

Egyoszlopos raktári felrakógépek oszloplengéseinek csökkentése korszerű irányításelméleti módszerek alkalmazásával

Tézisfüzet

Hajdu Sándor



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

Témavezető

Dr. Gáspár Péter

Magyar Tudományos Akadémia
Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet
Rendszer és Irányításelméleti Kutatólaboratórium

2016

Original English language title

**Mast Vibration Reduction of Single-mast Stacker
Cranes via Modern Control Methods**

Thesis by:
Sándor Hajdu

2016

1. Motiváció

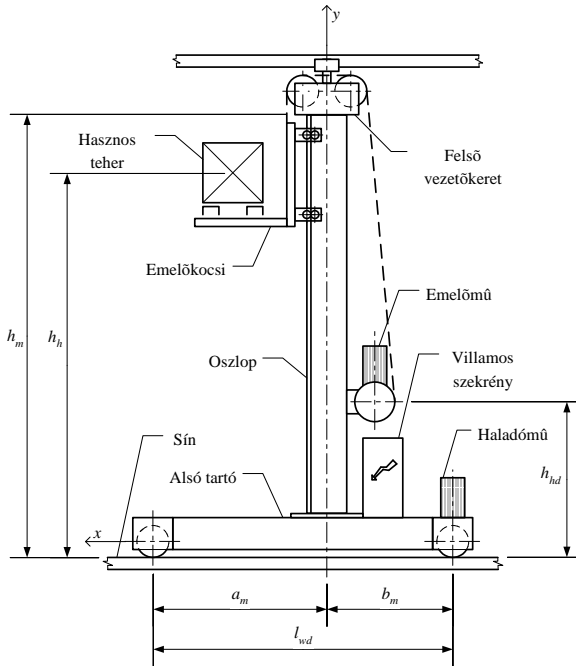
Az 1970-es évektől kezdve a raktározásban használt technikák és technológiák jelentős fejlődésen mentek keresztül. A kézi erőt igénylő anyagmozgatási megoldások illetve a manuális irányítású berendezések mellett megjelentek a teljesen gépesített és magas szinten automatizált anyagmozgató rendszerek is. A egyik jellegzetes fejlesztési irányt a magasraktárak és speciális állványkiszolgáló berendezéseik, a magasraktári felrakógépek megjelenése képviselte. Rohamos terjedésüket elsősorban az emelkedő telekáraknak és a raktározni kívánt anyagmennyiség növekedésének köszönhetik. Ezek a rendszerek ugyanis alkalmasak nagy mennyiségű áru kis alapterületen való tárolására. A magasraktározási rendszerek kialakításáról, technikai alrendszeiről és kiszolgálógépeiről az [1], [2] irodalmakban részletes ismertető található. A raktári felrakógépek csoportosítását, jellemző szerkezeti kialakításait valamint részegységeit a [3] és [4] disszertációk bevezető fejezetei részletesen bemutatják, a velük kapcsolatos alapvető definíciókat, terminológiát az [5], [6] szabványok foglalják össze. További átfogó képet kaphatunk a korszerű magasraktári felrakógépek kialakításáról, rendszereikről és technológiai paramétereikről az alábbi termékkatalógusok segítségével: [7], [8], [9], [10].

Napjaink korszerű, önhordó szerkezetű magasraktárainak magassága elérheti a 40–50 m-t is. Ezekben a magasraktárakban teljesen automatizált, a nagy árumennyiség gyors be- és kitárolását lehetővé tévő felrakógépek üzemelnek. A rövid anyagmozgatási ciklusidők eléréséhez nagy anyagmozgatási teljesítmény szükséges. Az alkalmazott magasraktári felrakógépeket tehát az egyre növekvő szerkezeti magasság mellett mind nagyobb működési sebességek és gyorsulások jellemzik. További követelményként jelentkezik a gazdaságos anyagmozgatás igénye is, mely a felrakógép önsúlyának csökkentésére, a hasznos emelt teher/össztömeg arány javítására ösztönzi a felrakógépek tervezőit.

Az ideális felrakógép tehát nagy emelési magasságú és teherbírású, gyors működésű ugyanakkor kis saját tömegű. Azonban a saját tömeg csökkentése együtt jár a tartószerkezet keresztmetszeti méreteinek, végeredményben a merevségének a csökkenésével. Mindeközben a berendezés tartószerkezetére egyre nagyobb tehetetlenségi erők hatnak a megnövekedett gyorsulások miatt. A nagy magasságú és kevésbé merev tartószerkezet a dinamikai hatásokkal szemben érzékenyebb, a felrakógép működése során a különböző gerjesztő hatások eredményeként az oszlopszerkezetben nem kívánt lengések keletkezhetnek. Ezen lengések a szerkezet stabilitásának, pozícióba állási pontosságának romlását, szélsőséges esetben a tartószerkezet károsodását eredményezhetik. A lengések további hátrányos következménye az anyagmozgatási ciklusidő növekedése, hiszen az anyagkezelő mozgások (pl. teleszkópos villaszerkezet kitolása) megkezdésével meg kell

várni a lengések lecsillapodását.

Kutatásom célja az ismertett lengések vizsgálata és csökkentési módszereinek elemzése. A gyakorlatban a vázszerkezetnek két alapvető kialakítása terjedt el: az úgynevezett egyoszlopos és kétoszlopos kivitel. Vizsgálataimban az egyoszlopos kivitelre szorítkozok (lásd 1. ábra), hiszen ez a kialakítás érzékenyebb a dinamikai hatásokra. Munkám során a felrakógép tartószerkezet haladás irányú lengéseivel foglalkozom, hiszen ebben az irányban nagyságrendileg nagyobb lengések keletkeznek, mint a másik két irányban.



1. ábra. Egyoszlopos raktári felrakógép

A nem kívánt oszloplengések csökkentését, valamint a felrakógép pozícionálási pontosságának javítását különböző irányításméleti módszerek alkalmazásával is el lehet érni. Ennek érdekében azonban először a felrakógép dinamikai modellezését kell elvégezni. A modellezés során figyelni kell arra, hogy a dinamikai modell kellőképpen pontosan leírja a valós szerkezet dinamikai viselkedését, emellett pedig alkalmas is legyen a vizsgált irányításméleti módszerek megvalósítására. A magasraktári felrakógépek vázszerkezetének dinamikai modellezésére az elosztott paraméte-

rű, kontinuum-gerenda modellek [11, 12], a különböző végeelem modellek [13, 14] valamint a merev testeket, rugalmas- és csillapító elemeket tartalmazó többtest modellek (ún. multi-body modellek, [15, 16]) egyaránt alkalmasnak ígérkeznek. Ezen modellek összehasonlítása révén lehetséges a feladatra leginkább alkalmas modellezési eljárás kiválasztása. A dinamikai modellezés során különösen figyelemmel kell lenni arra a tényre, hogy a felrakógép vázszerkezetének dinamikai tulajdonságai az emelt teher nagyságától és pozíciójától is függenek. Emiatt egy egyszerű lineáris dinamikai modell nem képes leírni a szerkezet dinamikai viselkedését a teljes emelési magasság- és terheléstartományban. A választott modellezési eljárásnak a szerkezet ezen tulajdonságát is figyelembe kell vennie.

Az irányításméleti módszerek alkalmazásához, a különböző szabályozók megtervezéséhez szükség van továbbá a szerkezet irányítási célú modellezésére is. Ez a fajta modellezési megközelítés az előző bekezdésben említett (dinamikai analízisekre inkább alkalmas) modellekhez képest másféle megfontolásokat igényel. A napjainkban használatos korszerű szabályozótervezési módszerek, numerikus eljárások összetettsége miatt csak viszonylag alacsony szabadságfokú modellek használhatók. Emiatt szükség lehet valamilyen modellredukciós eljárás alkalmazására az irányítási célú modellezés során. A megvalósított szabályozókkal szemben támasztott minőségi jellemzőket (ún. performanciákat) is ebben a modellezési lépésben kell definiálni. A célkitűzéseknek megfelelő két alapvető minőségi jellemző a jó referenciajel követés és a kialakuló oszloplengések csillapítása. További minőségi jellemzők lehetnek a szabályozótervezés során a különféle szenzor zajok hatásainak csökkentése valamint a túlságosan nagy szabályozó jelek megelőzése a beavatkozó elemeknél fellépő nem kívánt hiszterézis jelenségek elkerülése érdekében. Az irányítási célú modellezésben a korábban említett, a dinamikai tulajdonságoknak a tehernagyságtól és pozíciótól való függését is figyelembe kell venni. Erre kétféle lehetőség kínálkozik. Az első esetben a terhelés változásainak hatása struktúrálatlan modellbizonytalanság (lásd például [17]) segítségével van figyelembe véve. A második modellezési megközelítés azon alapul, hogy az emelt teher nagysága és helyzete mérhető, így lehetséges az emelt teher nagyságával és/vagy magasságával parametrizált, formailag lineáris modell létrehozása. Ezen, úgynevezett lineáris, paraméter-változós (LPV) modell (lásd pl. [18, 19]) segítségével a felrakógép tulajdonságai pontosabban leírhatók.

A különböző szabályozók tervezése során arra törekszek, hogy az irányításméleti kutatások legújabb eredményei kerüljenek vizsgálatra, melyek segítségével lehetővé válik a minőségi jellemzőknek való megfelelés. Az egyik lehetséges vizsgálati irány a robusztus szabályozók alkalmazása [17, 20]. Az ilyen típusú szabályozók esetében a minőségi jellemzők és a modellbizonytalanságok speciális súlyozófüggvények segítségével adhatók meg.

A szabályozótervezés során a szabályozandó rendszer dinamikai modellje a fent említett súlyozó függvényekkel van kiegészítve, így egy úgynevezett kibővített modell (általánosított rendszerstruktúra) kerül meghatározásra. A kibővített modellben a performanciáknak megfelelően speciális be- és kimeneteket (ún. w zavarás és z irányított kimenet) tudunk definiálni. A robusztus \mathcal{H}_∞ szabályozótervezés (lásd pl. [21]) célja a zárt rendszer $w \rightarrow z$ átviteli függvénye \mathcal{H}_∞ normájának (erősítésének) a minimalizálása. A súlyozófüggvények paramétereinek változtatásával jó kompromisszum érhető el az egymásnak ellentmondó minőségi jellemzők között, biztosítható a szabályozott rendszer modell-bizonytalanságok melletti (robusztus) stabilitása valamint a minőségi jellemzőkkel szembeni robusztusság is.

A következő lehetséges vizsgálati irány az úgynevezett ütemezett szabályozók alkalmazása, melyek alapvető célja a nemlineáris rendszerek szabályozása. A hagyományos ütemezett szabályozók tervezése a nemlineáris rendszerek lokális linearizációján alapul, így a lineáris rendszerekre kifejlesztett módszerek alkalmazhatók maradnak. A nemlineáris rendszer szabályozója a lokálisan előállított szabályozókból valamilyen interpolációs, vagy a szabályozók közötti átkapcsolási eljárás segítségével állítható elő. A vizsgált felrakógép esetében nincs szükség a linearizációra, a rögzített terhelési esetekre érvényes lokális modellek az ismerttetett modellezési eljárásokkal egyszerűen előállíthatók. Sajnos ez a tervezési eljárás csak lokálisan garantálja a szabályozott rendszer performanciáját és robusztusságát. Az LPV modellezésen alapuló ütemezett szabályozók (LPV szabályozók, lásd [22, 23, 24]) segítségével azonban a teljes megengedett paramétertartományban garantálható a rendszer performanciája. A vizsgált felrakógép oszloplengéseinek csökkentésére egy politopikus LPV modellen alapuló szabályozót alkalmazok [22], amely a zárt rendszer átviteli függvényének indukált \mathcal{L}_2 normáját csökkenti egy előre definiált performancia érték alá. Ez a tervezési eljárás a lineáris rendszerek \mathcal{H}_∞ eljárásának a kiterjesztése LPV rendszerekre. A bemutatott szabályozási eljárások segítségével áthidalhatók az emelt teher nagyságának vagy pozíciójának változásából adódó problémák.

2. Tudományos eredmények

1. tézis

Elvégeztem az egyoszlopos magasraktári felrakógép nagy pontosságú szimulációs célú dinamikai modellezését. Ezen belül háromféle modell típust dolgoztam ki: elosztott paraméterű (kontinuum) gerenda modell, végeelem modell, lineáris többtest (multi-body) modell. A modellek frekvencia tartománybeli tulajdonságainak (frekvencia-átviteli függvényeinek) összehasonlításával a további analízis és szintézis feladatok alapjául szolgáló egymással validált dinamikai modellek rendelkezésre állnak.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [Haj08], [HT09], [HK10], [HK11], [HG13a], [HG14a], [HG14b], [HG16a], [KH04a], [KH04b], [KH05], [KH09], [KH10], [KH11], [K⁺11]

- A kontinuum gerenda modell vizsgálata során a közvetítő mátrixok módszerét alkalmaztam a felrakógép szerkezetének elágazásos tartójára. Ennek segítségével meghatároztam a tartószerkezet lengéseinek sajátkörfrekvenciáit, a lengéseképeket (módusokat) leíró függvények paramétereit valamint a vonóerő és az oszlop tetejének elmozdulása között értelmezett $G_c(i\omega)$ frekvencia-átviteli függvényt.
- A felrakógépek haladásirányú oszloplengéseinek vizsgálatára egy egyszerű síkbeli lineáris többtest modellt javasoltam. Ez pontszerű tömegeket tartalmazó merev, egymáshoz rugalmas csuklókkal kapcsolódó elemekből épül fel, a csuklók rugalmasságáról spirálrugók gondoskodnak. A többtest modellezés során leveztettem a modell paramétereit (elemhosszak, koncentrált tömegek és rugómerevségek) valamint a kontinuum gerenda anyag- és keresztmetszeti tulajdonságai közötti összefüggéseket.
- A további analízis és szintézis feladatokban alkalmazott dinamikai modell kiválasztása és validálása a kontinuum gerenda modell, egy egyszerű vonalelemekből összeállított síkbeli végeelem modell valamint a bemutatott többtest modell frekvenciatartományi tulajdonságainak az összehasonlításával történt. Ehhez először előállítottam a véges szabadságfokú (végelem és többtest) modellek frekvencia-átviteli függvényeit is. Ezeket $G_f(i\omega)$ és $G_m(i\omega)$ jelöli. Ezután a dinamikai modellek alábbi abszolút- és relatív eltérés függvényeket képeztem:

$$\Delta_{af}(\omega) = |G_c(i\omega) - G_f(i\omega)|, \quad \Delta_{am}(\omega) = |G_c(i\omega) - G_m(i\omega)|,$$
$$\Delta_{rf}(\omega) = \frac{|G_c(i\omega) - G_f(i\omega)|}{|G_c(i\omega)|}, \quad \Delta_{rm}(\omega) = \frac{|G_c(i\omega) - G_m(i\omega)|}{|G_c(i\omega)|}.$$

A fenti függvények vizsgálatából megállapítható, hogy a bemutatott modellek pontossága megfelelő, az abszolút- és relatív eltérések eléggé alacsonyak a lényeges frekvenciatartományban. A további feladatok végrehajtására bármelyik vizsgált modell alkalmazható, azonban az egyszerűsége és alacsony szabadságfok-száma miatt a többitest modell javasolt.

2. tézis

Kidolgoztam az egyoszlopos magasraktári felrakógép irányítási célú modellezési eljárását, melynek során a minőségi jellemzőkkel és a bizonytalanságokkal bővítettem a dinamikai modellt. Javaslatot tettem az emelt teher változó nagyságának és pozíciójának a modellezésben való figyelembe vételi módszereire is. Az eredményül kapott irányítási célú modellek alkalmasak a különféle szabályozási eljárások megvalósítására és vizsgálatára.

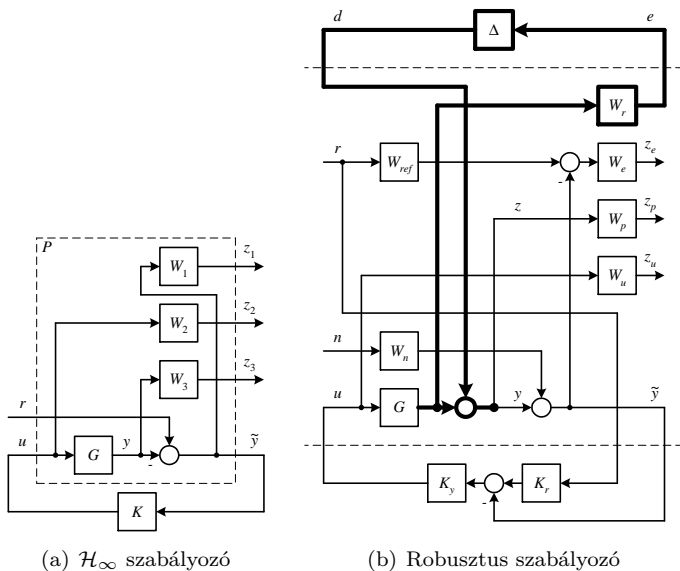
Tézishez kapcsolódó publikációk: [HG13b], [HG14c], [HG16a]

- Az irányítási célú modellezésben általam javasolt fő minőségi jellemzők a jó jelkövetés és a megfelelően csillapított oszloplengések. Ezek mellett a különféle szenzor zajok hatásainak csökkentésével valamint a túlságosan nagy szabályozó jelek korlátozásával tovább javíthatók a zárt rendszer tulajdonságai.
- A dinamikai modell jellemzői az emelt teher nagyságától és helyzetétől is függenek, ennek figyelembe vételére kétféle módszert javasoltam. Az első módszerben az emelt teher hatásait struktúrálatlan hibaként vettem figyelembe a modellezés során. Ehhez a kimeneten ható multiplikatív hibamodellt használtam, melynek W_m súlyozó függvényét egy változó terhelési viszonyokkal előállított modellsorozat vizsgálatának a segítségével határoztam meg.
- A második módszerben a teher pozíciójának mért értékeire támaszkodva politopikus LPV modellt konstruáltam. A paraméterterben értelmezett politóp csúcspontjait a megengedett emelési magasság tartomány végpontjai alkotják.
- Az eredményes szabályozó szintézis érdekében mindkét esetben elvégeztem a modellek redukcióját is, mely az LTI modellek modális redukciós eljárásán alapul. Az LPV modell esetében egy további transzformációra is szükség volt a modell állapotváltozói konzisztenciájának a megtartása érdekében.

3. tézis

Robusztus \mathcal{H}_∞ irányítást dolgoztam ki egyoszlopos magasraktári felrakógép lineáris időinvariáns modelljére, melynek célja a modellbizonytalanságok figyelembe vétele mellett a jó jelkövetés és az oszloplengések csillapításának biztosítása. Ennek során javaslatot tettem a \mathcal{H}_∞ tervezési paradigmához igazodó rendszer és bizonytalansági struktúrák megválasztására, valamint az alkalmazandó bizonytalanság és performancia súlyfüggvények paramétereinek megválasztására.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [HG13b], [HG14c]

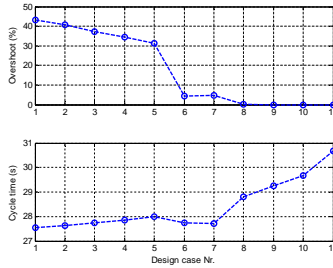


2. ábra. Általánosított rendszerstruktúrák

- A szabályozótervezés első lépéseként a megfelelő hurokátvitel elérése érdekében a névleges modell alapján hagyományos \mathcal{H}_∞ módszert alkalmaztam, lásd 2. (a) ábra. A módszer célja a szabályozott rendszer sáv szélességének megfelelő hangolása a zárt rendszer érzékenységi és kiegészítő érzékenységi függvényének W_1 és W_3 súlyozása segítségével. Ezzel a zárt rendszer minőségi jellemzői elemezhetők. Ebből a vizsgálatból megállapítható, hogy a szabályozási eltérések és az oszloplengések nagysága fordított arányban áll egymással.
- A tervezés második lépése a tényleges robusztus \mathcal{H}_∞ szabályozó tervezése. Ebben a bizonytalanságok is figyelembe vannak véve a W_r függvény

segítségével (2. (b) ábra). A tervezéshez használt általánosított rendszerstruktúrában W_{ref} reprezentálja a zárt rendszer ideális modelljét. Az ideális és a tényleges zárt rendszer átviteli függvényei közötti eltérés súlyozásáról a W_e súlyfüggvény gondoskodik. Az oszloplengések büntetése a W_p függvény segítségével történik. A szenzorajok figyelembe vételére a W_n , a szabályozó jelek korlátozására pedig a W_u függvények szolgálnak.

- A felrakógép mozgásának ciklusideje (jelkövetés) valamint a lengéscsillapítás közötti kompromisszum megkeresése a W_e és W_p súlyfüggvények paramétereinek változtatásával lehetséges. Ehhez a függvények sávszélességét és erősítését úgy változtattam, hogy a tervezési esetek a jó jelkövetést eredményező szabályozóktól a lengéseket erősebben csillapító szabályozók irányába haladjanak. Az eredményeket a 3. ábrán foglaltam össze.



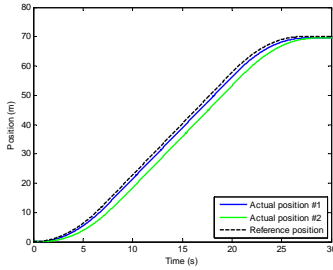
3. ábra. Az oszloplengés függvény túllövése és a ciklusidők

- A szabályozók tervezési eredményeit időtartománybeli analízisekkel, szimulációkkal igazoltam, lásd 4 ábra.

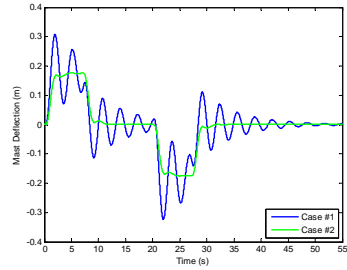
4. tézis

Robusztus LPV szabályozási módszert dolgoztam ki egyoszlopos magasraktári felrakógépekre. A módszer segítségével a jelkövetésre és a lengéscsillapításra megfogalmazott minőségi jellemzők az emelt teher pozíciójának széles tartományában biztosíthatók. Időtartományi vizsgálatokkal igazoltam, hogy a szabályozott rendszer pontos jelkövetési tulajdonságokkal és emellett jó oszloplengés csillapítással rendelkezik. Az időtartományi vizsgálatok eredményeit a \mathcal{H}_∞ irányítás eredményeivel összehasonlítva igazoltam, hogy a kedvező performanciák széles paramétertartományban érvényesek.

Tézishez kapcsolódó publikációk: [HG14c], [HG16b]



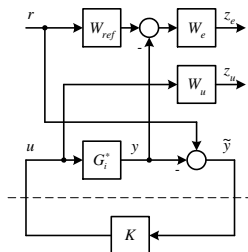
(a) Pozíció



(b) Oszloplengés

4. ábra. Robusztus szabályozó szimulációs eredményei

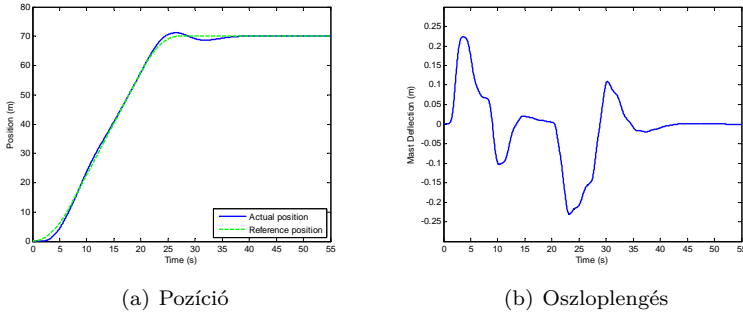
- Első lépésben hagyományos ütemezett szabályozót terveztem a lehetséges emelési magasság tartomány rögzített pontjaiban érvényes lokális dinamikai modellek segítségével. Az ütemezett szabályozót a lokális modellek érvényességi tartományainak határpontjaiban való, a lokálisan tervezett szabályozók közötti átkapcsolások segítségével hoztam létre. A tervezési eljárással az eredmények széles teherelmozdulás tartományra általánosíthatók.
- A következő lépésben LPV szabályozót terveztem, amely a politopikus LPV modellen alapul. Ez az eljárás a teljes lehetséges paraméter változási tartományon biztosítja a zárt rendszer stabilitását és minőségi jellemzőit. A tervezés során egyszerűsített kibővített modellt használtam (5. ábra), mely megkönnyíti a szabályozótervezést valamint csökkenti az eredményül kapott szabályozó konzervativizmusát.



5. ábra. Kibővített modell az LPV szabályozóhoz

- A szabályozók tervezési eredményeit időtartománybeli analízisekkel, szimulációkkal igazoltam (6. ábra). Az eredményeket elemezve megállá-

pítható, hogy a szabályozott rendszer pontos jelkövetési tulajdonságokkal és emellett jó oszloplengés csillapítással rendelkezik.



6. ábra. LPV szabályozó szimulációs eredményei

3. Az eredmények hasznosíthatósága

Az elért tudományos eredmények közvetlenül felhasználhatók a magasraktári felrakógépek irányítási rendszereinek elemeiként. Az eredmények segítségével növelhető a felrakógépekkel üzemelő automatizált magasraktárak anyagmozgatási teljesítőképessége, a berendezések kihasználtsága. A káros lengések csillapításával a berendezések terhelése csökkenthető, üzembiztonságuk fokozható. A kisebb mértékű lengések következtében a felrakógépek dinamikus igénybevételei csökkennek, ezáltal a szerkezetek méretezése során kisebb dinamikus tényező vehető figyelembe. Végeredményben egy kisebb önsúlyú, gazdaságosabban üzemeltethető berendezés tervezhető.

A dinamikai modellezés során kapott eredmények meglévő szerkezetek dinamikai vizsgálatára, esetleges problémáinak felderítésére valamint az új felrakógépek tervezése során, a tervezett szerkezet dinamikai tulajdonságainak megítélésére is felhasználhatók. A kidolgozott szabályozási eljárások ezenfelül egyéb olyan jellegű feladatokra is alkalmazhatók, ahol nagymértű, rugalmas szerkezet gyors és lengésmentes pozicionálására van szükség. Például konténerrakodó hidak vagy toronydaruk irányítására.

4. További kutatási irányok

A további kutatási irányok az alábbiak lehetnek.

- Nemlineáris szabályozók tervezése a paraméterváltozások hatásainak pontosabb figyelembe vételére. A felrakógép szerkezetében található esetleges további paraméterek, nemlineáris tulajdonságok, külső zavaró jelek számításba vétele.
- A beavatkozó elemek, aktuátorok dinamikájának figyelembe vétele a szabályozótervezés során. Ezek jellemzően váltakozó áramú szabályozott hajtások, melyek a szerkezet elemeinek mozgatásáról gondoskodnak. Mivel ezen elemek a szabályozási kör részét képezik, a tervezett szabályozók implementálása során lényeges szerepük lehet.
- További kutatási irányként jöhet szóba az elért eredmények kiterjesztése más típusú felrakógépekre, például két, vagy többoszlopos szerkezetekre valamint kisméretű rakományok nagy sebességű rakodására szolgáló ún. mini-load rendszerekre.

A tézisekhez kapcsolódó publikációk

- [Haj08] Sándor Hajdu. Mast vibration damping of shelf storage and retrieval machines. In *14th Building Services, Mechanical and Building Industry Days, Debrecen*, pages 235–240, 2008.
- [HG13a] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Egyoszlopos magasraktári felrakógépek többtestmodelljei. In *Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban Konferencia*, pages 509–518, Debrecen, 2013.
- [HG13b] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Investigation of the influence of lifted load on dynamical behavior of stacker cranes through unstructured uncertainties. In *CINTI 2013 : Proceeding of the 14th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics, Budapest: IEEE Hungary Section*, pages 179–184, 2013.
- [HG14a] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Distributed parameter modeling of single-mast stacker crane structures. *PERIODICA POLYTECHNICA: TRANSPORTATION ENGINEERING*, 42(1):1–9, 2014.
- [HG14b] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Finite element modeling of single-mast stacker cranes. *DEBRECENI MŰSZAKI KÖZLEMÉNYEK*, 13(1):55–70, 2014.
- [HG14c] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. From modeling to robust control design of single-mast stacker cranes. *Acta Polytechnica Hungarica*, 11(10):135–149, 2014.
- [HG16a] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Multi-body modeling of single-mast stacker cranes. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 8(3):218–226, 2016.
- [HG16b] Sándor Hajdu and Péter Gáspár. Reducing the mast vibration of single-mast stacker cranes by gain-scheduled control. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2016. (in press).
- [HK10] Sándor Hajdu and Béla Kulcsár. Dynamical analysis of storage and retrieval machine frames. In *16th Building Services, Mechanical and Building Industry Days, Debrecen*, pages 71–76, 2010.
- [HK11] Sándor Hajdu and Béla Kulcsár. Dynamical analysis of storage and retrieval machine frames. *INTERNATIONAL REVIEW OF APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING*, 2(1):51–55, 2011.

- [HT09] Sándor Hajdu and Zsolt Tiba. Introduction to dynamic modeling of rack stackers for high-bay warehouses. *ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI POZNANSKIEJ*, 1(10):15–23, 2009.
- [K⁺11] Béla Kulcsár et al. Egyoszlopos magasraktári felrakógépek vázszerkezetének igénybevételei. In *XVI. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konferencia = International Scientific Conference, Kolozsvár*, pages 169–172, 2011.
- [KH04a] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Dynamic modeling of transversal mast vibration of storage and retrieval machines. In *microCAD 2004, L Section: International Scientific Conference, Miskolc*, pages 71–76, 2004.
- [KH04b] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Magasraktári felrakógépek oszloplengéseinek dinamikai modellezése. *GÉP*, 55(12):14–20, 2004.
- [KH05] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Vibration damping effects and methods in the structure of shelf storage and retrieval machines. In *microCAD 2005, O Section: International Scientific Conference, Miskolc*, pages 67–72, 2005.
- [KH09] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Magasraktári felrakógépek oszloplengéseit csillapító hatások. In *Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XIV.: Nemzetközi Tudományos Konferencia, Kolozsvár*, pages 111–114, 2009.
- [KH10] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Magasraktári felrakógépek vázszerkezetének dinamikai vizsgálata. In *OGÉT 2010 - XVI-II. Nemzetközi Gépészeti Találkozó, Nagybánya*, pages 265–268, 2010.
- [KH11] Béla Kulcsár and Sándor Hajdu. Dynamical modelling possibilities of storage and retrieval machine structures. In *microCAD 2011, N Section: XXV. International Scientific Conference, Miskolc*, pages 87–92, 2011.

Hivatkozások

- [1] László Felföldi. *Anyagmozgatási kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, 1975.
- [2] József Prezenszki, editor. *Logisztika I. (Bevezető fejezetek)*. Budapesti Műszaki Egyetem Mérnöktovábbképző Intézet, 1998.
- [3] Werner Bopp. Untersuchung der statischen und dynamischen Positionsgenauigkeit von Einmast-Regalbediengeräten. Dissertation, Institut für Fördertechnik Karlsruhe, 1993.
- [4] Roland Aßmann. Untersuchungen zur Feinpositionierung von Regalbediengeräten. Dissertation, Institut für Fördertechnik Karlsruhe, 1997.
- [5] FEM 9.001. *Terminology; Dictionary, storage and retrieval machines*.
- [6] FEM 9.101. *Terminology; Storage and retrieval machines – definitions*.
- [7] Mecalux. *Stacker Cranes for Pallets*.
URL: <http://img.mecalux.com/external/catalogue/en-UN/pdf>.
- [8] MLOG Logistics GmbH. *KardexMlog ImageBrochure*.
URL: <http://www.kardex-mlog.com/en/products-mlog/storage-and-retrieval-machines.html>.
- [9] SSI SCHÄFER. *Die Familie der Regalbediengeräte*.
URL: <http://media.ssi-schaefer.de>.
- [10] Viastore systems. *Storage/Retrieval machines*.
URL: <http://www.viastore.com/downloads>.
- [11] Saeid Bashash, Amin Salehi-Khojin, and Nader Jalili. Forced vibration analysis of flexible Euler-Bernoulli beams with geometrical discontinuities. In *2008 American Control Conference Westin Seattle Hotel, Seattle, WA, USA, June 11-13, 2008*.
- [12] Győző Ludvig. *Gépek dinamikája*. Műszaki Könyvkiadó, 1983.
- [13] David V. Hutton. *Fundamentals of finite element analysis*. McGraw-Hill, 2004.
- [14] István Páczelt. *A végeelem-módszer alapjai*. Miskolci Egyetemi Kiadó, 1993.

- [15] Jorge Angeles and Andr es Kecskem ethy. *Kinematics and Dynamics of Multi-body Systems*. Springer-Verlag, 1995.
- [16] Javier Garc a de Jal on and Eduardo Bayo. *Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems – The Real-Time Challenge*. Springer-Verlag, 1994.
- [17] Kemin Zhou, John C. Doyle, and Keith Glover. *Robust and Optimal Control*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [18] Jeff S. Shamma. Analysis and design of gain scheduled control systems. Ph.D. thesis, M.I.T. Laboratory for Information and Decision Systems, Cambridge, MA, USA, 1988.
- [19] Jeff S. Shamma and Michael Athans. Analysis of gain scheduled control for nonlinear plants. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 35(8):898–907, 1990.
- [20] Kemin Zhou and John C. Doyle. *Essentials of Robust Control*. Prentice Hall, New Jersey, 1998.
- [21] John C. Doyle et al. State-space solutions to standard \mathcal{H}_2 and \mathcal{H}_∞ control problems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(8):831–847, 1989.
- [22] Pierre Apkarian, Pascal Gahinet, and Greg Becker. Self-scheduled \mathcal{H}_∞ control of linear parameter-varying systems: a design example. *Automatica*, 31(9):1251–1261, 1995.
- [23] A. Packard and G. Balas. Theory and application of linear parameter varying control techniques. In *American Control Conference, Workshop I, Albuquerque, New Mexico*, 1997.
- [24] J. Bokor and G. Balas. Linear parameter varying systems: A geometric theory and applications. In *16th IFAC World Congress, Prague*, 2005.