на маса 1:  $x_1 = r, y_1 = 0$ ;

2) Координати на маса 2:

$$x_2 = r + l \sin \theta, y_2 = -l \cos \theta;$$

Чрез диференциране на получените изрази спрямо времето се получават абсолютните скорости на масите, а именно:

$$\dot{x}_1 = \dot{r}, \dot{y}_1 = 0, \dot{x}_2 = \dot{r} + l\dot{\theta} \cos \theta, \dot{y}_2 = -l\dot{\theta} \sin \theta.$$

Диференциалните уравнения на движение, описващи движението на всяка от масите по съответната обобщена координата се получават чрез уравненията на Лагранж от втори род [5], които в случая имат следният вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{r}} \right) - \frac{\partial L}{\partial r} + \frac{\partial \Phi}{\partial r} = 0 \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} + \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

където чрез  $L$  е означен лагранжианът на системата, а  $\Phi$  дисипативната енергия на системата. Тъй като се разглежда движението на системата при неработещ двигател и свободно движение на количката, то обобщените сили са равни на нула. Кинетична енергия на системата  $T$  се формира от сумата на кинетичните енергии на двете маси:

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (2)$$

След заместване на изразите за скоростта на масите и опростяване на полученият израз, кинетичната енергия придобива вида:

$$T = 0.5(m_2 l^2 \dot{\theta}^2 + 2l m_2 \cos \theta \dot{r} \dot{\theta} + (m_1 + m_2) \dot{r}^2) \quad (3)$$

Потенциалната енергия на системата се формира от сумата на потенциалната енергия на силата на тежестта на двете маси и потенциалната енергия от деформацията на пружината:

$$\Pi = m_1 g y_1 + m_2 g y_2 + c \Delta^2 \quad (4)$$

където  $\Delta$  е деформацията на пружината:

$$\Delta = r - (H - a) \quad (5)$$

Отчитайки и изразите за у-координатите на двете маси, за потенциалната енергия на системата се получава:

$$\Pi = 0.5c(r - (H - a))^2 - m_2 g L \cos \theta \quad (6)$$

Ако се приеме, че съпротивителната сила в демпфиращите елементи е пропорционална на

първата степен на скоростта на движение (деформация), то

$$\Phi = 0.5(b_1 \dot{r}^2 + b_2 \dot{r} \dot{\theta} + b_3 \dot{\theta}^2) \quad (7)$$

Лагранжианът на системата е:

$$L = T - \Pi \quad (8)$$

Замествайки в (8) получените изрази за потенциалната и кинетичната енергии и извършвайки необходимите математически операции в (1) се получават нелинейните диференциални уравнения на движение на механичната система:

$$\begin{cases} \left( \dot{r}(m_1 + m_2) + m_2 L(\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + \dots \right) = 0 \\ \left( \dots + c(r + a - H) + b_1 \dot{r} + b_2 \dot{r}^2 \right) \\ m_2 L^2 \ddot{\theta} + m_2 g L \sin \theta + m_2 L \dot{r} \cos \theta + b_3 \dot{\theta} = 0 \end{cases} \quad (8a)$$

След преработка уравненията придобиват следният вид:

$$\begin{cases} \ddot{r} = \frac{\left( L(c(r + a - H) + \dot{r}(b_1 + b_2 \dot{r})) - \dots \right)}{L(m_2 (\cos \theta)^2 - m_2 - m_1)} \\ \ddot{\theta} = \frac{\left( (m_1 + m_2)(b_3 \dot{\theta} + m_2 g L \sin \theta) - \dots \right)}{m_2 L^2 (m_2 (\cos \theta)^2 - m_2 - m_1)} \end{cases} \quad (9)$$

За да се отчете ударът в буфер, коефициентите  $c$  и  $b_2$  приемат следният вид:

$$\begin{cases} c = \begin{cases} 512000, & \text{ако } r \geq H - a \\ 0, & \text{в противен случай} \end{cases} \\ b_2 = \begin{cases} 4963 & \text{ако } r \geq H - a \\ 0, & \text{в противен случай} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

### 3. ИЗСЛЕДВАНЕ НА КАЧЕСТВЕНОТО ПОВЕДЕНИЕ НА ДИНАМИЧНАТА СИСТЕМА

Чрез качествено изследване на движението на системата чрез теорията на динамичните системи [6] може да бъде установено поведението на системата след удара, т.е. след прекратяване на контакта на количката с буфера. В този случай е налице свободно движение на системата и следва

да се приеме, че коефициентът на еластичност  $c$  и коефициентът на демпфиране  $b_2$  са равни на нула. В този случай уравненията (9) придобиват вида:

$$\begin{cases} \ddot{r} = \frac{L\dot{r}b_1 - m_2L(L\dot{\theta}^2 + g \cos \theta) \sin \theta - b_3\dot{\theta} \cos \theta}{L(m_2(\cos \theta)^2 - m_2 - m_1)} \\ \ddot{\theta} = \frac{\left( (m_1 + m_2)(b_3\dot{\theta} + m_2gL \sin \theta) - \dots \right)}{m_2L^2(m_2(\cos \theta)^2 - m_2 - m_1)} \end{cases} \quad (11)$$

Ако се извърши полагането

$$r = z_1, \dot{r} = z_2, \theta = z_3, \dot{\theta} = z_4,$$

то системата (11) се свежда до система от четири диференциални уравнения от първи ред:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \equiv f^1 \\ \dot{z}_2 = \frac{\left( Lz_2b_1 - m_2L(Lz_4^2 + g \cos z_3) \sin z_3 - \dots \right)}{L(m_2(\cos z_3)^2 - m_2 - m_1)} \equiv f^2 \\ \dot{z}_3 = z_4 \equiv f^3 \\ \dot{z}_4 = \frac{\left( (m_1 + m_2)(b_3z_4 + m_2gL \sin z_3) - \dots \right)}{m_2L^2(m_2(\cos z_3)^2 - m_2 - m_1)} \equiv f^4 \end{cases} \quad (12)$$

Тази система диференциални уравнения е нелинейна и за да се определи вида на равновесната точка и нейната устойчивост се прибегва към линеаризация на системата в околността на равновесната точка. За целта се пресмята якобианата на системата, състояща се от първите частни производни на функциите:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} f_{z_1}^1 & f_{z_2}^1 & f_{z_3}^1 & f_{z_4}^1 \\ f_{z_1}^2 & f_{z_2}^2 & f_{z_3}^2 & f_{z_4}^2 \\ f_{z_1}^3 & f_{z_2}^3 & f_{z_3}^3 & f_{z_4}^3 \\ f_{z_1}^4 & f_{z_2}^4 & f_{z_3}^4 & f_{z_4}^4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

след което се пресмята стойността на якобианата в равновесните точки.

Координатите на равновесните точки  $(z_1^0, z_2^0, z_3^0, z_4^0)$  на системата се определят като

десните части  $f^i$  на системата ДУ (12) се приравняват на нула и системата уравнения (14) се решава, като трябва да се има предвид, че в общия случай нелинейните системи уравнения имат повече от едно решение и съответно равновесните точки са повече от една:

$$\begin{cases} f^1 = 0 \\ f^2 = 0 \\ f^3 = 0 \\ f^4 = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Както се вижда от (14), системата нелинейни уравнения не зависи от  $z_1$ , т.е. всяка стойност  $z_1$  я удовлетворява, респективно при всяка стойност на координатата  $r$  системата се намира в равновесно положение. Тъй като функциите  $\sin$  и  $\cos$  са периодични функции, то решенията на (14) са  $(z_1^0, z_2^0, z_3^0, z_4^0) = (c, 0, k\pi, 0)$ ,  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , а  $c$  е произволна константа. Очевидно системата има безброй много решения, но нека да изследваме поведението на системата в две от равновесните положения на товара - горно неустойчиво при  $\theta = \pi$ , отговарящо на  $k=0$  и долно устойчиво при  $\theta = 0$ , отговарящо на  $k=1$ .

1) При  $k=0$

В тази равновесна точка якобианата има следния вид:

$$\mathbf{J}(c, 0, 0, 0) = \dots = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_1}{m_1} & g \frac{m_2}{m_1} & \frac{b_3}{Lm_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{b_1}{Lm_1} & -\frac{g(m_1 + m_2)}{Lm_1} & -\frac{b_3(m_1 + m_2)}{L^2m_1m_2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

За да се определи вида на равновесната точка и устойчивостта на системата в тази равновесна точка, се определят характеристичното уравнение и собствените стойности на якобианата (13) при следните числени стойности на параметрите:  $b_1=1000$ ,  $b_3=50$ ,  $L=7$ ,  $m_1=1000$ ,  $m_2=1000$ ,  $g=9.81$ . Характеристичното уравнение се определя от :

$$\det(\mathbf{J} - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (16)$$

и има следният конкретен вид:

$$\lambda^4 + \lambda^3 + 2.80\lambda^2 + 1.40\lambda = 0 \quad (17)$$

Собствените стойности на матрицата представляват корените на характеристичното уравнение:

$$\lambda_1 = -0.227 + 1.58i,$$

$$\lambda_2 = -0.227 - 1.58i,$$

$$\lambda_3 = -0.548,$$

$$\lambda_4 = 0$$

Както се вижда, уравнението има четири корена, три от които са комплексни числа с отрицателна реална част и един нулев корен, поради което системата има множество равновесни точки, разположени на една линия и тя е линия на устойчиво равновесие. Това се потвърждава от факта, че при всяка стойност на  $r$  системата е в устойчиво равновесие.

2) При  $k=1$

В тази равновесна точка якобианата има следния вид:

$$\mathbf{J}(c, 0, \pi, 0) = \dots$$

$$\dots = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{b_1}{m_1} & g \frac{m_2}{m_1} & -\frac{b_3}{Lm_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{b_1}{Lm_1} & \frac{g(m_1+m_2)}{Lm_1} & -\frac{b_3(m_1+m_2)}{L^2m_1m_2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Характеристичното уравнение е:

$$\lambda^4 + \lambda^3 - 2.80\lambda^2 - 1.40\lambda = 0 \quad (19)$$

а собствените стойности са

$$\lambda_1 = -2.04,$$

$$\lambda_2 = 1.49,$$

$$\lambda_3 = -0.46,$$

$$\lambda_4 = 0$$

В този случай едната от собствените стойности е положителна а другата нула, следователно линията на равновесие е линия на неустойчиво равновесие.

Ако разгледаме поведението на системата при липсата на съпротивителни сили ( $b_1=b_3=0$ ) при  $k=0$ , то якобианата има следния вид:

$$\mathbf{J}(c, 0, 0, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g \frac{m_2}{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{g(m_1+m_2)}{Lm_1} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

характеристичното уравнение е:

$$\lambda^4 + 2.80\lambda^2 = 0,$$

а собствените стойности са:

$$\lambda_1 = 1.67i,$$

$$\lambda_2 = -1.67i,$$

$$\lambda_3 = 0,$$

$$\lambda_4 = 0$$

В този случай корените са две комплексно спрегнати числа и две нулеви стойности, следователно равновесната точка е тип център, системата е устойчива, но не асимптотично устойчива.

#### 4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЧЕСТОТАТА НА СОБСТВЕНИТЕ ТРЕПТЕНИЯ НА СИСТЕМАТА

За да се определи честотата на собствените трептения на системата след удара се извършва линеаризация на системата ДУ (11), като се предполага, че трептенията са малки и тогава  $\sin(\theta) \approx \theta$ ,  $\cos(\theta) \approx 1$ . Също така се пренебрегват малките членове от по-висок ред. Тогава системата ДУ, при пренебрегване на съпротивленията, придобива следният вид:

$$\begin{cases} \dot{r} = A\theta \\ \ddot{\theta} = B\theta \end{cases} \quad (21)$$

където  $A = \frac{m_2 g}{m_1}$ ,  $B = -\frac{(m_1 + m_2) g}{m_1 L}$ .

Системата (21) може да се представи в следния вид:

$$\ddot{X} = KX \quad (22)$$

където:

$$\ddot{X} = \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} 0 & A \\ 0 & B \end{bmatrix}.$$

Собствените честоти на системата се определят от

$$\det(K + \omega^2 I) = 0 \quad (23)$$

т.е.

$$\begin{vmatrix} 0 + \omega^2 & A \\ 0 & B + \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (24)$$

Това води до биквадратно уравнение

$$\omega^4 + B\omega^2 = 0 \quad (25)$$

с корени

$$\omega_1 = 0, \quad \omega_2 = -B = \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{m_1}\right) \frac{g}{L}}.$$

Както се вижда, системата има две собствени честоти. При нулевата собствена честота товарът виси вертикално надолу и двете маси се движат хоризонтално с еднаква скорост. При втората собствена честота, двете маси трептят с честота  $\omega_2$  и се движат в противоположни посоки.

### 5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА ПАРАМЕТРИТЕ НА СИСТЕМАТА ПРИ УДАР В БУФЕР

Изследването на удара на количката в буфера се извършва чрез численото решаване на системата ДУ (9) и логическите условия (10). Използваните числени данни са следните:  $a=1m$ ,  $b_1=12000 \text{ Ns/m}$ ,  $b_2=4963 \text{ Ns/m}$ ,  $H=5m$ ,  $L=8m$ ,  $m_1=2200kg$ ,  $m_2=5000kg$ ,  $c=512kN/m$ . Началната скорост на количката е  $1 \text{ m/s}$ , а в началния момент товарът виси вертикално. На фиг.2 е показан графичният модел на системата ДУ, създаден във Vensim, а за численото решение е използван методът на Рунге-Кута от четвърти ред с адаптивна стъпка.

На фиг.3 са представени резултатите от числените експерименти, като са показани основните кинематични параметри на количката и товара – а) и б) - сила в буфера  $F_b \text{ N}$ ; в) - скорост на количката  $\dot{r} \text{ m/s}$ ; г) – ускорение на количката  $\ddot{r} \text{ m/s}^2$ ; д) – преместване на количката  $r \text{ m}$ ; е) - ъгъл на отклонение на товара  $\theta \text{ rad}$ . Както се вижда от фиг.3 е), при удара на количката в буфера, товарът се отклонява в посоката на движение (надясно на фиг.1, положителен ъгъл). След този първоначален удар количката отскача назад (наляво на фиг.1), но следват още редица удари в буфера, което се вижда от фиг.3 а). Причината за това е разлюляването на товара – проекцията на инер-

ционната сила на люлеещият се напред товар (фиг.3 е) – положителна стойност на ъгъла на отклонение на товара до четвъртата секунда) по координатата  $r$  е по-голяма от съпротивителната сила срещу движението на количката. Количката се движи назад в резултат на отблъскването от буфера – фиг.3 в) и д). По-нататък движението продължава отново напред, с удар в буфера, в резултат на въздействието на инерционната сила на товара. Тази инерционна сила предизвиква и по-нататъшни многократни удари на количката в буфера. Както се вижда от фиг.3 б), продължителността на удара е много кратка – около  $0.2s$ ., като силата в буфера достига значителни стойности – около  $65kN$ . С увеличаването на времето, поради разсейването на енергията и намаляването на ъгъла на отклонение на товара (и респективно намаляване на инерционната сила на товара), всеки от следващите удари в буфера е с по-малка енергия - фиг.3 а). Графиката на фиг.3 е) показва, че след четвъртата секунда ъгълът на отклонение на товара е отрицателен (т.е. товарът е отклонен наляво на фигурата), поради което проекцията на инерционната сила на товара сменя посоката си и отдалечава количката от буфера – фиг.3 д). След известно разстояние тя спира. От фиг. 3 г) се вижда, че в момента на удара, ускорението достига големи стойности, които следва да се отчетат при якостното оразмеряване на елементите на количката.

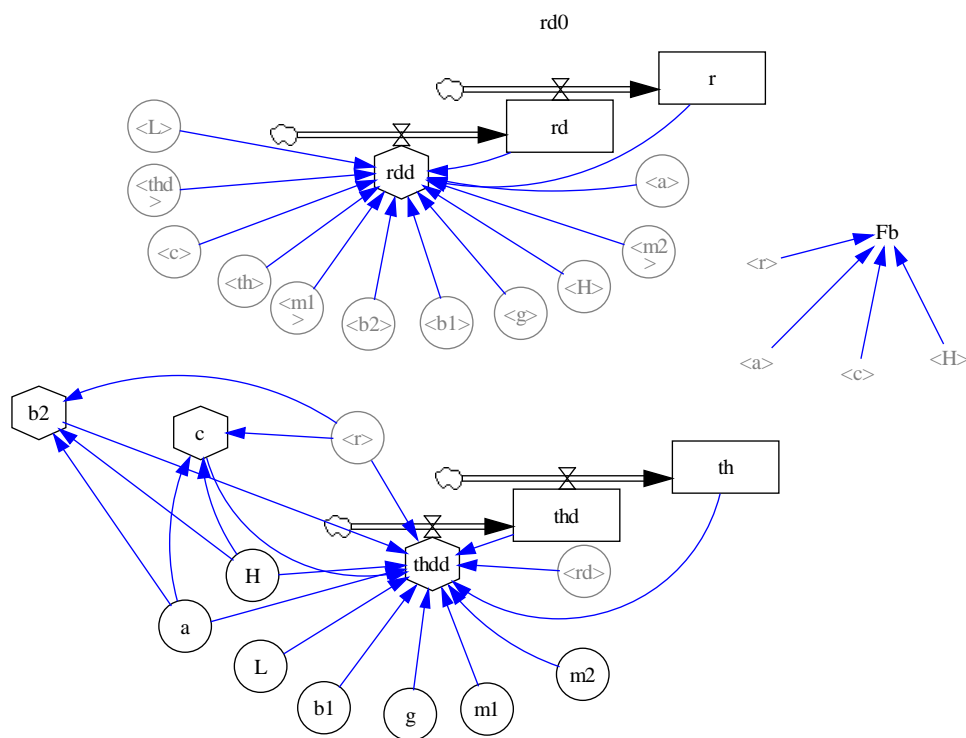
Провеждането на редица числени експерименти с други числени стойности на параметрите (маси и дължини на въжето) показва, че характерът на кинематичните параметри не се изменя (скорости, ускорени и др.), а само техните количествени стойности.

Характерът на фазовите траектории на системата и по двете координати – фиг.4, показва, че трептенията и по двете координати на системата са затихващи и след определен период от време се достига равновесната точка, което се потвърждава и от резултатите от извършения теоретичен анализ в т.3.

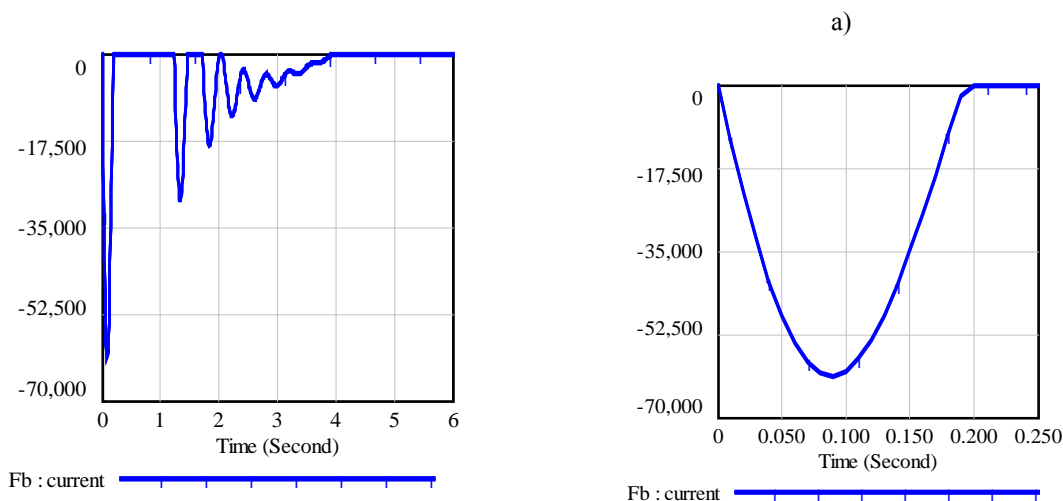
Една основна разлика между получените резултати за удар на количка без приложена към нея двигателна сила и получените в [3] резултати за движение на количка с приложена към нея двигателна сила е това, че във втория случай е налице единствено единичен удар в буфера и липса на

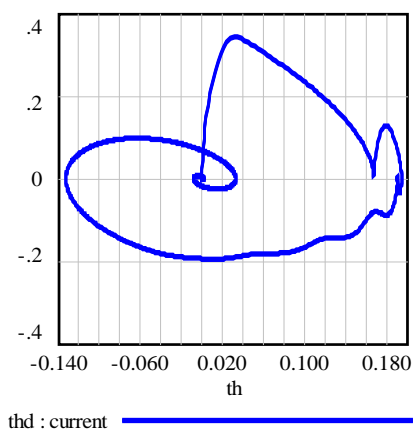
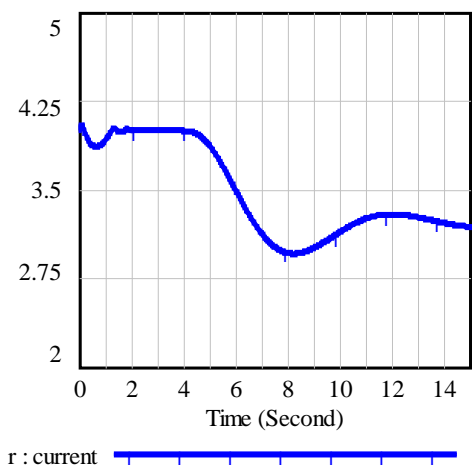
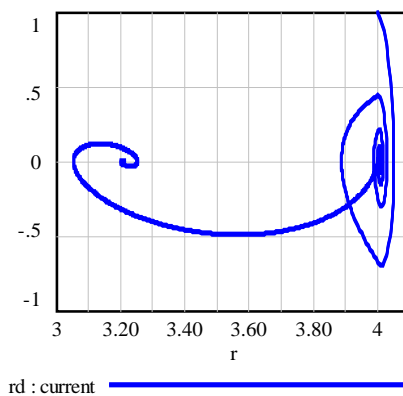
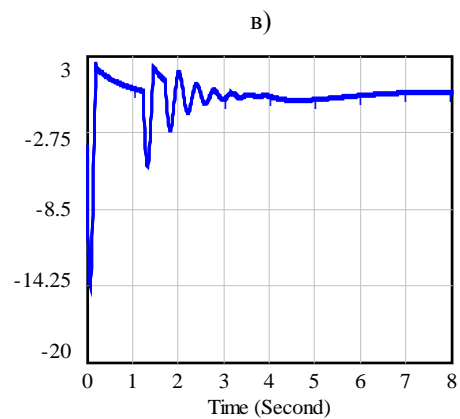
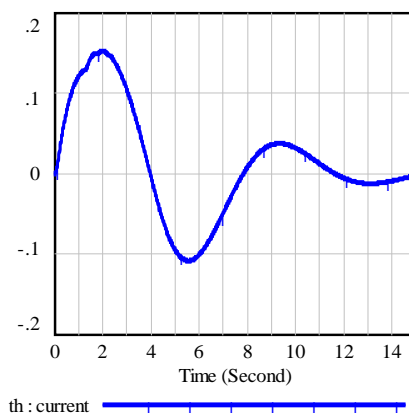
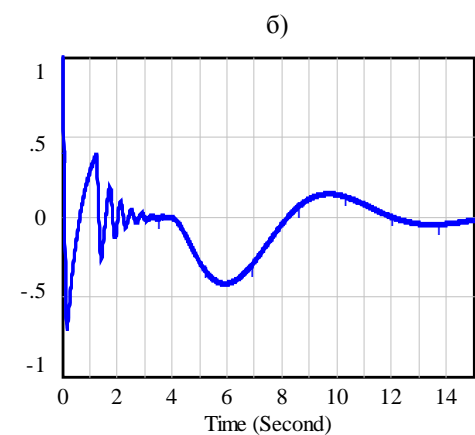
движение на количката назад след удара, което се дължи на наличието на двигателна сила и големи съпротивления в механизма за пътуване (триене при плъзгане) при движение на количката назад след удара. Вижда се (фиг.3 б)), че големината на

възникващата сила в буфера е почти същата, както и при наличието на двигателна сила (фиг.5. в [3]), което сочи, че при оразмеряване на буферите или металната конструкция да не се отчита двигателната сила.



Фиг.2. Графичен модел





фиг.3 Кинематични и силови параметри на системата

фиг.4 Фазови траектории



## 6. ИЗВОДИ

Като резултат от извършените изследвания, в настоящата работа е предложен динамичен модел на удар в буфер на транспортно средство с свободно окачен товар, описван чрез нелинейна система диференциални уравнения. Моделът позволява при необходимост да се отчетат нелинейните характеристики на системата – големи ъгли на отклонение на товара, нелинейна възстановяваща сила на буфера и др. С цел детайлно изясняване на поведението на механичната система при удар в буфер се препоръчва да се извършва симулация с предложеният нелинеен математичен модел с две степени на свобода. Възможната модификация на модела позволява той да бъде използван и за изследване на други подобни системи.

## Литература

1. **Казак С.** Динамика мостовых кранов. М., : Машиностроение, 1968 г.
2. **Дивизиев В.** Основи на товароподемните машини. Техника, 1986.
3. **Григоров Б., Митрев Р.** CAD/CAE изследване на движението на транспортна количка с висящ товар при някои екстремални експлоатационни условия. САХ технологии, бр. 3, декември 2015г.
4. **Митрев Р.** Методика за вероятностен анализ на аварияте, възникващи при експлоатацията на индустриално оборудване. Международна научна конференция „70 години МТФ“, 11-13 септември, 2015, Созопол
5. **Писарев А., Парасков Ц., Бъчваров С.** Курс по теоретична механика, ч. II Динамика. Техника, София, 1988г.
6. **Boyce W., Diprima R.** Elementary differential equations and boundary value problems. John Wiley and Sons, 2005.



## WEB БАЗИРАН КАЛКУЛАТОР НА КИНЕМАТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА УЧАСТВАЩИ В ПТП ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

Росен МИТРЕВ<sup>1</sup> Борис ТУДЖАРОВ<sup>2</sup> Десислава КОЛЕВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>кафедра „Инженерна логистика, подземно-транспортна и строителна техника”, Технически университет - София, България

e-mail: [rosenm@tu-sofia.bg](mailto:rosenm@tu-sofia.bg)

<sup>2</sup>кафедра „Основи и технически средства за конструиране”, Технически университет - София, България

e-mail: [bntv@tu-sofia.bg](mailto:bntv@tu-sofia.bg), [koleva\\_ds@tu-sofia.bg](mailto:koleva_ds@tu-sofia.bg)

**Резюме:** Работата е посветена на автоматизацията на изчисленията, свързани с определянето на кинематичните характеристики на транспортни средства, участващи в ПТП. ПТП са събития, които нанасят големи икономически, социални, здравни и психологически щети на участниците, а в не малка част от случаите има и смъртни случаи. Наличието на средства, автоматизиращи изчисленията значително повишава скоростта на разследване на ПТП и достоверността на направените заключения. Разработен е математически модел на удар на транспортни средства, чрез който са получени зависимости за определяне на кинематичните характеристики на транспортните средства след удара при известни характеристики преди удара; определяне на кинематичните характеристики на транспортните средства преди удара при известни характеристики след удара. Разработен е WEB базиран калкулатор, автоматизиращ реализиращ зависимостите в разработения математичен модел и автоматизиращ определянето на кинематичните характеристики на транспортните средства.

**Ключови думи:** пътно-транспортно произшествие, математичен модел, удар, WEB технологии

### 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Пътно-транспортните произшествия (ПТП) са непредвидими събития, възникващи между участващите в пътният трафик транспортни средства. Обикновено ПТП са съпроводени от големи икономически, социални, здравни и психологически щети, както за непосредствените участници, така и за свързаните с тях лица и организации – близки, застрахователи, пътни служби и др. В много случаи, ПТП водят до смърт на участниците, което пренася проблема за ПТП повече в юридическата област, отколкото в техническата. Съгласно данните на Световната здравна организация [1], в резултат на ПТП през 2013 г. в света са загинали 1.24 милиона човека, което е около 0.02% от световното население. В България, за периода 2001г.-2011г. средно са загивали 934 и ранявани 9003 човека [2]. Поради тази причина, постоянно се търсят нови решения и мерки за повишаване на безопасността на движението по пътищата. Тези мерки имат както организационен и юридически характер, така и чисто технически. Една основна и силно ефективна дейност е подобряване на разследването посредством различни съвременни и модерни

методи за възстановяване на събитията, довели до ПТП. Точното възстановяване на събитията при ПТП осигурява успешното разследване и неговото бързо разкриване.

Ключова роля при разследването и възстановяването на ПТП има персоналят, зает с разследването – разследващи полицаи, експерти към СДВР, оперативни дежурни и др. Анализът, който те извършват и последващите заключения служат както за установяване на причините за ПТП, така и за подобряване на безопасността на движение и усъвършенстване на организацията на движението и подобряване на безопасността на автомобилите. Процесът на възстановяване на ПТП съдържа множество стъпки, основните от които са: събиране на данни от местопроизшествието, разпити на очевидци, издигане на хипотези, разработване на математически и компютърни модели, извършване на симулации, потвърждаване или отхвърляне на хипотезите, изготвяне на заключения. Поради многото неизвестни обстоятелства, разследването често има итеративен характер и се използва методът на пробите и грешките.

В практиката на разследването и реконструкцията на ПТП широко се използват утвърдени

програмни продукти (PC-CRASH [3], EXPERT CAR [4]), които в значителна степен автоматизират процеса и позволяват експертът да бъде освободен от сложни изчисления, повишават точността на получените резултати, позволяват симулацията на множество разнородни задачи за кратко време, а също така дават възможност за двумерна или тримерна анимация на произшествието. Автоматизацията на дейността на експертите, особено на мястото на произшествието, все още не е в достатъчна степен, поради което търпи интензивно развитие.

Отчитайки необходимостта от програмно осигуряване на дейността на експертите, разглеждащи ПТП, се дефинира и целта на настоящата работа: Да се създаде WEB базиран калкулатор, автоматизиращ определянето на кинематичните характеристики на транспортните средства, участващи в ПТП. За целта е необходимо да се разработи математичен модел на удара между транспортни средства, базиран на теоремата за изменение на количеството на движение и теоремата за изменение на кинетичния момент, комбинирани с допълнителни предположения.

## 2. МАТЕМАТИЧЕН МОДЕЛ НА УДАР МЕЖДУ ТРАНСПОРТНИ СРЕДСТВА

Ударът може да се дефинира като краткотрайно взаимодействие между транспортни средства, при което възникват големи сили на взаимодействие, промени в скоростта, позицията и ориентацията на транспортните средства, съпроводени с дисипация на енергията под различни форми. Като резултат от генерираните ударни сили и поглъщането на енергията, в металните конструкции на транспортните средства възникват еласто-пластични деформации. Чрез измерването на деформациите е възможно да се оцени разсеяната енергия по време на удара [5]. Допълвайки този резултат с основни зависимости от теоретичната механика е възможно да се определят кинематичните параметри на транспортните средства преди и след удара. Използването на този метод по определени причини е сравнително ограничено [6].

По-широко използван и практичен е методът, при който се използват интегралните форми на теоремите за изменение на количеството на дви-

жение и кинетичния момент, приложени за всяко от транспортните средства [7]. Чрез този метод не е възможно да се извърши детайлно изследване на процеса на удара, но е възможно да се определи промяната на линейните и ъгловите скорости на транспортните средства в резултат на удара.

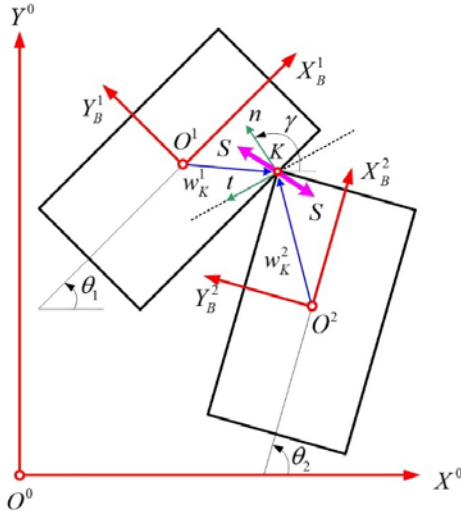
На фиг.1 е показана схема на разположението на транспортните средства в момента на удара, както и свързаните с тях геометрични параметри. Те са представени като равнинни фигури, извършващи движение в равнината – всеки автомобил може да извършва две трансляции и една ротация. Към центъра на тежестта на всеки от автомобилите е свързана локална координатна система ( $X_B^1 Y_B^1$  и  $X_B^2 Y_B^2$ ), чиято ос  $X$  е разположена по дължина на автомобила. Абсолютната ориентация на автомобилите се дефинира чрез ъглите между осите  $X$  на локалните координатни системи на автомобилите и оста  $X$  на глобалната координатна система  $X^0 Y^0$  – това са ъглите  $\theta_1$  и  $\theta_2$ . Контактната точка между автомобилите е означена с  $K$ . Счита се, че контактната точка е известна и нейното положение се дефинира в локалната координатна система на всеки от автомобилите съответно чрез локалните вектори  $w_K^1 = [xK_1 \ yK_1]^T$  и  $w_K^2 = [xK_2 \ yK_2]^T$ , където чрез горен индекс  $T$  е означена математическата операция транспониране. С точка  $K$  е свързана координатна система, чиято ос  $t$  е насочена по линията  $m-m$ , по която е извършена деформацията при удара, а оста  $n$  е перпендикулярна на оста  $t$ . Ъгълът на оста  $t$  спрямо оста  $X$  на глобалната координатна система е означен с  $\gamma$ . Векторът на импулса на ударната сила е означен с  $S$  и действа в точка  $K$ .

Ако масовите и инерционните характеристики на автомобилите са известни, то за да бъдат обвързани параметрите и характеристиките на системата чрез количествени съотношения се използват някои основни теореми от теоретичната механика.

1) Интегрална форма на теоремата за изменение на количеството на движението. Във векторна форма, тази теорема се записва по следния начин:

$$Q - Q_0 = S \quad (1)$$

където  $\mathbf{Q}$  е вектора на количеството на движение на системата в края на удара;



фиг.1 Схема на разположение на транспортните средства при удара

$\mathbf{Q}_0$  е вектора на количеството на движение на системата в началото на удара;  $\mathbf{S}$  е вектора на главния импулс на всички външни сили. Ако за разглежданата система от две транспортни средства (фиг.1) уравнение (1) се запише и проектира върху осите на неподвижната декартова координатна система  $X^0 Y^0$ , и също така се пренебрегнат импулсите на всички външни сили освен ударната, то могат да бъдат записани следните уравнения:

За транспортно средство 1:

$$m_1 \left( {}^+V_1^x - {}^-V_1^x \right) = -S^x \quad (2)$$

$$m_1 \left( {}^+V_1^y - {}^-V_1^y \right) = S^y \quad (3)$$

За транспортно средство 2:

$$m_2 \left( {}^+V_2^x - {}^-V_2^x \right) = S^x \quad (4)$$

$$m_2 \left( {}^+V_2^y - {}^-V_2^y \right) = -S^y \quad (5)$$

където  ${}^+V_1^x, {}^+V_1^y$  са проекциите на скоростта на центъра на тежестта на автомобил 1 върху осите  $X^0$  и  $Y^0$  на неподвижната координатна система в края на удара;  ${}^-V_1^x, {}^-V_1^y$  са проекциите на скоростта на центъра на тежестта на автомобил 1 върху осите  $X^0$  и  $Y^0$  на неподвижната координатна система в началото на удара. Аналогични са оз-

наченията за автомобил 2.  $S^x$  и  $S^y$  са проекциите на импулса на ударната сила върху осите  $X^0$  и  $Y^0$  на неподвижната координатна система.

2) Интегрална форма на теоремата за изменение на кинетичния момент. Във векторна форма, тази теорема се записва по следния начин:

$$\mathbf{K} - \mathbf{K}_0 = \mathbf{M}(\mathbf{S}) \quad (6)$$

където  $\mathbf{K}$  е вектора на кинетичния момент на системата спрямо неподвижния център в края на удара;  $\mathbf{K}_0$  е вектора на кинетичния момент на системата спрямо неподвижния център в началото на удара;  $\mathbf{M}(\mathbf{S})$  е момента на главния импулс на всички външни сили спрямо неподвижния център.

Изразът (6), записан за автомобил 1 има следния вид:

$$J_1 \left( {}^+\omega_1 - {}^-\omega_1 \right) = \mathbf{w}_K^1 \times \mathbf{S}_1 \quad (7)$$

където  $J_1$  е масовия инерционен момент на автомобила спрямо центъра на тежестта;  ${}^+\omega_1$  и  ${}^-\omega_1$  са ъгловите скорости на автомобила съответно в края и в началото на удара.

Векторното произведение в дясната част на (7) може да бъде представено като:

$$\mathbf{w}_K^1 \times \mathbf{S} = \left( \mathbf{w}_K^1 \right)^T \mathbf{B}_1^T \mathbf{S}_1 \quad (8)$$

където  $\mathbf{B}_1$  е производната на матрицата на ротация на локалната координатна система, свързана с автомобил 1, спрямо неподвижната координатна система:

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_1 & -\cos \theta_1 \\ \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

а  $\mathbf{S}_1$  е векторът на ударния импулс, приложен върху автомобил 1 -  $\mathbf{S}_1 = \left[ -S^x \quad S^y \right]^T$ .

Извършвайки необходимите действия в (8), изразът (7) придобива следния вид:

$$J_1 \left( {}^+\omega_1 - {}^-\omega_1 \right) = -S^x a_1 + S^y b_1 \quad (10)$$

където:

$$a_1 = -yK_1 \cos \theta_1 - xK_1 \sin \theta_1$$

$$b_1 = xK_1 \cos \theta_1 - yK_1 \sin \theta_1.$$

Аналогично, изразът (6), записан за автомобил 2 приема следния вид:

$$J_2 \left( {}^+\omega_2 - {}^-\omega_2 \right) = \mathbf{w}_K^2 \times \mathbf{S}_2 \quad (11)$$

където  $J_2$  е масовия инерционен момент на автомобил 2 спрямо центъра на тежестта;  ${}^+\omega_2$  и

${}^{-}\omega_2$  са ъгловите скорости на автомобила съответно в края и в началото на удара.

Векторното произведение в дясната част на (11) може да бъде представено като:

$$\mathbf{w}_k^2 \times \mathbf{S}_2 = (\mathbf{w}_k^2)^T \mathbf{B}_2^T \mathbf{S}_2 \quad (12)$$

където  $\mathbf{B}_2$  е производната на матрицата на ротация на локалната координатна система, свързана с автомобил 2 спрямо неподвижната координатна система:

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

а  $\mathbf{S}_2$  е векторът на ударния импулс, приложен върху автомобил 2  $\mathbf{S}_2 = [S^x \quad -S^y]^T$ .

Извършвайки необходимите действия в (12), изразът (11) придобива следния вид:

$$J_2 ({}^{+}\omega_2 - {}^{-}\omega_2) = S^x a_2 - S^y b_2 \quad (14)$$

където:

$$\begin{aligned} a_2 &= -yK_2 \cos \theta_2 - xK_2 \sin \theta_2, \\ b_2 &= xK_2 \cos \theta_2 - yK_2 \sin \theta_2. \end{aligned}$$

Векторите  $\mathbf{S}_1$  и  $\mathbf{S}_2$  имат еднаква големина  $S = \sqrt{(S^x)^2 + (S^y)^2}$ , но са дефазирани на  $180^\circ$ , поради което компонентите им в неподвижната координатна система са различни.

Уравненията (2-5), (10) и (14) могат да бъдат представени в следния матричен вид:

$$\mathbf{M} \Delta \mathbf{V} = \mathbf{S} \mathbf{d} \quad (15)$$

където  $\mathbf{M}$  е масова матрица на системата:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\Delta \mathbf{V}$  е вектор, съдържащ разликите между линейните и ъгловите скорости след и преди удара:

$$\Delta \mathbf{V} = \begin{bmatrix} {}^{+}V_1^x & -{}^{-}V_1^x \\ {}^{+}V_1^y & -{}^{-}V_1^y \\ {}^{+}\omega_1 & -{}^{-}\omega_1 \\ {}^{+}V_2^x & -{}^{-}V_2^x \\ {}^{+}V_2^y & -{}^{-}V_2^y \\ {}^{+}\omega_2 & -{}^{-}\omega_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$\mathbf{S}$  е матрица, съдържаща проекциите на импулса на ударната сила върху осите на неподвижната координатна система:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & S^x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S^y & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S^x & S^y & 0 & 0 \\ S^x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S^y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S^x & S^y \end{bmatrix} \quad (18)$$

$\mathbf{d}$  е вектор, съдържащ геометрични параметри:

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ -b_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Системата (15) представлява система линейни уравнения, която при известни стойности на матриците  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{d}$  може да бъде решена спрямо вектора  $\Delta \mathbf{V}$ . Обикновено, импулсът на ударната сила  $\mathbf{S}$  не е известен, поради което линейната система (15) е с 8 неизвестни – 6 компонента на вектора  $\Delta \mathbf{V}$  и две компоненти на импулса на ударната сила –  $S^x$  и  $S^y$ . За да може да бъде решена системата еднозначно са необходими още две уравнения.

Едно допълнително уравнение се получава от дефиницията на коефициента на възстановяване при удар  $e$ , който представлява отношението на проекциите върху нормалата  $n$  на разликите на скоростите на т.  $K$  след и преди удара (хипотеза на Нютон):

$$e = -\frac{{}^{+}V_{K2}^n - {}^{+}V_{K1}^n}{{}^{-}V_{K2}^n - {}^{-}V_{K1}^n} \quad (20)$$

За да се използва уравнение (20) трябва да се определят скоростите  ${}^{+}V_{K2}^n$ ,  ${}^{+}V_{K1}^n$ ,  ${}^{-}V_{K2}^n$  и  ${}^{-}V_{K1}^n$ .

Хоризонталната и вертикалната проекции на скоростта на т.  $K$  преди удара, разгледана като точка от автомобил 1, се определят при известна линейна скорост на центъра на тежестта на автомобила, ъглова скорост и координати на точката  $K$  в локалната координатна система:

$${}^{-}\mathbf{V}_{K1}^{XY} = {}^{-}\mathbf{V}_{O1}^0 + {}^{-}\omega_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{w}_{K1}^1 \quad (21)$$

където:  ${}^{-}\mathbf{V}_{O1}^0 = [{}^{-}V_{O1}^X \quad {}^{-}V_{O1}^Y]^T$  е вектор, съдържащ проекциите на скоростта на центъра на тежестта на автомобил 1 върху осите на неподвижната координатна система.

За да се намерят проекциите на вектора на скоростта (21) върху осите на координатната система  $n-t$  се използва следният израз:

$${}^{-}\mathbf{V}_{K1}^{nt} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{R} \end{pmatrix}^T \cdot ({}^{-}\mathbf{V}_{O1}^0 + {}^{-}\omega_1 \mathbf{B}_1 \mathbf{w}_{K1}^1) \quad (22)$$

където

$${}^0\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

е ротационната матрица между координатните системи  $n-t$  и  $X^0Y^0$ , а  ${}^{-}\mathbf{V}_{K1}^{nt} = [{}^{-}V_{K1}^n \quad {}^{-}V_{K1}^t]^T$  е вектора на нормалната и тангенциалната скорости на точка  $K$ .

В уравнение (20) се използва само първият елемент на вектора  ${}^{-}\mathbf{V}_{K1}^{nt}$ . Чрез подобни зависимости се получават и останалите нормални скорости  ${}^{+}V_{K1}^n, {}^{+}V_{K2}^n, {}^{-}V_{K2}^n$ .

Още едно уравнение може да бъде получено от отчитане на триенето между автомобилите в контактната точка. За целта се използва еквивалентния коефициент на триене  $\mu$ , който се дефинира като отношение на проекциите на импулсите върху координатната система  $n-t$  (хипотеза на Раус):

$$\mu = S^t / S^n \quad (23)$$

където  $S^t$  и  $S^n$  са проекциите на импулса върху тангентата  $t$  и нормалата  $n$ . Връзката между проекциите на импулсите в неподвижната и в координатната система  $n-t$  се дава чрез следната зависимост:

$$\mathbf{S}^{nt} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{R} \end{pmatrix}^T \mathbf{S}^{XY} \quad (24)$$

където  $\mathbf{S}^{nt} = [S^n \quad S^t]^T$  и  $\mathbf{S}^{XY} = [S^X \quad S^Y]^T$ .

Системата уравнения (15), комбинирана с уравненията (20) и (23) вече може да бъде решена

спрямо 8<sup>те</sup> неизвестни. При решаването са възможни два варианта:

1) При известни скорости на автомобилите преди удара се търсят скоростите на автомобилите след удара. В този случай, системата линейни уравнения се представя в следния матричен вид:

$${}^{+}\mathbf{A} {}^{+}\mathbf{X} = {}^{+}\mathbf{B} \quad (25)$$

където:

$${}^{+}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -m_2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -m_2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_1 & 0 & a_1 & -b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_2 & -a_2 & b_2 \\ -c_\gamma & -s_\gamma & c_\gamma & s_\gamma & -a_1 c_\gamma - b_1 s_\gamma & a_2 c_\gamma + b_2 s_\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu c_\gamma + s_\gamma & c_\gamma - \mu s_\gamma \end{bmatrix}$$

$${}^{+}\mathbf{X} = \begin{bmatrix} {}^{+}V_1^X \\ {}^{+}V_1^Y \\ {}^{+}V_2^X \\ {}^{+}V_2^Y \\ {}^{+}\omega_1 \\ {}^{+}\omega_2 \\ S^X \\ S^Y \end{bmatrix}, \quad {}^{+}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -{}^{-}V_1^X m_1 \\ -{}^{-}V_2^X m_2 \\ -{}^{-}V_1^Y m_1 \\ -{}^{-}V_2^Y m_2 \\ -\omega_1 J_1 \\ -\omega_2 J_2 \\ -e \left( c_\gamma (-{}^{-}V_1^X + {}^{-}V_2^X - a_1 {}^{-}\omega_1 + a_2 {}^{-}\omega_2) + s_\gamma (-{}^{-}V_1^Y + {}^{-}V_2^Y - b_1 {}^{-}\omega_1 + b_2 {}^{-}\omega_2) \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

където са въведени означенията  $c_\gamma = \cos \gamma$  и  $s_\gamma = \sin \gamma$ .

Решаването на системата (25) се извършва спрямо вектора на неизвестните кинематични параметри след удара  ${}^{+}\mathbf{X}$ :

$${}^{+}\mathbf{X} = {}^{+}\mathbf{A}^{-1} \cdot {}^{+}\mathbf{B} \quad (26)$$

като получените скорости служат за начални условия при динамичната симулация на движението на автомобилите след удара.

2) При известни скорости на автомобилите след удара се търсят скоростите на автомобилите преди удара. В този случай, системата линейни уравнения се представя в следния матричен вид:

$${}^{-}\mathbf{A} {}^{-}\mathbf{X} = {}^{-}\mathbf{B} \quad (27)$$

където:

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -J_1 & 0 & a_1 & -b_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -J_2 & -a_2 & b_2 \\ -ec_y & -es_y & ec_y & es_y & e(-a_1c_y - b_1s_y) & e(a_2c_y + b_2s_y) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu c_y + s_y & c_y - \mu s_y \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} -V_1^x \\ -V_1^y \\ -V_2^x \\ -V_2^y \\ -\omega_1 \\ -\omega_2 \\ S^x \\ S^y \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} -V_1^x m_1 \\ -V_2^x m_2 \\ -V_1^y m_1 \\ -V_2^y m_2 \\ -\omega_1 J_1 \\ -\omega_2 J_2 \\ -\left( c_y (-V_1^x + V_2^x - a_1 \omega_1 + a_2 \omega_2) + \right. \\ \left. + s_y (-V_1^y + V_2^y - b_1 \omega_1 + b_2 \omega_2) \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Решаването на системата (27) се извършва спрямо вектора на неизвестните кинематични параметри преди удара  $\bar{\mathbf{X}}$ :

$$\bar{\mathbf{X}} = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{B}} \quad (28)$$

### 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ОПРЕДЕЛЯНЕТО НА КИНЕМАТИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Аналитичното решаване на системите линейни уравнения (26) и (28) е трудно поради голямата размерност на задачата, затова единственият практически подход е създаването на интерактивен WEB базиран калкулатор, който използва числен метод за решаване на системите уравнения [26]. Web-базирано приложение - „Калкулатор на кинематични характеристики на ПТП“ (фиг.2) е разработено с използването на HTML [8] и JavaScript [9]. Калкулаторът пресмята стойностите на кинематичните характеристики на транспортните средства след момента на удара при зададени такива преди удара.

Последователността на работа с приложението:

1. Въвеждане на стойности на характеристиките на ПТП преди удара в текстови полета на разработена за целта форма (виж параметрите в „лявата форма“ на фиг.1).
2. Стартиране на изчисленията чрез натискане на бутон “Start Calculations”.
3. Преобразуване на текстовата информация в числа, извършване на необходимите допълни-

телни изчисления и попълване на съответните стойности в матриците  $\bar{\mathbf{A}}$  и  $\bar{\mathbf{B}}$ .

4. Намиране на обратна матрица на  $\bar{\mathbf{A}}$ , като е използвана, представената в [10] JavaScript функция, при която обръщането се извършва чрез гаусова елиминация [11] и продължаване на програмата или в случай, че такава не може да бъде намерена (детерминантата е равна на 0) извеждане на съобщение за необходимост от корекция на входните данни и прекъсване на изпълнението.

5. Умножение на матриците и извеждане на решението в текстовите полета на формата за представяне на резултатите от пресмятането („дясната“ форма на фиг.2).

Основните предимства на реализацията в WEB среда на изчислителните алгоритми са следните:

- 1) Всеки е свързан с интернет навсякъде и по-всяко време и това е особено удобно при работа на експертите в полеви условия;
- 2) Осигурена е бърза комуникация в среда със значителни информационни ресурси – бази данни с технически характеристики на автомобили, климатични прогнози, интернет камери и др.;
- 3) Заложените в калкулатора изчислителни алгоритми са достъпни за преглед и модификация от потребителите;
- 4) Калкулаторът е реализиран чрез безплатни програмни средства;
- 5) Системата е отворена и подлежи на по-нататъшно развитие чрез добавяне на допълнителни модули.

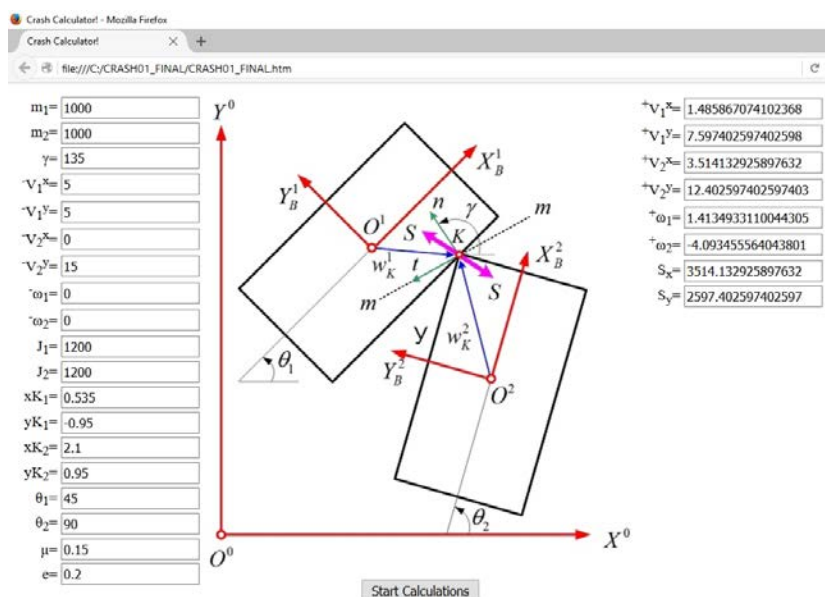
### 4. ИЗВОДИ

Като резултат от извършената работа са предложени:

- 1) Математичен модел на удар на транспортни средства, основа на интегралните форми на теоремите за изменение на количеството на движение и кинетичния момент, чрез който са получени зависимости за определяне на кинематичните характеристики на транспортните средства след удара при известни характеристики преди удара и обратно – за определяне на кинематичните характеристики на транспортните средства преди удара при известни характеристики след удара;



2) WEB базиран калкулатор, реализиращ работните алгоритми и автоматизиращ определението на кинематичните характеристики на транспортните средства.



фиг.2 Web калкулатор на кинематични характеристики на ПТП

**Литература:**

[1] [http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2013/en/](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2013/en/), accessed July 28, 2014.  
 [2] <http://dokpbdp.mvr.bg/Statistics/default.htm>  
 [3] <http://www.pc-crash.com/>  
 [4] **Карпетков С.**, Компютърна програма "Expertcar" за експертно съдебно изследване на удар на автомобили. Механика на машините No 38, 2001.  
 [5] **Pawlus W., Karimi H., Robbersmyr K.** Mathematical modeling of a vehicle crash test based on elasto-palstic unloading scenarios of spring mass models. The International Journal of Advanced Manufacturing

Technology, July 2011, Volume 55, Issue 1-4, pp 369-378. DOI 10.1007/s00170-010-3056-x  
 [6] **Brach R., Brach R.** A Review of Impact Models for Vehicle Collision. SAE Paper 870048.  
 [7] **Писарев А., Парасков Ц., Бъчваров С.** Курс по теоретична механика, ч. II Динамика. Техника, София, 1988г.  
 [8] <https://www.w3.org/html/>  
 [9] <http://www.w3schools.com/js/>  
 [10] <http://blog.acipo.com/matrix-inversion-in-javascript/>  
 [11] **Chapra S.** Applied numerical methods with Matlab for engineeris and scientists. McGrawHill, 2005.