

Dynamika mechanických častí výrobnéj linky s gravitačným zásobníkom

Michal Boršč, Ján Štefula, Vladimír Slivka, Ľuboslav Tomek

Článok sa zaoberá matematickými a počítačovými modelmi na analýzu kinematiky a dynamiky a simuláciu procesov vo výrobných linkách, v ktorých sa na vyrovnávanie materiálových tokov používa gravitačný zásobník. Skúmaným objektom je linka na výrobu pätkových lán automobilových plášťov. Viacosový pohybový systém linky je programovo riadený. Programové riadenie je navrhnuté tak, aby zabezpečovalo presnú realizáciu želaných časových priebehov pohybových operácií. Dynamické odchýlky spôsobené zotrvačnosťou regulačných obvodov sú kompenzované inverznými modelmi dynamiky mechanických častí. V matematických modeloch sa rešpektujú energetické interakcie medzi jednotlivými časťami technologickej linky. Počítačovým simulačným experimentom na inverznom modeli dynamiky mechanických častí a na modeli pozorovateľa síl získame časové priebehy síl ťahu v drôte pätkového lana na jednotlivých miestach linky. Okrem toho získame momenty a výkony pohonných motorov a ďalšie charakteristické veličiny. Výsledky slúžia na overovanie optimálnosti konštrukcie a na návrh pohonov. Na záver je uvedený simulačný model celej výrobnéj linky s regulátormi pohonov a nadradeným programovým riadením.

Úvod

Moderné výrobné stroje a strojárské výrobky stratili svoj pôvodný, čisto strojársky charakter. Dnes sú to vysokosofistikované stroje, prístroje a zariadenia, ktorých funkčné a úžitkové vlastnosti dostali vďaka elektronike, informačným technológiám a riadiacim systémom novú kvalitu. Prax ukázala, že navrhovanie, výroba a prevádzka zariadení, ktoré sú kombináciou mechanických častí, elektromechanických meničov energie, elektroniky, informačných a riadiacich prostriedkov, nie sú efektívne, ak sa zabezpečujú samostatne, parciálne v rámci pôvodných jednotlivých technických a vedných odborov. Mechatronika sa usiluje o synergickú kombináciu strojárstva, elektrotechniky, elektroniky, informatiky a kybernetiky pri projektovaní, konštruovaní, výrobe a prevádzke moderných strojov, prístrojov a zariadení s automatickým počítačovým riadením – mechatronických systémov [1], [2]. Kľúčom na dosiahnutie synergického efektu je interdisciplinárny a systémový prístup predovšetkým pri návrhu mechatronického systému.

Cieľom mechatronického návrhu je dosiahnuť synergický efekt, ktorý sa prejaví v optimálnej štruktúre a konštrukcii mechatronického systému, v jeho správaní, v kompatibilite subsystémov a v optimálnych interakciách medzi subsystémami. Súčasťou jednotlivých etáp mechatronického návrhu je tvorba matematického a počítačového modelu – virtuálneho objektu a vyšetrovanie jeho vlastností matematickou analýzou a počítačovým simulačným experimentom.

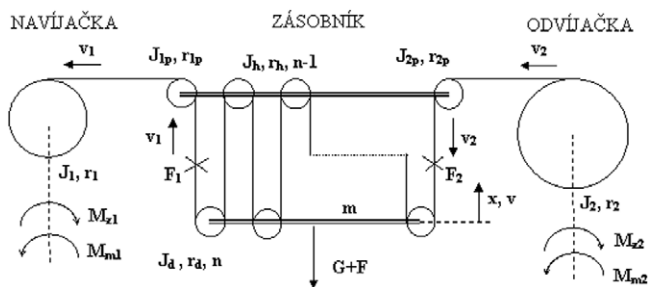
Článok je zameraný na jednu etapu návrhu mechatronického systému, a to na tvorbu matematického modelu a analýzu kinematiky a dynamiky mechanických častí. Táto etapa je mimoriadne dôležitá z hľadiska celkovej kvality mechatronického systému. Riadením možno zabezpečiť realizáciu len takých pohybových operácií a energetických interakcií, aké dovoľujú fyzikálne a funkčné obmedzenia mechanických častí a akčných členov. Ide

teda o to, aby mechanické časti a akčné členy na jednej strane umožňovali realizáciu želaných pohybových operácií a zároveň aby neboli nadmerne predimenzované a aby boli navzájom energeticky kompatibilné.

Analýzu dynamiky mechanických častí mechatronického systému demonštrujeme na príklade technologickej linky na výrobu pätkových lán automobilových plášťov. Úloha bola riešená v rámci štátneho programu výskumu a vývoja č. 2003 SP 26 028 0A 01 Strojnotechnologické výrobné systémy zvyšujúce konkurenčnú schopnosť gumárenského priemyslu Slovenskej republiky. Skúmali sa viaceré koncepcie a konfigurácie linky. V článku opíšeme tvorbu matematického modelu a postup analýzy dynamických vlastností mechanických častí simulačným experimentom jedného zo skúmaných variantov linky.

1. Matematický model mechanických častí linky

Technologická linka na výrobu pätkových lán automobilových plášťov je pomerne zložitý modulárny systém, ktorého súčasťami sú odvíjačka, extruder, ohrievací a ochladzovací modul, zásobník, navíjačka a rôzne manipulačné a ochranné zariadenia. Zjednodušená schéma kinematiky linky s gravitačným zásobníkom je na obr. 1. Rýchlosť odvíjania drôtu z cievky a jeho pogumovanie v prvej časti linky je spravidla konštantná. Navíjačka pracuje v cyklickom režime s veľkými rozsahmi zmien rýchlosti a zrýchlení navíjania pätkového lana predpísaného tvaru. Je možný aj taký variant, keď aj prvá časť linky pracuje v cyklickom režime s cyklicky sa meniacou rýchlosťou. Zmeny rýchlosti a zrýchlení odvíjania kopírujú proces navíjania lana, ale ich rozsah je menší [5]. Na vyrovnávanie rozdielov materiálových tokov v prvej a druhej časti linky sa používa mechanický gravitačný zásobník, ktorý môže byť doplnený pomocným pohonom. Zásobník je konštruovaný ako kladkostroj. Kladky, ktoré vykonávajú translačný pohyb, sú vzájomne prepojené a tvoria jeden celok – tanečník.



Obr.1 Kinematická schéma výrobnej linky

Tanečník sa uvádza do pohybu vlastnou tiažou G a silou F pomocného pohonu.

Pri tvorbe matematického modelu kinematiky a dynamiky mechanických častí linky uvažujeme s pohyblivými telesami, ktoré sú spojené pohybujúcim sa materiálom, prevíjaným a pogumovaným drôtom, a ktoré tvoria sústavu viazaných telies s viacerými pohonmi – viacodosový pohybový systém.

Dynamiku všetkých rotujúcich telies s rovnakou obvodovou rýchlosťou $v_1(t)$ na strane navíjačky opíšeme jednou pohybovou rovnicou:

$$\left[\frac{J_1}{r_1^2} + \frac{J_{1p}}{r_{1p}^2} \right] \frac{dv_1}{dt} = \frac{M_{m1} - M_{z1}}{r_1} - F_1 \quad (1)$$

Podobne dynamiku rotujúcich telies s rovnakou obvodovou rýchlosťou $v_2(t)$ na strane odvíjačky opíšeme rovnicou:

$$\left[\frac{J_2}{r_2^2} + \frac{J_{2p}}{r_{2p}^2} + \frac{J_{2o}}{r_{2o}^2} \right] \frac{dv_2}{dt} = \frac{M_{m2} - M_{z2}}{r_2} + F_2 \quad (2)$$

kde J_1 je moment zotrvačnosti na hriadeľi formy navíjačky,

J_2 – moment zotrvačnosti na hriadeľi odvíjačky,

J_{1p} – moment zotrvačnosti kladky na výstupe zásobníka,

J_{2p} – moment zotrvačnosti kladky na vstupe zásobníka,

J_{2o} – moment zotrvačnosti ochladzovacieho bubna,

r_1 – polomer formy navíjačky,

r_2 – polomer cievky na odvíjačke,

r_{1p} – polomer kladky na výstupe zásobníka,

r_{2p} – polomer kladky na vstupe zásobníka,

r_{2o} – polomer ochladzovacieho bubna,

M_{m1} – moment motora na hriadeľi navíjačky,

M_{m2} – moment motora – brzdy na hriadeľi odvíjačky,

M_{z1} – statická záťaž motora navíjačky,

M_{z2} – statická záťaž motora odvíjačky,

F_1 – sila ťahu v drôte pred prvou kladkou tanečníka zásobníka,

F_2 – sila ťahu v drôte za poslednou kladkou tanečníka zásobníka,

v_1 – rýchlosť navíjania drôtu,

v_2 – rýchlosť odvíjania drôtu.

Pre jednoduchosť ďalej označíme

$$H_1 = \frac{J_1}{r_1^2} + \frac{J_{1p}}{r_{1p}^2} \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{J_2}{r_2^2} + \frac{J_{2p}}{r_{2p}^2} + \frac{J_{2o}}{r_{2o}^2} \quad (4)$$

Pri tvorbe matematického modelu zásobníka uvažujeme translačný pohyb tanečníka a rotačný pohyb dolných a horných kladiek.

Rýchlosť vertikálneho translačného pohybu tanečníka je:

$$v = \frac{v_1 - v_2}{2n} \quad (5)$$

kde n je počet dolných kladiek zásobníka.

Integrovaním časového priebehu rýchlosti tanečníka získame časový priebeh jeho polohy:

$$x = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{v_1 - v_2}{2n} dt \quad (6)$$

Rovnica dynamiky translačného pohybu tanečníka:

$$F_1 + F_2 = \frac{G + F}{n} + \frac{m}{n} \frac{dv}{dt} = \frac{G + F}{n} + \frac{m}{2n^2} \left(\frac{dv_1}{dt} - \frac{dv_2}{dt} \right) \quad (7)$$

kde m je hmotnosť tanečníka,

G – tiaž tanečníka,

F – sila pomocného pohonu zásobníka.

Obvodové rýchlosti dolných kladiek zásobníka sú:

$$v_{di} = v_2 + (2i - 1)v \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Obvodové rýchlosti horných kladiek zásobníka sú:

$$v_{hi} = v_2 + 2iv \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (9)$$

Rovnica dynamiky všetkých rotujúcich častí – kladiek zásobníka s výnimkou prvej a poslednej hornej kladky je:

$$\begin{aligned} F_1 - F_2 &= \frac{J_d}{r_d^2} \frac{d}{dt} [(v_2 + v) + (v_2 + 3v) + \dots + (v_2 + (2n - 1)v)] + \\ &+ \frac{J_h}{r_h^2} \frac{d}{dt} [(v_2 + 2v) + (v_2 + 4v) + \dots + (v_2 + 2(n - 1)v)] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\frac{J_d}{r_d^2} n + \frac{J_h}{r_h^2} (n - 1) \right] \left[\frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

kde J_d je moment zotrvačnosti dolnej kladky zásobníka,

J_h – moment zotrvačnosti hornej kladky zásobníka.

Pre jednoduchosť, podobne ako predtým, označíme

$$H_A = \frac{1}{2} \left[\frac{J_d}{r_d^2} n + \frac{J_h}{r_h^2} (n - 1) \right] \quad (11)$$

Riešením rovníc (7) a (10) vypočítame sily:

$$F_1 = \frac{G + F}{2n} + \frac{1}{2} \left[H_A + \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_1}{dt} + \frac{1}{2} \left[H_A - \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_2}{dt} \quad (12)$$

$$F_2 = \frac{G + F}{2n} - \frac{1}{2} \left[H_A - \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_1}{dt} - \frac{1}{2} \left[H_A + \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_2}{dt} \quad (13)$$

Zo vzťahov (1), (2), (12) a (13) a vzťahov na označenie konštánt modelu (3), (4) a (11) získame rovnice:

$$\begin{aligned} \left[H_1 + \frac{1}{2} \left(H_A + \frac{m}{2n^2} \right) \right] \frac{dv_1}{dt} + \frac{1}{2} \left[H_A - \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_2}{dt} &= \\ = \frac{M_{m1} - M_{z1}}{r_1} - \frac{G + F}{2n} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left[H_A - \frac{m}{2n^2} \right] \frac{dv_1}{dt} + \left[H_2 + \frac{1}{2} \left(H_A + \frac{m}{2n^2} \right) \right] \frac{dv_2}{dt} &= \\ = \frac{M_{m2} - M_{z2}}{r_2} + \frac{G + F}{2n} \end{aligned} \quad (15)$$

Označíme

$$m_1 = H_1 + \frac{1}{2} \left(H_A + \frac{m}{2n^2} \right) \quad (16)$$

$$m_2 = H_2 + \frac{1}{2} \left(H_A + \frac{m}{2n^2} \right) \quad (17)$$

$$m_0 = \frac{1}{2} \left(H_A - \frac{m}{2n^2} \right) \quad (18)$$

$$u_1 = \frac{M_{m1} - M_{z1}}{r_1} - \frac{G + F}{2n} \quad (19)$$

$$u_2 = \frac{M_{m2} - M_{z2}}{r_2} + \frac{G + F}{2n} \quad (20)$$

Potom rovnice (14) a (15) budú mať tvar

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} + m_0 \frac{dv_2}{dt} = u_1 \quad (21)$$

$$m_0 \frac{dv_1}{dt} + m_2 \frac{dv_2}{dt} = u_2 \quad (22)$$

Riešením rovníc (21) a (22) dostaneme stavové rovnice mechanických častí celej linky – viazaných telies navíjačky, odvíjačky a zásobníka:

$$\frac{dv_1}{dt} = b_{11}u_1 + b_{12}u_2 \quad (23)$$

$$\frac{dv_2}{dt} = b_{21}u_1 + b_{22}u_2 \quad (24)$$

kde

$$b_{11} = dm_2$$

$$b_{12} = b_{21} = -dm_0$$

$$b_{22} = dm_1$$

$$d = \frac{1}{m_1 m_2 - m_0^2} \quad (25)$$

Rovnice (1), (2), (12), (13), (19), (20), (23) a (24) s príslušnými vzťahmi na výpočet konštánt vystupujúcich v rovniciach sú matematickým modelom dynamiky mechanických častí linky.

Pri analýze a syntéze mechatronického systému potrebujeme inverzný model dynamiky mechanických častí [3]. Z rovníc (19), (20), (21) a (22) odvodíme vzťahy na výpočet hnacích momentov motora navíjačky a odvíjačky:

$$M_{m1} = r_1 \left(m_1 \frac{dv_1}{dt} + m_0 \frac{dv_2}{dt} + \frac{G + F}{2n} \right) + M_{z1} \quad (26)$$

$$M_{m2} = r_2 \left(m_0 \frac{dv_1}{dt} + m_2 \frac{dv_2}{dt} - \frac{G + F}{2n} \right) + M_{z2} \quad (27)$$

Pomer hodnoty konštanty m_0 a konštánt m_1 a m_2 vyjadruje mieru energetickej interakcie medzi mechanickými časťami linky na strane odvíjačky a navíjačky a ich pohonmi.

Technologická linka obsahuje okrem rotujúcich telies uvažovaných v našom modeli aj ďalšie viazané rotujúce telesa prepojené navíjaným a odvíjaným drôtom. Sú to rôzne pomocné vodiace

kladky, odťahové kladky a pod. Model dynamiky mechanických častí linky v použitom tvare môžeme ľahko rozšíriť o parametre ďalších rotujúcich telies v linke. Okrem pohonných motorov – generátorov momentov M_{m1} a M_{m2} a sily F môžu byť do modelu linky zaradené ďalšie pohony, napríklad pohon odťahových kladiek medzi odvíjačkou a zásobníkom. Základný tvar rovníc, metodika tvorby modelov, simulácie a analýzy procesov sa tým nezmenia.

2. Počítačové simulačné modely mechanických častí linky

Podľa vzťahov (5), (6), (19), (20), (23) a (24) zostavíme simulačný model dynamiky mechanických častí linky, ktorého bloková schéma je na obr. 2.

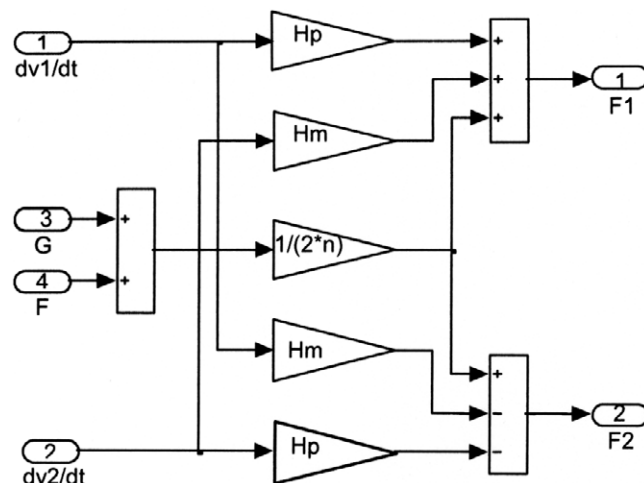
Na sledovanie časových priebehov síl F_1 a F_2 podľa vzťahov (12) a (13) zostavíme simulačný model pozorovateľa síl (obr. 3).

V modeli sme označili:

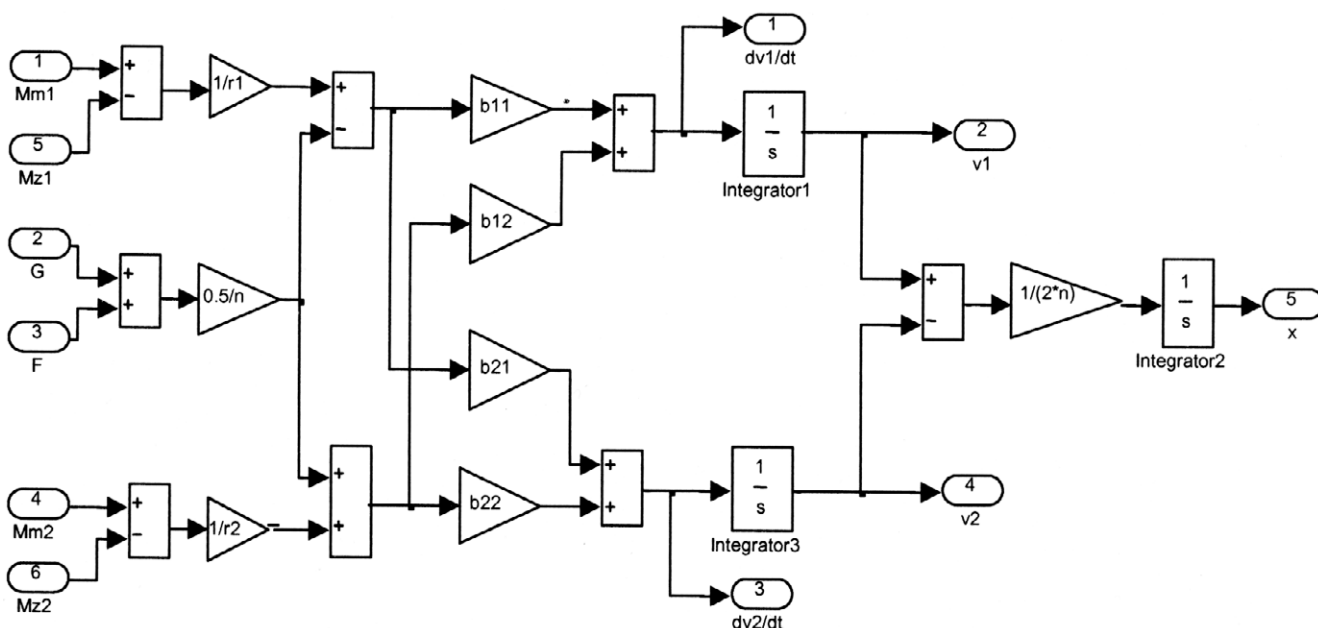
$$H_p = 0,5 \left(H_A + \frac{m}{2n^2} \right) \quad (28)$$

$$H_m = 0,5 \left(H_A - \frac{m}{2n^2} \right) \quad (29)$$

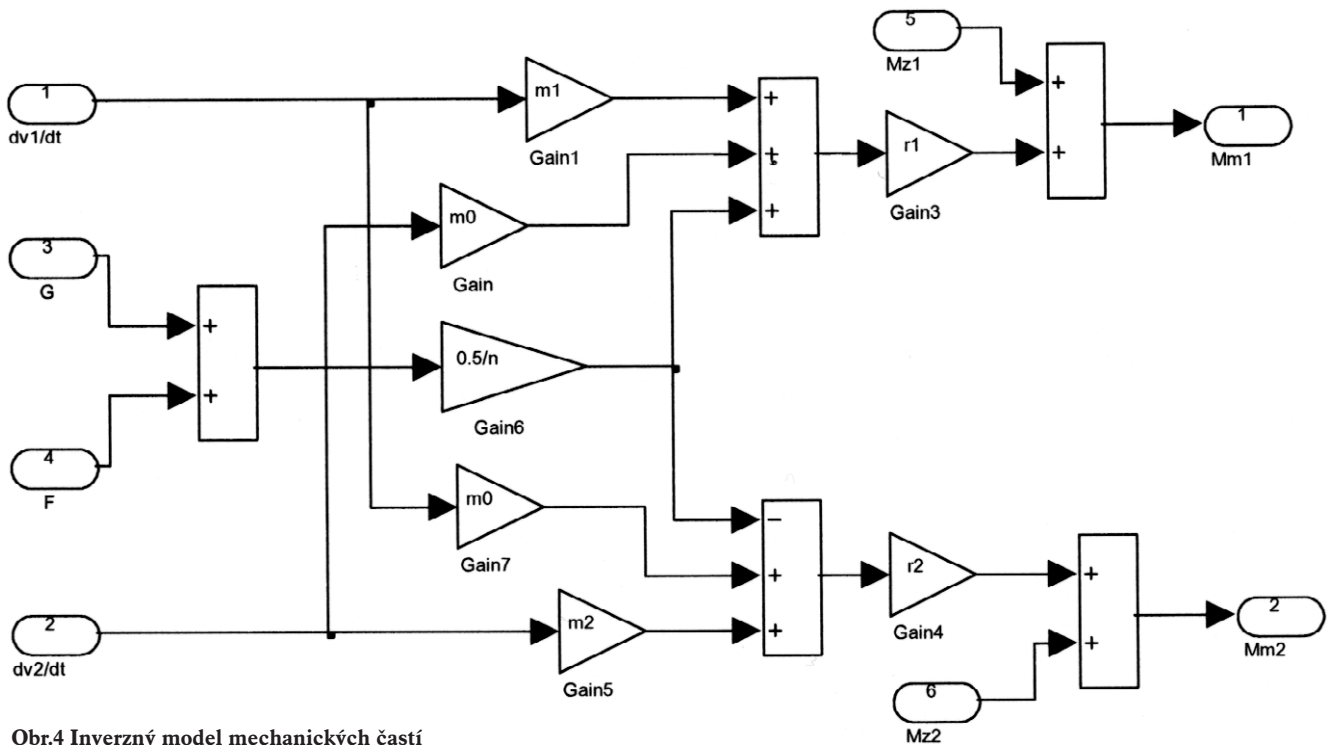
Inverzný simulačný model dynamiky mechanických častí zostavíme podľa rovníc (26) a (27) (obr. 4).



Obr.3 Pozorovateľ síl – ťahu v drôte na vstupe a výstupe zásobníka



Obr.2 Model dynamiky mechanických častí



Obr.4 Inverzný model mechanických častí

3. Kinematika a dynamika mechanických častí linky

Analýzu kinematiky a dynamiky linky a následne návrh pohonov a riadiaceho systému robíme postupne v týchto etapách:

- analýza kinematiky mechanických častí linky,
- analýza dynamiky mechanických častí linky s využitím simulačného experimentu na inverznom modeli dynamiky mechanických častí a modeli pozorovateľa síl,
- návrh pohonov (akčných členov),
- návrh štruktúry a algoritmov riadiaceho systému, t. j. regulačných obvodov a nadradeného programového riadenia,
- analýza dynamiky celej linky ako mechatronického systému vrátane regulačných obvodov a nadradeného riadiaceho systému.

Niektoré údaje potrebné na konštrukčný návrh linky a pohonov môžeme získať výpočtom priamo zo vzťahov, ktorými je opísaný matematický model mechanických častí linky. Viac informácií o časových priebehoch charakteristických veličín získame simuláciou procesov na počítačovom simulačnom modeli kinematiky a dynamiky mechanických častí linky. Pri analýze kinematiky a dynamiky mechanických častí linky a návrhu akčných členov vychádzame z predpokladu, že systém nadradeného riadenia linky a regulačné obvody pohonov zabezpečia presnú realizáciu programov navíjania a odvíjania drôtu počas pracovného cyklu. To znamená, že časové priebehy dĺžky navinutého drôtu $y(t)$, rýchlosti navíjania $v_1(t)$ a zrýchlenia $dv_1(t)/dt$ sú dopredu dané. Podobne sú dané časové priebehy rýchlosti odvíjania drôtu $v_2(t)$, zrýchlenia $dv_2(t)/dt$ a z toho vyplývajúci časový priebeh polohy tanečníka $x(t)$. Dopredu zadaný môže byť aj časový priebeh sily $F(t)$ pomocného pohonu tanečníka. Tieto veličiny budú vstupnými veličinami simulačného modelu.

Simulačný model zostavený v programe Matlab-Simulink (obr. 5) obsahuje generátor programu nadradeného riadenia (GenProg), ktorý generuje želané časové priebehy rýchlostí a zrýchlení drôtu na strane navíjачky v_{1z} , dv_{1z}/dt a odvíjачky v_{2z} , dv_{2z}/dt . Môže tiež obsahovať model generátora sily F_z pomocného pohonu tanečníka. Druhou časťou je inverzný model dynamiky mechanických častí linky (Inv_dyn). Jeho výstupmi sú časové priebehy momentov, ktoré majú vyvíjať akčné členy (motory) navíjачky M_{m1} a odvíjачky M_{m2} .

Simulačný model umožňuje sledovať priebehy uhlových rýchlostí navíjачky v_{1z}/r_1 a odvíjачky v_{2z}/r_2 a obsahuje výpočet okamžitých výkonov motorov navíjачky a odvíjачky podľa vzťahov:

$$P_1 = M_{m1} \frac{v_{1z}}{r_1} \quad (30)$$

$$P_2 = M_{m2} \frac{v_{2z}}{r_2} \quad (31)$$

Do simulačného modelu možno zahrnúť tiež výpočet okamžitých hodnôt výkonu pomocného motora tanečníka a simuláciu jeho časového priebehu podľa vzťahu:

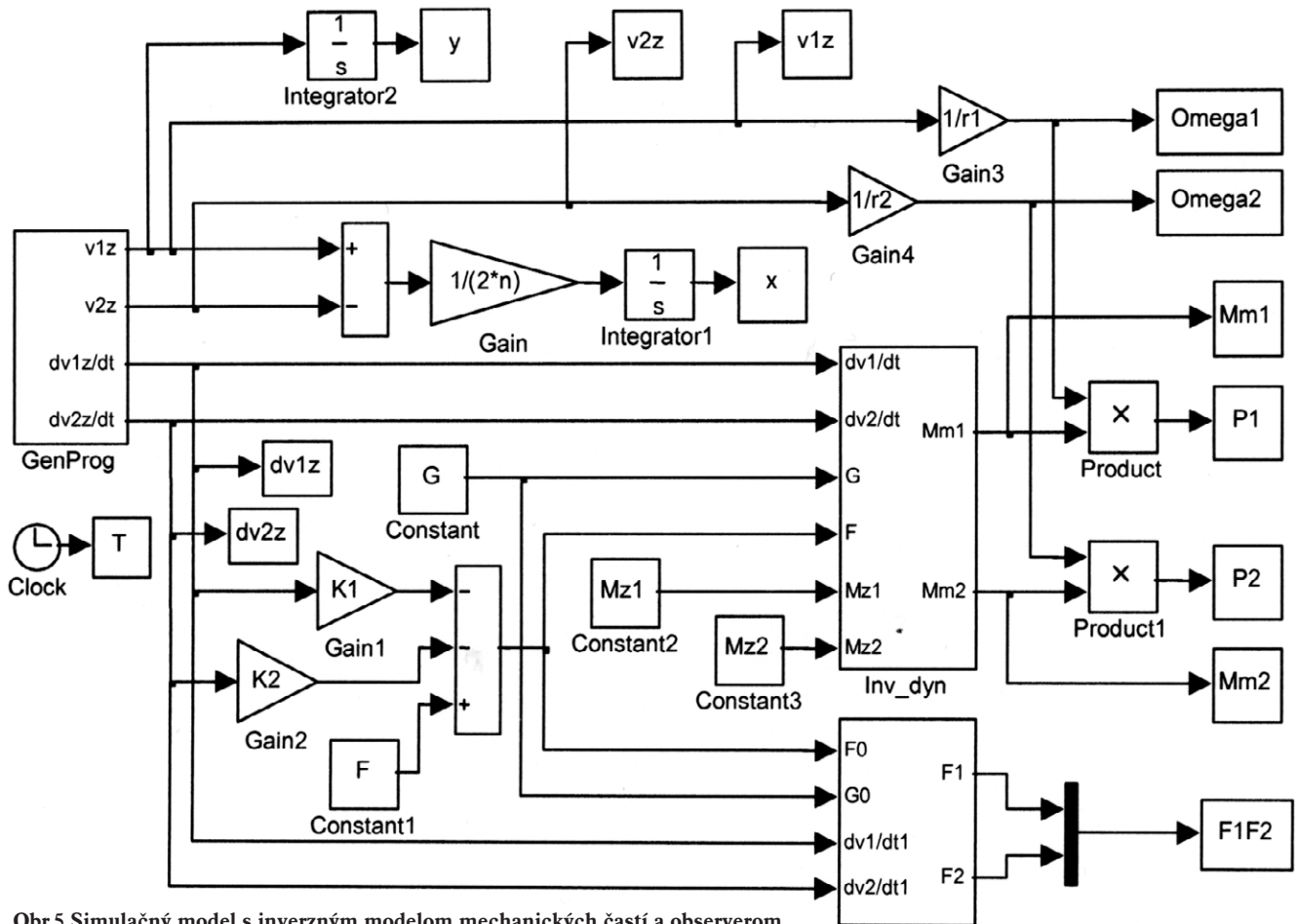
$$P_t = Fv \quad (32)$$

Tretou časťou je pozorovateľ síl za prvou hornou kladkou zásobníka F_2 a pred poslednou hornou kladkou zásobníka F_1 (obr. 1).

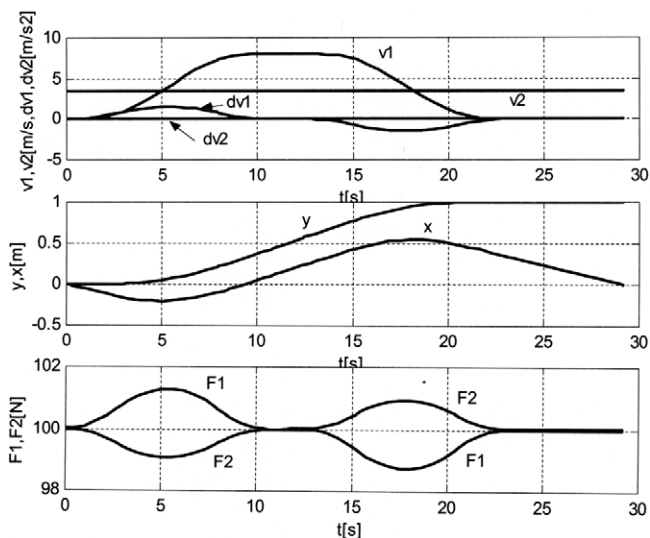
Výsledky simulačného experimentu pre linku s konštantnou rýchlosťou odvíjania drôtu sú na obr. 6 a 7 a pre linku s meniacou sa rýchlosťou odvíjania a pogumovania drôtu sú na obr. 8 a 9.

Z požiadavky maximálnej produktivity linky vyplýva, že program navíjania má byť časovo optimálny pri daných technologických obmedzeniach. Obmedzenia sa kladú na rýchlosť a zrýchlenie navíjania. Ďalšou je požiadavka, aby bol časový priebeh zrýchlenia hladký, to znamená, že má byť obmedzená aj druhá derivácia zrýchlenia pohybu tanečníka. Diagram obsahuje tiež medzioperačnú pauzu, počas ktorej sa vykonajú manipulačné operácie spojené s odberom navinutej cievky a prípravou nového cyklu navíjania. Generované želané a realizované časovo optimálne priebehy dĺžky navinutého lana y_z , rýchlosti navíjania v_{1z} a zrýchlenia dv_{1z}/dt sú na obr. 6 a 8.

Významnú funkciu v linke má zásobník. Jeho úlohou je akumulácia materiálu a vyrovnávanie rozdielu materiálových tokov v dvoch častiach linky, spôsobeného rôznymi rýchlosťami navíjania a odvíjania drôtu. Hlavným cieľom kinematickej analýzy je určenie konštrukčných parametrov zásobníka, a to rozpätie pohybu tanečníka a počet kladiek. Z časových priebehov rýchlosti navíjania $v_{1z}(t)$ a rýchlosti odvíjania $v_{2z}(t)$ sa v simulačnom modeli podľa vzťahu (6) počíta časový priebeh polohy tanečníka $x(t)$. Tanečník sa má na konci pracovného cyklu vrátiť do východiskovej polohy, to znamená, že stredné hodnoty rýchlostí odvíjania

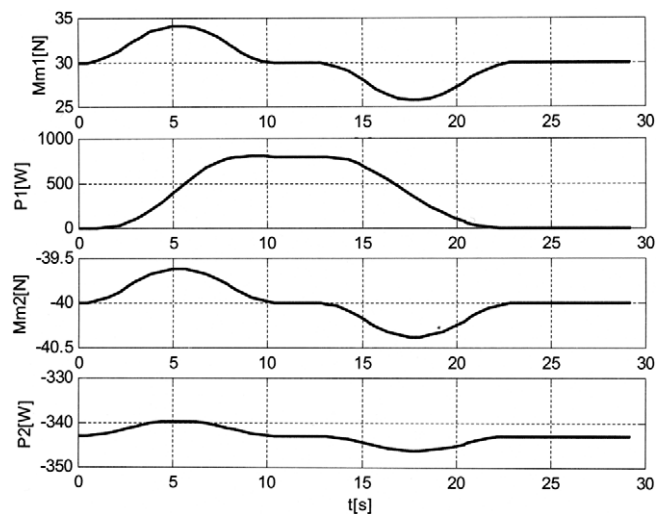


Obr.5 Simulačný model s inverzným modelom mechanických častí a observerom



Obr.6 Časové priebehy charakteristických prevádzkových veličín výrobnéj linky s konštantnou rýchlosťou odvíjania drôtu

a navíjania počítané pre pracovný cyklus majú byť rovnaké. Z časového priebehu polohy tanečníka (obr. 6 a 8) získaného na simulačnom modeli podľa vzťahu (6) možno zistiť rozpätie jeho pohybu, jeho dolnú a hornú polohu. Pre zvolené dovolené rozpätie pohybu tanečníka potom spätne určíme potrebný počet kladiek n . Ten možno výrazne ovplyvniť charakterom časového priebehu rýchlosti odvíjania $v_2(t)$. Na obr. 6 je zobrazený časový priebeh polohy tanečníka $x(t)$ pri navrhnutom časovo optimálnom programe navíjania, konštantnej rýchlosti odvíjania drôtu a pri zvolenom počte kladiek zásobníka. Na obr. 8 je zobrazený časový priebeh polohy tanečníka $x(t)$ pri tom istom programe navíjania a pri tom istom počte kladiek zásobníka, ale pri meniacej sa rýchlosti odvíjania a pogumovania drôtu. Rýchlosť odvíjania sa mení



Obr.7 Časové priebehy momentov a výkonov motorov výrobnéj linky s konštantnou rýchlosťou odvíjania drôtu

súbežne s rýchlosťou navíjania, pričom v uvedenom prípade okamžitý rozdiel rýchlosti odvíjania oproti strednej hodnote predstavuje polovicu rozdielu okamžitej rýchlosti navíjania oproti strednej hodnote. Rozsah zmien polohy tanečníka sa tiež zmenšil na polovicu. Pri dodržaní toho istého rozsahu zmien polohy tanečníka v druhom prípade je teda potrebný len polovičný počet kladiek.

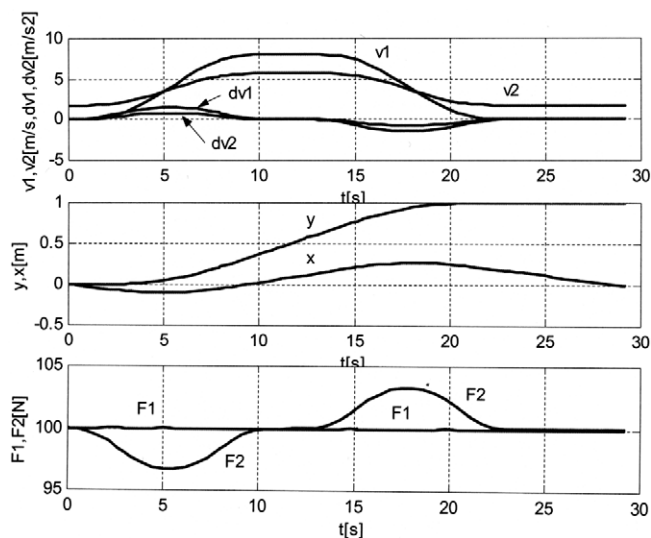
Na výstupoch pozorovateľa síl môžeme sledovať časové priebehy ťahu v drôte pred prvou kladkou tanečníka F_2 a za poslednou kladkou tanečníka F_1 , počítané podľa vzťahov (12) a (13). Pri konštantných rýchlostiach odvíjania a navíjania sú sily F_1 a F_2 rovnaké, úmerné súčtu tiaže tanečníka G a sily pomocného pohonu tanečníka F . Veľkosť síl F_1 a F_2 má zodpovedať požadovanému ťahu

pri odvíjaní a navíjaní drôtu. Pri použití pomocného pohonu tanečníka môžeme zmenšiť potrebnú hmotnosť tanečníka. Odchýlky tahu v drôte sú spôsobené zotrvačnými silami hmotnosti tanečníka a momentov zotrvačnosti jeho kladiek pri zrýchlení a spomalení pohybu drôtu na strane navíjačky alebo na strane odvíjačky. Tieto sily nezávisia od momentov zotrvačnosti rotujúcich telies pred zásobníkom a za ním, teda ani od momentu zotrvačnosti formy navíjačky a momentu zotrvačnosti odvíjanej cievky. Konštantný ťah pri navíjaní za poslednou kladkou tanečníka F_1 môžeme zabezpečiť riadením sily F pomocného pohonu, a to tak, aby okrem konštantnej sily vyvíjal ešte prídavnú zložku F_k potrebnú na kompenzáciu zotrvačných síl zrýchlenia pohyblivých častí zásobníka. Potrebná prídavná zložka sily pomocného pohonu vyplýva zo vzťahu (12) a má byť

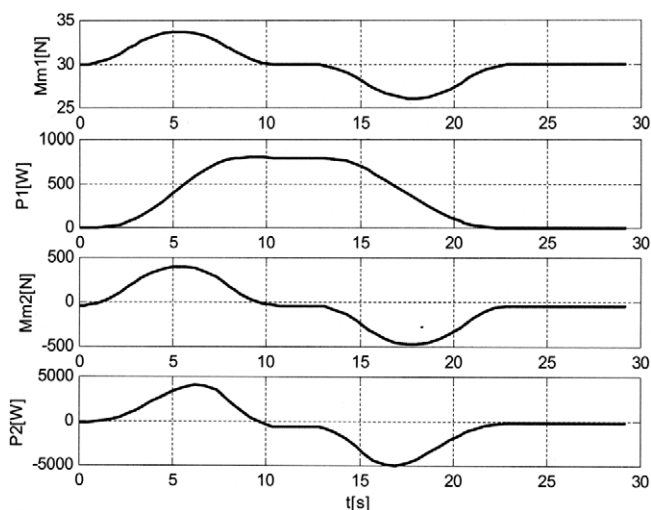
$$F_k = -\left[nH_A + \frac{m}{2n}\right] \frac{dv_1}{dt} - \left[nH_A - \frac{m}{2n}\right] \frac{dv_2}{dt} = -K_1 \frac{dv_1}{dt} - K_2 \frac{dv_2}{dt} \quad (33)$$

Na obr. 6 sú zobrazené časové priebehy ťahov v drôte na vstupe a výstupe gravitačného zásobníka F_1 a F_2 pri konštantnej sile F vyvíjanej pomocným pohonom a na obr. 8 pri korekcii sily pomocného pohonu podľa vzťahu (33) tak, aby ťah v drôte F_1 pri navíjaní bol konštantný.

Na výstupoch inverzného modelu dynamiky mechanických častí sledujeme časový priebeh momentov servomotorov navíjačky M_{m1} a odvíjačky M_{m2} . Sú to časové priebehy momentov, ktoré majú vyvíjať servomotory pri ideálnej realizácii programu navíjania a od-



Obr. 8 Časové priebehy charakteristických prevádzkových veličín výrobnéj linky s meniacou sa rýchlosťou odvíjania drôtu



Obr. 9 Časové priebehy momentov a výkonov motorov výrobnéj linky s meniacou sa rýchlosťou odvíjania drôtu

víjania. Model umožňuje zahrnúť do simulačného experimentu aj program – časový priebeh sily F pomocného pohonu tanečníka a statickú záťaž servomotorov vyjadrenú momentmi M_{m1} a M_{m2} . Takto možno zahrnúť do modelu napríklad odpor hlavice vyláčacieho stroja pri pogumovávaní drôtu.

Na obr. 7 sú priebehy momentov a výkonov motorov navíjačky a odvíjačky v linke s konštantnou rýchlosťou odvíjania a pogumovávanie drôtu a na obr. 9 sú časové priebehy momentov a výkonov motorov v linke s meniacou sa rýchlosťou odvíjania a pogumovávanie drôtu.

Výsledky simulácie na simulačnom modeli s inverzným modelom dynamiky mechanických častí linky možno použiť na spresnenie konštrukčných a výkonových parametrov mechanických častí a pri návrhu pohonov motorov a prevodoviek.

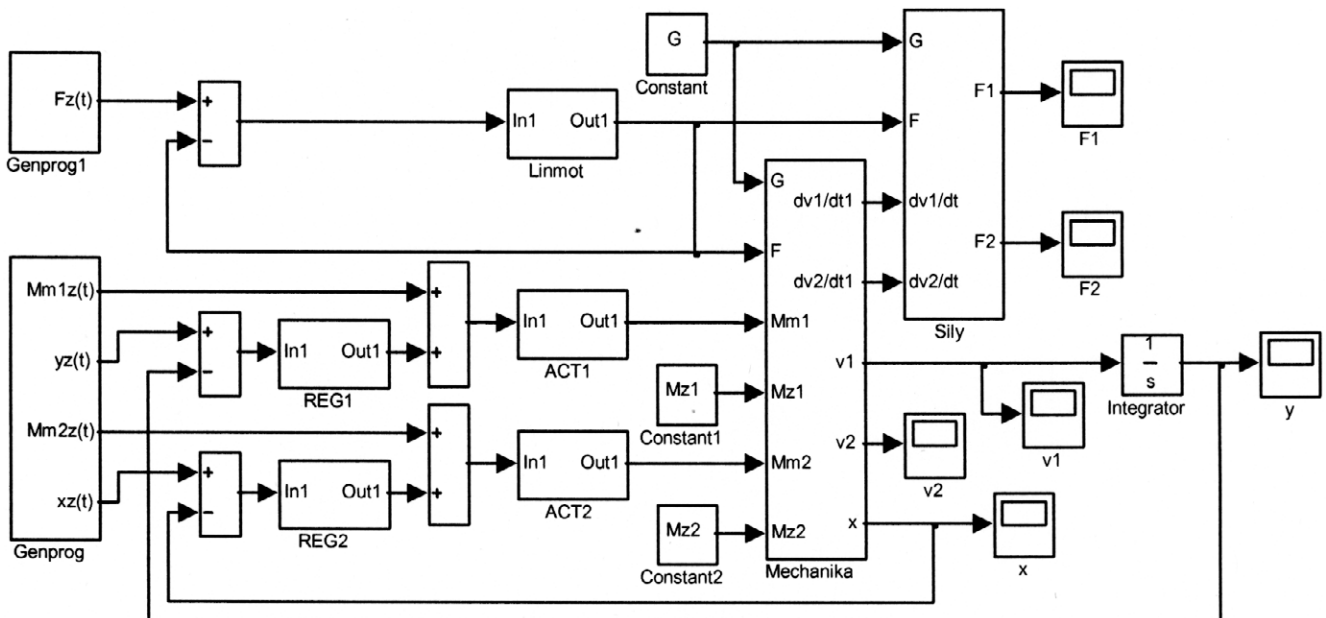
Na simulačnom modeli linky a podľa vzťahov (19), (20), (23) a (24) môžeme sledovať a analyzovať interakcie medzi mechanickými časťami a pohonmi linky. Z konkrétnych číselných hodnôt konštant modelu sa dá usudzovať, do akej miery možno považovať regulačné obvody jednotlivých pohonov za autonómne, či ich možno navrhovať samostatne, alebo či ich treba navrhovať ako súčasť mnohorozmerného systému s viacerými vstupmi a výstupmi s vnútornými energetickými interakciami.

4. Dynamika celej linky s regulačnými obvodmi pohonov a ich programovým riadením

Ďalšou etapou návrhu mechatronického systému je návrh regulačných obvodov, algoritmov nadradeného programového riadenia a tvorba počítačového modelu na simuláciu procesov v celom mechatronickom systéme. Dynamika linky je ovplyvnená dynamikou a zotrvačnosťou mechanických častí a akčných členov s regulačnými obvodmi. Regulačnými obvodmi a nadradeným riadením treba zabezpečiť programy odvíjania a navíjania drôtu a žiadaný ťah v lane pri odvíjaní a navíjaní drôtu s požadovanou presnosťou aj v dynamických režimoch. Pri návrhu regulačných odvodov pohonu, resp. brzdy odvíjačky navyše treba zabezpečiť invariantnosť procesov pri veľkom rozsahu zmien polomeru a momentu zotrvačnosti cievky [4].

Záverečnou fázou návrhu mechatronického systému je analýza dynamiky celej linky. Simulačný experiment spočíva v riešení priamej úlohy dynamiky mechanických častí pri použití systéme riadenia. Na obr. 10 je znázornený jeden zo spôsobov usporiadania pohonov a ich riadenia. Pohon ACT1 je realizovaný asynchrónnym motorom s vektorovým riadením a pracuje ako generátor momentu M_{m1} . Spolu s regulátorom REG1 plní funkciu polohového servomechanizmu, ktorý zabezpečuje priebeh cyklického procesu navíjania podľa časového diagramu dĺžky navinutého lana $y_2(t)$ – programu generovaného nadradeným systémom riadenia. Časový priebeh rýchlosti odvíjania drôtu z cievky v_2 je zabezpečený nepriamo. Pohon odvíjačky ACT2 je tiež realizovaný asynchrónnym motorom s vektorovým riadením a pracuje ako generátor momentu M_{m2} . Spolu s regulátorom polohy tanečníka zásobníka x REG2 plní funkciu polohového servomechanizmu na zabezpečenie želanéj polohy tanečníka x_2 . Časový diagram želanéj polohy tanečníka $x_2(t)$ je skoorinovaný s časovým priebehom navíjania $y_2(t)$ tak, aby rýchlosť odvíjania $v_2(t)$ zodpovedala požadovanému diagramu, napríklad aby bola konštantná.

Programy nadradeného riadenia sú zostavené tak, aby sa v nich zohľadnila dynamika mechanických častí. Pri tvorbe algoritmov programového riadenia sa vychádzalo z metódy vypočítaných momentov. Nadradený systém programového riadenia generuje želané časové priebehy dĺžky navinutého drôtu $y_2(t)$, polohy tanečníka $x_2(t)$, ktoré sú vstupnými riadiacimi veličinami servomechanizmov. Nadradený systém obsahuje tiež inverzný model dy-



Obr.10 Bloková schéma modelu výrobnej linky s regulačnými obvodmi a s nadradeným programovým riadením

namiky mechanických častí, ktorý generuje program – časový diagram želaných hodnôt momentov motorov M_{m1z} a M_{m2z} a časový diagram sily pohonu tanečníka F_z . Realizácia týchto programov by mala v ideálnom prípade sama o sebe zabezpečiť realizáciu želaných časových priebehov dĺžky navinutého drôtu na navíjačke, polohy tanečníka a predpísaného ťahu v drôte pri odvíjaní a navíjaní v dynamických režimoch. Želané hodnoty momentov generované inverzným modelom dynamiky mechanických častí sú privádzané priamo na regulátory momentov motorov, ktoré sú súčasťou ich vektorového riadenia. Regulátory polohy v servomechanizmoch v takom prípade vyrovnávajú len nepresnosti realizácie programov riadenia momentov motorov.

Pri použití kombinovanom spôsobe programového riadenia sú programy navíjania a odvíjania v ideálnom prípade realizované presne, bez dynamických regulačných odchýlok. Výsledky simulácie sú zhodné s tými, ktoré boli získané na inverznom modeli dynamiky mechanických častí. Zostavený simulačný model umožňuje skúmať samostatne aj vplyv zotrvačných vlastností regulačných obvodov, keď v nadradenom systéme programového riadenia nie je použitý inverzný model, a optimalizovať pomocou simulačného experimentu návrh parametrov regulátorov v pohybovom systéme s interakciami.

Záver

V článku bol prezentovaný postup analýzy a syntézy mechatronického systému z hľadiska kinematiky a dynamiky procesov a ich riadenia. Použitý postup návrhu mechatronického systému s využitím inverzných modelov dynamiky mechanických častí a počítačového simulačného experimentu urýchlil analýzu procesov a dynamických vlastností rôznych variantov technologickej linky na výrobu pätkových lán automobilových plášťov. Umožňuje výber najvhodnejšieho variantu pre konkrétny typ výrobku, požadovaný výkon linky, technické, prevádzkové a ekonomické požiadavky používateľa.

Výsledky získavané simulačným experimentom poslúžili na optimalizáciu konštrukčných riešení jednotlivých častí linky, návrh pohonov, zabezpečenie optimálnych energetických interakcií v mnohoosovom pohybovom systéme a funkčnej a výkonovej kompatibility subsystémov. Samotná analýza kinematiky a dynamiky mechanických častí a pohonov vychádzala z požiadavky realizovateľnosti procesov po energetickej stránke aj z hľadiska možnosti regulačných obvodov a riadiacich systémov. Opísaný

postup analýzy a syntézy sa osvedčil ako metóda na dosiahnutie synergického efektu pri mechatronickom návrhu konkrétnych typov priemyselných výrobných liniek.

Literatúra

- [1] BRADLEY, D. A., DAVSON, D., BURD, N. C., LOADER, A. J.: Mechatronics: electronics in products and processes. Chapman&Hall, London 1991, ISBN 0-412-58290-2.
- [2] STADLER, W.: Analytical robotics and mechatronics, McGraw-Hill, Inc. New York 1995 ISBN 0-07-060608-0.
- [3] KRUT'KO, P. D.: Obratnyje zadači dinamiki upravljajemych system. NAUKA, Moskva, 1987, ISBN.
- [4] KALAŠ, V., JURIŠICA, L., FILKA, M.: Invariantná rýchlo-navíjačka fólií. AT&P journal, 1999, No 9. http://www.atpjournals.sk/casopisy/atp_99/atp9/kalas.htm.
- [5] Bartell – machinery systems, L.L.C.: Tire bead winding systems, 2005, <http://www.bartellmachinery.com/products.htm>

prof. Ing. Michal Boršč, CSc.
Ing. Ján Štefula, CSc.

Trenčianska univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne
Fakulta mechatroniky
Katedra kybernetiky
Študentská 2, 911 50 Trenčín
Tel.: 032/741 75 44, 0904 68 99 03
Fax: 032/741 75 15
e-mail: borsc@tnuni.sk
stefula@tnuni.sk

Ing. Vladimír Slivka
Ing. Luboslav Tomek

VIPO, a. s., Partizánske
Gen. Svobodu 1069, 958 01 Partizánske
Tel.: 038/749 33 60
Fax: 038/749 32 14
e-mail: vslivka@vipo.sk
ltomek@vipo.sk