

Návrh nelineárního modelu 3D portálového jeřábu

Michal Pála

FS ČVUT

Přístrojová a řídicí technika

Praha, Česká republika

michal.pala@fs.cvut.cz

Abstrakt—Používání jeřábů v oblastech logistiky je dnes častým řešením přemísťování těžkých nákladů. Značnou nevýhodou jejich používání je přirozený kyv břemene, ke kterému při pohybu dochází. To mimo jiné prodlužuje časovou náročnost procesu či zvyšuje rizika nebezpečí. Tomu lze předejít navržením vhodného řídicího systému. Díky přibližné představě o chování, kterou nám matematické modely poskytují jsme schopni tyto řídicí systémy navrhnout bez použití reálné soustavy a až poté je aplikovat. Tím pak můžeme zamezit případným komplikacím v praxi. Článek je zaměřen na návrh nelineárního modelu portálového jeřábu pomocí Lagrangeových rovnic II. druhu. V závěru je chování modelu porovnáváno se skutečnou soustavou zn. INTECO.

Index Terms—portálový jeřáb, modelování, nelineární model, lagrange

I. ÚVOD

Jeřáby jsou dnes hojně používány k přemísťování velkých a těžkých nákladů v oblastech průmyslu a logistiky. Toto řešení s sebou ale nese rizika spojené s přirozeným kyvem těchto břemen při jejich přemísťování. Eliminací těchto kyvů můžeme dosáhnout větší bezpečnosti a efektivitě při práci s jeřáby. K tomu je potřeba mít na jeřábu vhodný řídicí systém, který se v dnešní době navrhuje s pomocí matematických modelů.

Díky přibližné představě o chování, kterou nám matematické modely poskytují jsme schopni tyto řídicí systémy navrhnout bez použití reálné soustavy a až poté je aplikovat. Tím se můžeme vyhnout zbytečným experimentům a předejít problémům v praxi. Matematické modely se tvoří na základě znalostí z fyziky a matematiky. Cílem je získat dynamiku nezávislých proměnných (druhé derivace) z hlediska působení vnějších sil. Ty jsou v tomto článku získány metodou Lagrangeových rovnic II. druhu. Z druhých derivací lze následně získat první derivace a poté samotné nezávislé proměnné. Spolu s vstupními parametry a počátečními podmínkami lze model odsimulovat a porovnávat s reálnou soustavou. Vstupní parametry je potřeba nějak získat (změřit, zvážit, vypočítat, atd.). Počáteční podmínky si můžeme určit.

S vyjádřenými druhými derivacemi nezávislých proměnných lze také získat lineární model pomocí stavového popisu (state space), díky němuž lze navrhnout řízení, např. stavové regulátory nebo tvarovače signálu (tzv. input shaping) sloužící k rozdělení vstupního signálu na více částí a tím eliminovat část kyvu – již není obsahem této práce.

Z hlediska řízení se soustava portálového jeřábu označuje jako silně nelineární systém typu MIMO (Multiple Input and

Multiple Output). V této práci je mezi vstupy zavedeno napětí ve směru u_x a u_y . Výstupem ze soustavy je poloha ve směru x a y včetně úhlů kyvu břemene α a β . Navíjení lana je zanebráno (vstup u_z nevyužit) a jeho délka je fixní.

Článek je zaměřen na návrh nelineárního modelu portálového jeřábu, popis zjištění jeho parametrů a následné porovnání chování s reálnou soustavou portálového jeřábu (INTECO).

Této úloze se již věnovalo více lidí předemnou. V práci [2] z Malajsie vytvořili obdobný model 3D portálového jeřábu, jako je model v tomto článku. Ve schématu mají rozdílně zakótované nezávislé úhly. Uvažují kinetickou energii nákladu včetně její rotace. Při mém pokusu o odsimulování nelineárního modelu s použitím stejných rovnic z [2] se model nechoval správně. Například při akčním zásahu F_x bychom čekali, že úhel θ se bude kývat (fungovalo správně) a že úhel ϕ dosáhne hodnoty 90° , což z počátečních podmínek 0° nedosáhl.

V práci [1] z talinské univerzity mají stejný laboratorní model jeřábu od výrobce INTECO. Využil jsem tedy citovaný článek k získání některých parametrů (viz. kapitola V). Úhly α a β jsou v této práci stejně zakótovány jako zde, jen jsou prohozeny. Potenciální energii mají definovanou jako $P = mgl$, což je zvláštní, protože se nemění v závislosti na úhlech α a β . Model tvoří také skrze Lagrangeovy rovnice II. druhu s pěti nezávislými proměnnými (uvažují i proměnnou délku lana L) a třetím vstupem (motor ovládající délku lana L). Na jejich práci navazoval návrh řízení pomocí Fuzzy regulátoru.

Kapitola I je samotný úvod. Kapitola II se zabývá popisem reálné soustavy jeřábu od polského výrobce INTECO. III. kapitola je zaměřena na popis a vysvětlení funkčnosti portálového jeřábu s pomocí zjednodušeného schématu, ze kterého se později určují první rovnice k vytvoření nelineárního modelu (kapitola IV). Kapitola V pojednává o parametrech modelu, které jsou nutné k odsimulování modelu a zjištění jeho chování v čase. V kapitole VI je chování modelu porovnáváno se skutečnou laboratorní soustavou. Z závěrečné kapitole VII je stručné shrnutí výsledků této práce.

II. POPIS PORTÁLOVÉHO JEŘÁBU INTECO

Skutečná soustava jeřábu, která je pro tuto úlohu k dispozici je 3D portálový jeřáb od polské firmy INTECO.

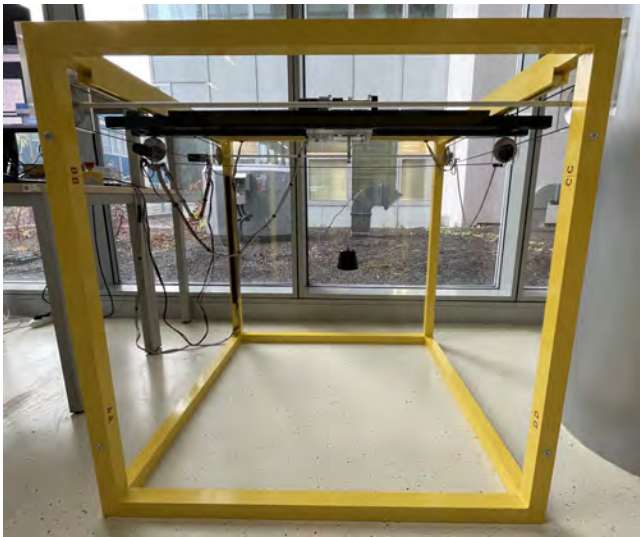
Jedná se o silně nelineární MIMO (Multiple Input and Multiple Output) elektromechanický systém. Jeho rozměry jsou $1 \times 1 \times 1 \text{ m}$.

Pohyby jsou zajištěny DC motory ve směru x , y a z . Ty jsou ovládány pomocí PWM (Pulse Width Modulation), čili v rozmezí hodnot od -1 až 1 .

Jeřáb je osazen pěti enkodéry, díky kterým lze zjistit polohy ve směru x , y , délku lana L , úhel ve směru osy x (značeno jako α) a úhel ve směru osy y (značeno jako β).

V rámci této práce není pohyb do směru z používán. Délka lana je zafixována.

Jeřáb je ovládán skrze počítač s prostředím Matlab Simulink.



Obrázek 1. Portálový jeřáb INTECO

III. SCHÉMA MODELU PORTÁLOVÉHO JEŘÁBU

Na obrázku Obr. 2 lze vidět zjednodušené schéma portálového jeřábu. Jeřáb se skládá s kolejnice (pohybující se ve směru x), jeřábové kočky (pohybující se ve směru x a y) a zavěšeného nákladu (pohybující se do směru x , y i z).

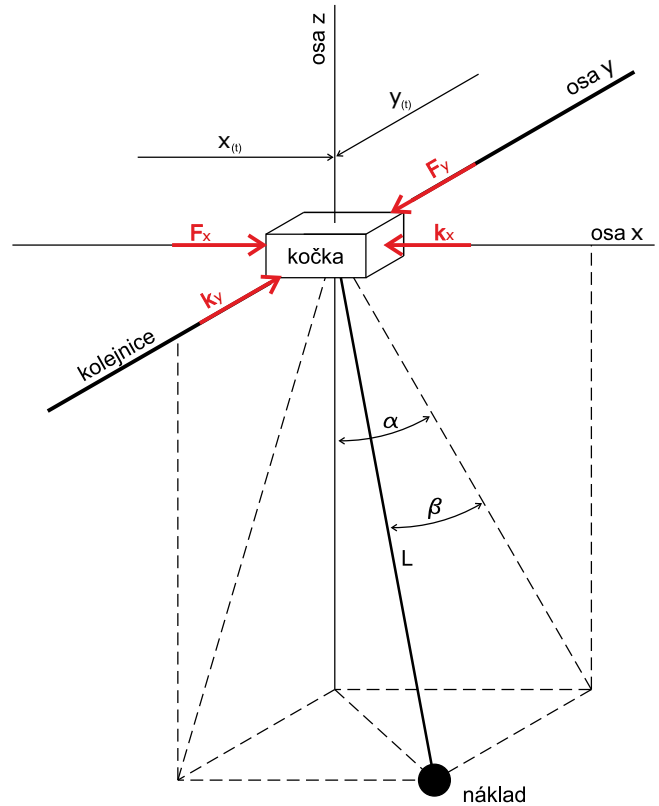
Vstupem do soustavy je napětí u_x (ve směru x) a napětí u_y (ve směru y). Napětí vstupující do soustavy je v pozdější fázi přepočítáváno na sílu F_x (ve směru x) a sílu F_y (ve směru y). Pro přepočet musí být experimentálně zjištěny koeficienty k_{ux} a k_{uy} .

Výstupem ze soustavy je poloha ve směru x , poloha ve směru y , úhel α (úhel mezi průmětem lana do roviny xz a osou z), úhel β (mezi lanem a průmětem lana do roviny xz).

Úhel β je ve skutečnosti měřen jako úhel od osy y . Pro zjednodušení při tvorbě modelu byl zaveden jako na obr. 2 (zaveden jako úhel mezi lanem a průmětem lana do roviny xz). Chyby, ke kterým s touto úpravou dochází jsou v blízkosti dolní úvratě zanedbatelné.

A. Nezávislé souřadnice

Nezávislé souřadnice jsou sepsány v tabulce tab. I. Mezi nezávislé souřadnice patří poloha kolejnice či kočky ve směru



Obrázek 2. Schéma portálového jeřábu

x , poloha kočky ve směru y a vychýlení úhlů α a β . Tyto souřadnice budou výstupem z nelineárního modelu.

Tabulka I
NEZÁVISLÉ SOUŘADNICE

Označení	Popis
x	poloha kolejnice a kočky ve směru x
y	poloha kočky ve směru y
α	úhel mezi průmětem lana do roviny xz a osou z
β	úhel mezi lanem a průmětem lana do roviny xz

IV. MODELOVÁNÍ

A. Poloha kolejnice, jeřábové kočky a závaží

Poloha kolejnice p_r (1), poloha kočky p_c (2) a poloha závaží p_p (3) jsou dány:

$$p_r = \begin{pmatrix} x(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$p_c = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$p_p = \begin{pmatrix} x(t) + L \cdot \sin(\alpha(t)) \cdot \cos(\beta(t)) \\ y(t) + L \cdot \sin(\beta(t)) \\ -L \cdot \cos(\alpha(t)) \cdot \cos(\beta(t)) \end{pmatrix} \quad (3)$$

B. Kinetická energie

Energie kolejnice K_r (4) je dána vztahem

$$K_r = \frac{1}{2} \cdot m_r \cdot \dot{p}_r^2 \quad (4)$$

Energie kočky K_c (5) je dána vztahem

$$K_c = \frac{1}{2} \cdot m_c \cdot \dot{p}_c^2 \quad (5)$$

Energie nákladu K_p (6) je dána vztahem

$$K_p = \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot \dot{p}_p^2 \quad (6)$$

Sečtením rovnic (4), (5) a (6) získáváme celkovou kinetickou energii K (7)

$$K = K_r + K_c + K_p \quad (7)$$

C. Potenciální energie

Potenciální energie P (8) pro tento případ

$$P = -m_p \cdot g \cdot L \cdot \cos(\alpha(t)) \cdot \cos(\beta(t)) \quad (8)$$

D. Euler-Lagrange

Lagrangián (9) je definován jako rozdíl kinetické (7) a potenciální (8) energie

$$\mathcal{L} = K - P \quad (9)$$

Lagrangerova rovnice (10) [2] je dána vztahem

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_i, i = 1, 2, 3, 4 \quad (10)$$

kde q (11) je vektor nezávislých proměnných

$$q = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \alpha(t) \\ \beta(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

a vnější síly F (12) jsou (včetně tření)

$$F = \begin{pmatrix} F_x(t) - k_x \cdot \dot{x}(t) \\ F_y(t) - k_y \cdot \dot{y}(t) \\ -k_\alpha \cdot \dot{\alpha}(t) \\ -k_\beta \cdot \dot{\beta}(t) \end{pmatrix} \quad (12)$$

Po vypočtení Lagrangerovy rovnice (10) dostáváme druhou derivaci všech nezávislých proměnných (zrychlení), ze kterých je možné vytvořit nelineární model v prostředí Matlab Simulink. Výsledné vyjádření proměnné nejsou přidány do tohoto textu, protože jsou příliš dlouhé.

V. PARAMETRY

Aby bylo možné model odsimulovat, je do něj potřeba znát všechny potřebné parametry. Parametry jsou k vidění v tab. II

Hmotnost nákladu (závaží) m_p jsem zvažil. Hmotnost kočky m_c a hmotnost kolejnice m_r jsou převzaty z [1], kde je použit identický laboratorní model jeřábu a nebylo kvůli tomu nutné jeřáb rozebírat na části.

Tření v čepu k_α a k_β bylo zanedbáno, protože v pozdějších fázích zjišťování parametrů tlumily kyv nákladu více, než bylo třeba. Toto tření je dohnáno skrze parametry k_x a k_y , skrze které dochází k tření při pohybu vozíku a tím i k tlumení kyvadla.

Přepočty k_{ux} a k_{uy} sloužící na převod napětí (F_x , F_y) na sílu (u_x , u_y) byly zjištěno experimentálně tak, aby se shodovaly směrnice a nájezd polohy ve směrech x a y (k vidění na obr. 3).

Hmotnost lana je zanedbána.

Všechny tyto parametry jsou použity jako vstup do nelineárního modelu.

Tabulka II
PARAMETRY MODELU

Ozn.	Popis
m_c	hmotnost kočky $m_c = 1,16$ kg, převzato z [1]
m_r	hmotnost kolejnice $m_r = 2,2$ kg, převzato z [1]
m_p	hmotnost nákladu $m_p = 0,58$ kg, zváženo
L	Délka lana $L = 0,413$ m, změřeno
g	gravitační zrychlení $g = 9,81$ m ² /s
k_α	tření v čepu $k_\alpha = 0$ [-], zanedbáno
k_β	tření v čepu $k_\beta = 0$ [-], zanedbáno
k_x	tření $k_x = 31$ [-], odhadnuto
k_y	tření $k_y = 26,5$ [-], odhadnuto
k_{ux}	přepočet napětí na sílu $k_{ux} = 13,15$ [-], odhadnuto
k_{uy}	přepočet napětí na sílu $k_{uy} = 12,48$ [-], odhadnuto

VI. POROVNÁNÍ NELINEÁRNÍHO MODELU S JEŘÁBEM INTECO

Pro porovnání bylo potřeba odhadnout parametry k_x a k_y spolu s přepočtem napětí na sílu u_x , u_y . Toho jsem docílil tak, aby seděly směrnice průběhů polohy x a y , viz. obr. 3 a obr. 4. Tření bylo zafixováno a hodnoty napětí byly zjištěny pro zásahy u_x , u_y od 0,2 do 1 (po 0,2). Výsledné hodnoty napětí u_x a u_y byly zjištěny zprůměrováním experimentálně zjištěných hodnot, viz Tab. II.

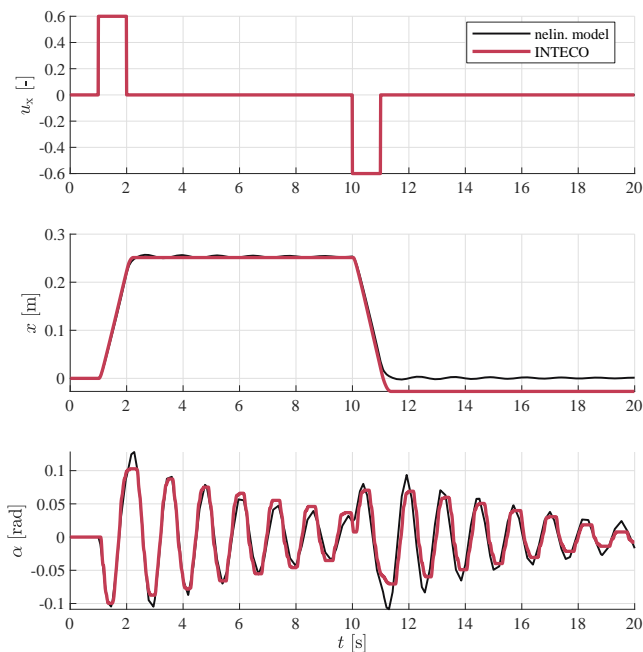
Pro měření odezvy byl použit kladný skok v čase $t = 1$ s a záporný skok v čase $t = 10$ s o velikosti u_x , $u_y = 0,6$. Měření byla prováděna pro každý směr zvlášť. Jejich odezvy lze vidět na obr. 3 (pro směr x) a na obr. 4 (pro směr y).

Na obr. 3 lze vidět odezvu nelineárního modelu a jeřábu na vstupní napětí $u_x = 0,6$. Průběhy nelineárního modelu a jeřábu jsou velmi podobné. Cestou zpět kolejnice ujede více, než dopředu. Mohlo by to být dáno svazkem kabelů, který je ke kolejnici připevněn. Do kladného směru ho kolejnice tahá, do záporného vrací zpět.

Na obr. 4 lze vidět odezvu nelineárního modelu a jeřábu na vstupní napětí u_y . Zde se průběhy po kladném zásahu

příliš neliší, avšak při pohybu zpět se nelineární model odchýlí od reálné soustavy. Myslím si, že je to dáno tím, že v momentu zásahu záporným napětím bylo kyvadlo na nelineárním modelu více utlumené oproti jeřábu a proto zde došlo k větší změně kyvu a tím k lehkému narušení průběhu. Jelikož se shoduje první zásah obou soustav, považuji výsledek za přívětivý.

Jelikož se první kyvy skvěle shodují u nelineárního modelu i u reálné soustavy, bude tento model vhodný na budoucí návrhy řízení.



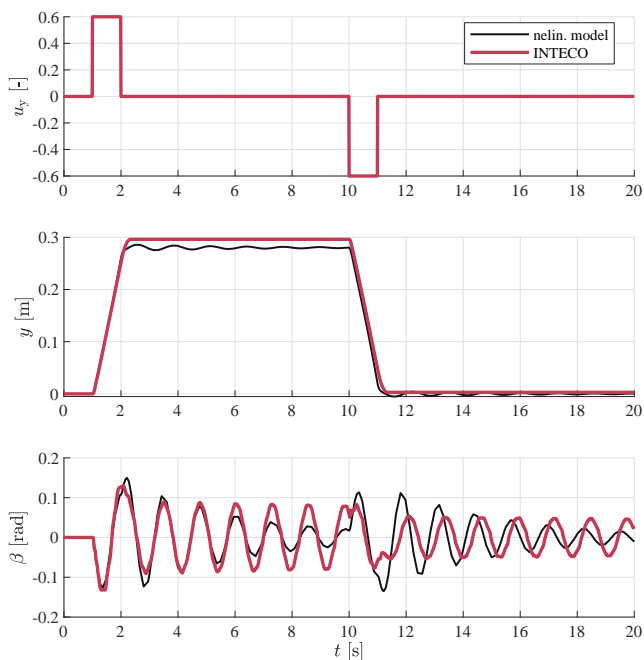
Obrázek 3. Porovnání odezvy nelineárního modelu a jeřábu INTECO ve směru při zásahu $u_x = 0,6$

VII. ZÁVĚR

Udělal jsem nelineární model pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu. Pro model byly zjištěny všechny potřebné parametry. Výsledkem práce bylo porovnání chování navrženého nelineárního modelu s jeřábem INTECO. Pro směr x se modely shodují skvěle. Pro směr y se nepodařilo parametry navrhnout tak dobře jako pro směr x . Kvůli tomu je kyvadlo více tlumeno oproti skutečné soustavě a ve chvíli zásahu v záporném směru dochází k menší nepřesnosti na výstupu z modelu. Pro budoucí navrhování řízení nás zajímá hlavně průběh prvních několika vteřin, proto bude nelineární model dostačující pro další aplikace s ním spojené. Všechny cíle práce byly splněny.

REFERENCE

- [1] AKSJONOV, Andrei, Valery VODOVOZOV a Eduard PETLENKOV. Three-Dimensional Crane Modelling and Control Using Euler-Lagrange State-Space Approach and Anti-Swing Fuzzy Logic. *Electrical, Control and Communication Engineering* [online]. 2015, 9(1), 5-13 [cit. 2020-11-07]. ISSN 2255-9159. Dostupné z: doi:10.1515/ecce-2015-0006



Obrázek 4. Porovnání odezvy nelineárního modelu a jeřábu INTECO ve směru při zásahu $u_y = 0,6$

- [2] ISMAIL, R.M.T. Raja, M.A. AHMAD, M.S. RAMLI a F.R.M. RASHIDI. *Nonlinear Dynamic Modelling and Analysis of a 3-D Overhead Gantry Crane System with System Parameters Variation* [online]. Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Pekan, 26600, Pahang, Malaysia, , 8 [cit. 2021-01-04]. ISSN 1473-804x. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/159178801.pdf>

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS SGS20/159/OHK2/3T/12.



Selected article from

Tento dokument byl publikován ve sborníku

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové
techniky, automatického řízení a informatiky 2021
New Methods and Practices in the Instrumentation,
Automatic Control and Informatics 2021
15. 9. – 17. 9. 2021, Žatec**

ISBN 978-80-01-06889-2

Web page of the original document:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2021.pdf>

Obsah čísla/individual articles:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2021/>

Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6