



Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ing. Romana Čápková
študentka doktorandského študijného programu Mechatronické systémy

Autoreferát dizertačnej práce
Robustné riadenie mechatronických systémov

na získanie akademického titulu „doktor“ („philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“)

v doktorandskom študijnom programe: Mechatronické systémy

v študijnom odbore: Kybernetika

Forma štúdia: denná

Miesto a dátum: 31.5.2023



Dizertačná práca bola vypracovaná na Ústave automobilovej mechatroniky, Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave.

Predkladateľka: Ing. Romana Čápková
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľka: prof. Ing. Alena Kozáková, PhD.
Ústav automobilovej mechatroniky
FEI STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Dušan Krokavec, PhD.
Katedra kybernetiky a umelej inteligencie
FEI TU v Košiciach, Vysokoškolská 4, 042 00 Košice

doc. Ing. Radoslav Paulen, PhD.
Ústav informatizácie, automatizácie a matematiky
FCHPT STU v Bratislave, Radlinského 9, 812 37 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa

oh na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, v miestnosti č.

prof. Ing. Vladimír Kutiš, PhD.

SÚHRN

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Študijný odbor:	kybernetika
Študijný program:	mechatronické systémy
Autor:	Ing. Romana Čápková
Dizertačná práca:	Robustné riadenie mechatronických systémov
Vedúca práce:	prof. Ing. Alena Kozáková, PhD.
Miesto a rok predloženia práce: Bratislava 2023	

Predložená dizertačná práca sa zaoberá návrhom univerzálnej frekvenčnej metódy syntézy robustného decentralizovaného regulátora na báze Metódy ekvivalentných podsystémov (MEP). V navrhnutej modifikácii ostáva MEP základným rámcom pre realizáciu nezávislého návrhu lokálnych regulátorov ekvivalentných podsystémov generovaných pre nominálny systém. Na nezávislý návrh lokálnych SISO regulátorov sa využíva štandardný QFT prístup, čím je garantovaná robustnosť plného systému s decentralizovaným regulátorom vzhľadom na parametrickú neurčitost' ako aj splnenie ľubovoľných požiadaviek na kvalitu špecifikovaných vo frekvenčnej oblasti. Návrh lokálnych regulátorov je realizovaný tvarovaním frekvenčných charakteristík nominálnych ekvivalentných podsystémov v Nicholsovom diagrame.

Navrhnutá MEP-QFT metóda je overená na dvoch prípadových štúdiách zaoberajúcich sa

1. návrhom robustného decentralizovaného regulátora výšky hladín systému štvorice nádrží a
2. návrhom robustného riadenia tlmenia kmitov laboratórneho vežového žeriava pre rôzne dĺžky závesu bremena.

Kľúčové slová: neurčitý systém, parametrická neurčitost', decentralizovaný regulátor, robustná stabilita, robustná kvalita, Metóda ekvivalentných podsystémov, QFT prístup, Nicholsov diagram

ABSTRACT

SLOVAK UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IN BRATISLAVA
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

Study Branch:	cybernetics
Study Programme:	mechatronic systems
Author:	Ing. Romana Čápková
Thesis:	Robust control of mechatronic systems
Supervisor:	prof. Ing. Alena Kozáková, PhD.
Place and year of submission:	Bratislava, 2023

The dissertation thesis deals with development of an original unified frequency domain method for the design of robust decentralized controllers based on the Equivalent Subsystems Method (ESM). In the proposed modification, ESM provides a basic framework for independent design of local controllers of equivalent subsystems generated for the nominal system. A standard QFT approach is used to design local SISO controllers, thus guaranteeing robustness of the full system under the decentralized controller with respect to the parametric uncertainty as well as satisfying arbitrary performance requirements specified in the frequency domain. The design of local controllers is realized by loop shaping nominal equivalent subsystems in the Nichols diagram.

The proposed MEP-QFT method is validated on two case studies dealing with

1. the design of a robust decentralized level controller for a quadruple tank system and
2. the design of a robust control of oscillation damping of a laboratory tower crane for different load suspension lengths.

Keywords: uncertain system, parametric uncertainty, decentralized controller, robust stability, robust performance, Equivalent Subsystems Method, QFT approach, Nichols diagram

Obsah

Úvod	6
1 Prehľad súčasného stavu riešenej problematiky.....	7
2 Návrh robustného decentralizovaného regulátora pre neurčitý systém s parametrickou neurčitostou použitím Metódy ekvivalentných podsystémov a QFT	8
3 Prípadové štúdie.....	10
3.1 Návrh robustného decentralizovaného regulátora výšky hladín systému štvorice nádrží	10
3.2 Robustné riadenie tlmenia kmitov bremena laboratórneho modelu vežového žeriava	15
Záver.....	21
Zoznam publikácií autora.....	23
Literatúra	27

“Robust Control Engineering is both, a consolidated Science and beautiful Art at the same time. Every control engineering project combines science and art components. QFT bridges the gap between the control theory and design of real-world solutions.”

Mario García-Sanz, 2017

Úvod

Mnohé technické ale aj environmentálne a spoločenské systémy sa vyznačujú vysokou zložitosťou a priestorovou rozľahlosťou. Typickými príkladmi technických systémov s vysokou zložitosťou sú napr. prepojené energetické systémy, priestorovo distribuované vodohospodárske systémy, dopravné systémy s mnohými externými signálmi, priestorovo rozľahlé flexibilné štruktúry a sieťové riadiace systémy, v ktorých sú senzory, akčné členy a výpočtové prvky navzájom prepojené prostredníctvom siete, resp. iného zdieľaného média.

Zložité systémy majú vždy viacero vstupov a výstupov (multi-input multi-output, MIMO) a vyznačujú sa niektorým z nasledujúcich znakov: rozmernosť, obmedzená informačná štruktúra a neurčitosť [28]. V takýchto systémoch majú procesné databázy distribuované zdroje údajov, čím vzniká potreba rýchleho akčného zásahu ako odozvy na pôsobenie lokálnych vstupov a porúch. Odtiaľ vyplýva nutnosť použitia distribuovaných (decentralizovaných) informačných a riadiacich štruktúr a rozvoja vhodnej teórie na syntézu zákonov riadenia v decentralizovanej informačnej štruktúre [28, 43].

Praktickými výhodami používania decentralizovaných regulátorov sú najmä jednoduchosť matematického modelu riadeného systému, jednoduchosť obsluhy, jednoduchá implementácia, priamy a lokalizovaný efekt nastavenia parametrov lokálnych regulátorov, nižšia citlivosť voči neurčitosti, redukovaný objem výpočtov. V porovnaní s decentralizovanými regulátormi vykazujú centralizované MIMO regulátory síce vždy vyššiu kvalitu, avšak za cenu vyšších nákladov na získanie dostatočne podrobného modelu riadeného procesu a prácu s ním [28, 12]. Robustné riadenie sa zaoberá riadením systémov s neurčitou dynamikou, konkrétne formuláciou a zabezpečením splnenia požiadaviek na ich stabilitu a požadovanú kvalitu riadenia. Úlohou robustného regulátora je zabezpečiť požadovanú kvalitu riadenia pre všetky možné realizácie neurčitého systému (množinu jeho dynamických modelov). Robustný prístup ako jedna z oblastí moderných teórie riadenia sa začal rozvíjať v 80. rokoch najmä v súvislosti s problematikou riadenia viacrozmerných systémov. Pretože robustnosť SISO systémov bola dobre pochopiteľná a analyzovateľná frekvenčnými metódami klasickej teórie riadenia z obdobia 30.–40. rokov, hľadali sa možnosti rozšírenia existujúcich postupov pre MIMO systémy. Robustný prístup sa využíva aj ako efektívny nástroj na návrh decentralizovaného riadenia vo frekvenčnej oblasti [26, 28, 48].

Dizertačná práca sa zaoberá rozšírením existujúcej metódy návrhu robustného decentralizovaného regulátora viacrozmerových systémov vo frekvenčnej oblasti. Vychádza z pôvodnej univerzálnej metódy [26], podľa ktorej sa postup návrhu realizuje na princípe Metódy ekvivalentných podsystémov (MEP), ktorá zaručuje splnenie nutnej a postačujúcej podmienky stability plného systému s decentralizovaným regulátorom. Navrhnuté rozšírenie metódy spočíva vo využití štandardného QFT postupu [12, 13] v nezávislom návrhu lokálnych SISO regulátorov pre ekvivalentné podsystémy, čo umožňuje zohľadniť parametrickú neurčitost' modelu MIMO systému, a tým znížiť konzervativizmus podmienky robustnej stability a zároveň špecifikovať ľubovoľné požiadavky na kvalitu.

1 Prehľad súčasného stavu riešenej problematiky

Základným problémom návrhu riadenia, ktorý vychádza z matematického modelu riadeného dynamického systému, je neurčitost' modelu (perturbance) v dôsledku chýb pri identifikácii, ako napr. zanedbanie nelinearit, oneskorení, vysokofrekvenčnej dynamiky a pod., a pri modelovaní riadeného systému, najmä neurčitost' parametrov matematického modelu danej štruktúry. Nepresnost' modelu môže byť taktiež dôsledkom zmien prostredia, pracovných podmienok, starnutia zariadení a pod. Neurčitosti môžu byť spôsobené taktiež rôznymi externými poruchami (disturbances), ktoré nie sú ovplyvniteľné riadiacimi zásahmi (vstupmi riadeného systému). V tejto práci sa budeme zaoberať prvým typom neurčitostí matematického modelu [28].

Počiatky riešenia problematiky robustného riadenia siahajú do 40. rokov 20. storočia, aj keď vtedy sa ešte pojem robustnosť tak, ako ho v oblasti automatického riadenia používame dnes, nepoužíval [50]. V súčasnosti ide o veľmi rozsiahlu a dobre prepracovanú oblasť teórie riadenia. Na analýzu robustnosti systémov s neštruktúrovanou (dynamickou) neurčitost'ou sa využíva princíp malého zosilnenia (Small Gain Theorem) a metódy H_∞ optimálneho riadenia na základe minimalizácie normy príslušných prenosových funkcií spätnoväzobného systému [4, 52]. Pre systémy so štruktúrovanou (parametrickou) neurčitost'ou bola prelomom formulácia Charitonovovej vety (1978), ktorej zovšeobecnená verzia (1989) a tiež Veta o stabilite na hrane kvádra neurčitostí (Edge Theorem) (1988) [52] sa využívajú na analýzu robustných vlastností širokej triedy lineárnych systémov s parametrickou neurčitost'ou a v súčasnosti je na ich báze rozpracovaný rad metód syntézy robustných regulátorov.

Metódy robustného riadenia pre neurčité lineárne a nelineárne systémy opísané stavovými rovnicami sú založené na využití Ljapunovovej teórie stability [45, 50]. Hlavné obdobie rozvoja robustného riadenia ako pokročilého prístupu v teórii riadenia nastáva od polovice 80. rokov 20. storočia a robustné riadenie sa stáva jedným z najdôležitejších v praxi využívaných prístupov [50].

Štandardné postupy pre návrh lokálnych regulátorov pre jednotlivé podsystémy sa realizuje jedným zo základných prístupov, ktorými sú simultánny návrh (simultaneous design, dependent design), postupný návrh (sequential design [18]) alebo nezávislý návrh (independent design [17, 48]).

Nezávislý návrh využíva MEP, ktorá vychádza z nutnej a postačujúcej podmienky stability pre MIMO systém formulovanej zovšeobecneným Nyquistovým kritériom. Uvažuje neštrukturovanú neurčitost' a na návrh lokálnych regulátorov na úrovni podsystémov sa využívajú štandardné SISO (single-input single-output) metódy, pričom sa vzhľadom na charakter podmienok stability odporúča použiť niektorú frekvenčnú metódu [29]. Na základe doteraz aplikovaných postupov návrhu sa ako jedna z možností ďalšieho rozšírenia a zefektívnenia MEP javí použitie QFT (Quantitative feedback theory) prístupu, ktorý je vhodný na návrh robustných SISO kompenzátorov pre neurčité systémy opísané parametrickou neurčitost'ou.

QFT teória je frekvenčná metodika, ktorá využíva pre návrh robustných SISO regulátorov frekvenčné nástroje teórie riadenia, pričom pracuje s modelom neurčitého systému opísaného parametrickými neurčitost'ami a umožňuje navrhnuť robustný regulátor pri splnení ľubovoľne špecifikovaných (avšak realizovateľných) požiadaviek na kvalitu riadenia [12]. Výhodou je, že realizovateľnosť návrhu vzhľadom na špecifikovanú kvalitu vyplynie a je overiteľná priamo v prípravných krokoch návrhu. Vzhľadom na to, že MEP pracuje s ekvivalentnými podsystémami generovanými ako frekvenčné charakteristiky, pre ktoré sa nezávisle navrhujú SISO regulátory, vznikla myšlienka implementovať QFT postup na návrh regulátorov na úrovni ekvivalentných podsystémov.

Dizertačná práca vychádza z originálnej metódy návrhu decentralizovaného regulátora (Metóda ekvivalentných podsystémov, MEP) vyvinutej na predošlých pracoviskách školiteľky na FEI STU v Bratislave. Jej implementácia do rozšírenej metódy návrhu robustných decentralizovaných regulátorov pre neurčité systémy opísane neštrukturovanou neurčitost'ou (univerzálna metóda) je v ucelenej forme prezentované v článku [26]. Princípy QFT metodiky syntézy robustného riadenia pre rôzne typy systémov (lineárne/nelineárne, stabilné/nestabilné, systémy so sústrednými/distribúvanými parametrami, systémy s oneskorením) a rôzne štruktúry riadenia spolu s desiatimi ukázkami jej využitia v riešení prípadových štúdií z praxe sú systematicky prezentované v knihe [12].

2 Návrh robustného decentralizovaného regulátora pre neurčitý systém s parametrickou neurčitost'ou použitím Metódy ekvivalentných podsystémov a QFT

Hlavným výsledkom dizertačnej práce je odvodená metodika návrhu robustného decentralizovaného regulátora na báze MEP metódy v kombinácii s QFT prístupom (MEP-QFT). MEP je základným rámcom pre realizáciu nezávislého návrhu decentralizovaného regulátora pre nominálny systém, ktorý garantuje nominálnu stabilitu v zmysle splnenia nutných a postačujúcich podmienok stability. Použitie QFT metódy na nezávislý návrh SISO regulátorov ekvivalentných podsystémov garantuje robustnosť vzhľadom na parametrickú neurčitost' použitú v opise neurčitého systému.

Postup návrhu robustného decentralizovaného regulátora vyplýva z teoretických výsledkov formulovaných vo Vete 2 (princíp MEP) a z použitia QFT metódy na nezávislý návrh SISO regulátorov ekvivalentných podsystémov a má nasledovné kroky:

I. Modelovanie neurčitého systému:

- výpočet matíc prenosových funkcií $P_r(s)$, $r = 1, \dots, N$ rozmeru $m \times m$ pre vybrané kombinácie hodnôt neurčitých parametrov tvoriacich množinu neurčitých systémov $\Pi = \{P_r(s)\}_{r=1, \dots, N}$,
- výber nominálneho modelu $P_N(s)$,
- dekompozícia nominálneho modelu na diagonálnu a mimodiagonálnu časť $P_N(s) = P_d(s) + P_m(s)$.

II. Generovaní ekvivalentných podsystémov pomocou vhodne vybraného frekvenčného vlastného čísla $g_k(j\omega)$ matice interakcií $P_m(s)$, a to pre všetky $P_i(s)$ z množiny neurčitých systémov Π (odporúča sa vybrať to frekvenčné vlastné číslo $g_k(j\omega)$, ktoré zaručí najväčšiu fázovú rezervu pre všetky vygenerované ekvivalentné podsystémy).

III. Nezávislý návrh lokálnych regulátorov na úrovni ekvivalentných podsystémov sa realizuje použitím QFT metódy (pozri podkapitolu 3.2.1, postup krokov 1 – 8).

1. Špecifikácia požiadaviek na kvalitu Typ 1 – Typ 6 (požiadavky na stabilitu, doplnkovú citlivosť, citlivosť alebo poruchy na výstupe, poruchy na vstupe, potlačenie akčného zásahu a sledovanie referenčnej premennej),
2. Nezávislý návrh regulátorov pre jednotlivé ekvivalentné podsystémy metódou tvarovania frekvenčnej charakteristiky (loop shaping) tak, aby vo všetkých ekvivalentných podsystémoch bola zaručená požadovaná kvalita riadenia,
3. Vyhodnotenie stability a dosiahnutej kvality riadenia na úrovni ekvivalentných podsystémov ako aj plného systému.

Výsledný decentralizovaný regulátor pozostáva z lokálnych regulátorov navrhnutých pre ekvivalentné podsystémy, ktoré sa implementujú v reálnych podsystémoch, pričom zaručujú robustnú stabilitu a požadovanú kvalitu plného systému.

Navrhnutá metóda:

- je vhodná pre systémy s rovnakým (ľubovoľným) počtom vstupov a výstupov (a teda aj priamo pre SISO systémy) opísané maticou prenosových funkcií s parametrickou neurčitou jej jednotlivých prvkov,
 - pracuje s neparаметrickými modelmi ekvivalentných podsystémov v tvare frekvenčných charakteristík a ďalšími frekvenčnými závislosťami, z čoho vyplýva interaktívnosť loop-shaping procesu návrhu a jednoduchá vizuálna interpretácia výsledkov,
 - je vhodná na návrh decentralizovaného regulátora pre spojité aj diskkrétne, minimálne aj neminimálnofázové systémy ako aj systémy s oneskorením.
- Podmienkou jej použitia sú stabilné interakcie medzi podsystémami.

Postup návrhu robustného decentralizovaného regulátora demonštrujeme na dvoch prípadových štúdiách.

3 Prípadové štúdie

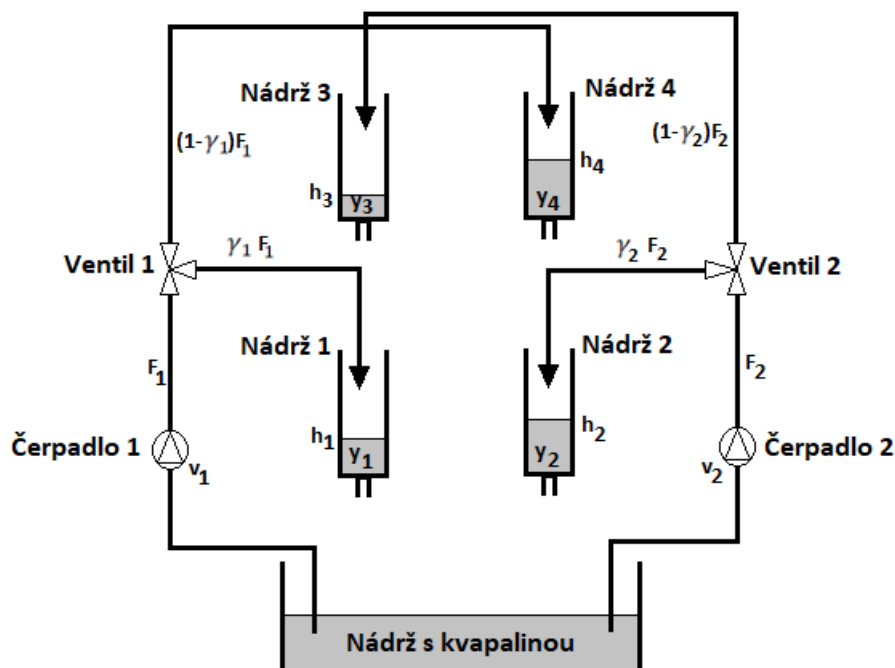
Na ozrejmienie teoreticky odvodených postupov sú v tejto kapitole uvedené dve prípadové štúdie návrhu robustného riadenia MIMO a SISO mechatronických systémov, a to:

1. návrh robustného decentralizovaného regulátora výšky hladín systému štvorice nádrží s využitím novej metódy vyvinutej na báze Metódy ekvivalentných podsystémov a QFT metodiky a
2. robustné riadenie tlmenia kmitov bremena laboratórneho modelu žeriava pre rôzne dĺžky závesu s využitím QFT prístupu.

3.1 Návrh robustného decentralizovaného regulátora výšky hladín systému štvorice nádrží

Systém štvorice nádrží (obr. 3.1) [21] predstavuje jeden z významných benchmark príkladov MIMO systému, ktorý sa využíva na návrh a testovanie rôznych metód syntézy riadenia (PI, PID, fuzzy, prediktívne), najčastejšie decentralizovaného [20, 21, 26, 29, 31, 33, 38, 39, 40, 41]. QFT prístup návrhu pre neminimálno-fázovú konfiguráciu je uvedený v [1].

Laboratórny model pozostáva zo štyroch navzájom prepojených valcových nádrží na kvapalinu, dvoch čerpadiel a dvoch ventilov. Vstupmi do systému sú napätia čerpadiel v_1, v_2 [V], ktorými sú určené vstupné prietoky F_1, F_2 , ktoré sa rozvetvujú do príslušných nádrží pomocou ventilov tak, že do nádrže 1 priteká pomerná časť prietoku F_1 o veľkosti $\gamma_1 F_1$ a do nádrže 4 časť prietoku o veľkosti $(1 - \gamma_1)F_1$. Analogická situácia podľa obr. 7.1 platí pre pomerné prietoky do nádrží 2 a 3. Výstupmi systému sú výšky hladín h_1, h_2 [m] v spodných dvoch nádržiach. Úlohou je regulovať pomocou napätí čerpadiel v_1, v_2 výšku hladín h_1, h_2 v spodných dvoch nádržiach pri danom nastavení ventilov danom hodnotami γ_1, γ_2 .



Obr. 3.1 Funkčná schéma laboratórneho modelu 4 nádrží.

Príslušný nelineárny matematický model systému bol vytvorený s využitím zákona zachovania hmotnosti a Bernoulliho rovnice [31]:

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1 \quad (3.1)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2 \quad (3.2)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} v_2 \quad (3.3)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} v_1 \quad (3.4)$$

kde A_i , $i = 1, \dots, 4$ sú plochy prierezov jednotlivých nádrží, a_i , $i = 1, \dots, 4$ sú plochy prierezov výtokových trubíc z jednotlivých nádrží, h_i , $i = 1, \dots, 4$ sú výšky hladín v nádržiach a k_i , $i = 1, 2$ charakterizujú clony ventilov. Vstupné prietoky dodávané čerpadlami sú dané súčinnmi $F_i = k_i v_i$, $i = 1, 2$. Parametre γ_1, γ_2 určujú nastavenie ventilov a príslušné pomerné prietoky, t.j. $\gamma_1, \gamma_2 \in [0, 1]$. Gravitačné zrýchlenie je označené g .

Systém nelineárnych diferenciálnych rovníc (3.1) - (3.4) bol linearizovaný v okolí pracovného bodu daného výškami hladín h_i^0 , $i = 1, \dots, 4$. Výsledná matica prenosových funkcií linearizovaného systému je v tvare [28]:

$$P(s) = \begin{bmatrix} \frac{c_1 \gamma_1}{T_1 s + 1} & \frac{c_1(1 - \gamma_2)}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)} \\ \frac{c_2(1 - \gamma_1)}{(T_4 s + 1)(T_2 s + 1)} & \frac{c_2 \gamma_2}{T_2 s + 1} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

kde T_i , $i = 1, \dots, 4$ sú časové konštanty a c_i sú zosilnenia, pričom platí:

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (3.6)$$

$$c_i = \frac{T_i k_i k_c}{A_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i = 1, 2 \quad (3.7)$$

kde k_c je konštanta snímača výšky hladiny.

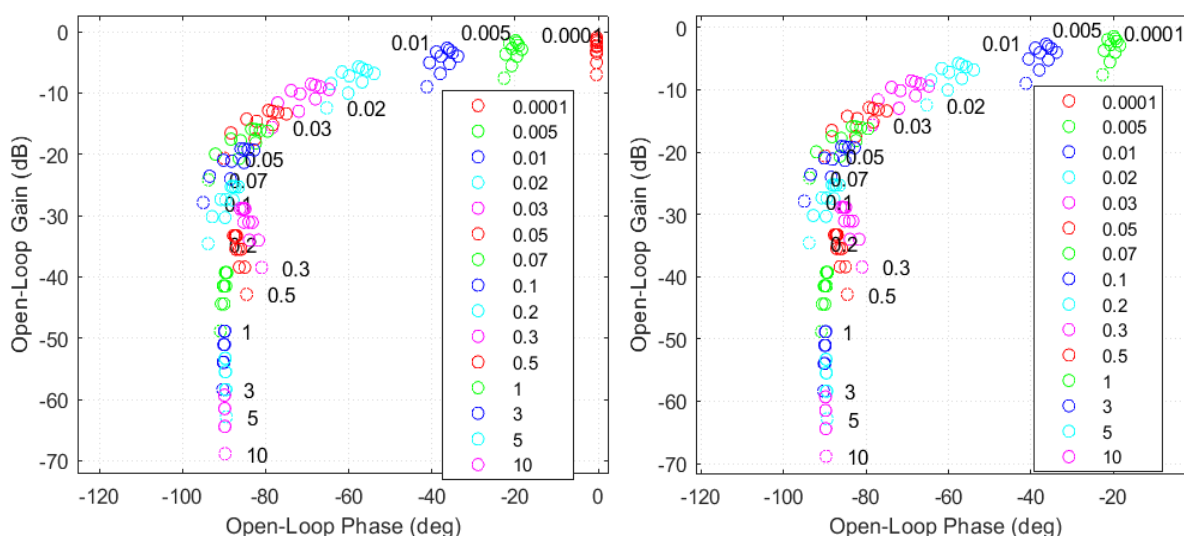
Uvažované hodnoty parametrov modelu sú v nasledovnej tabuľke [31]:

Tabuľka 1. Parametre laboratórneho modelu štvorice nádrží

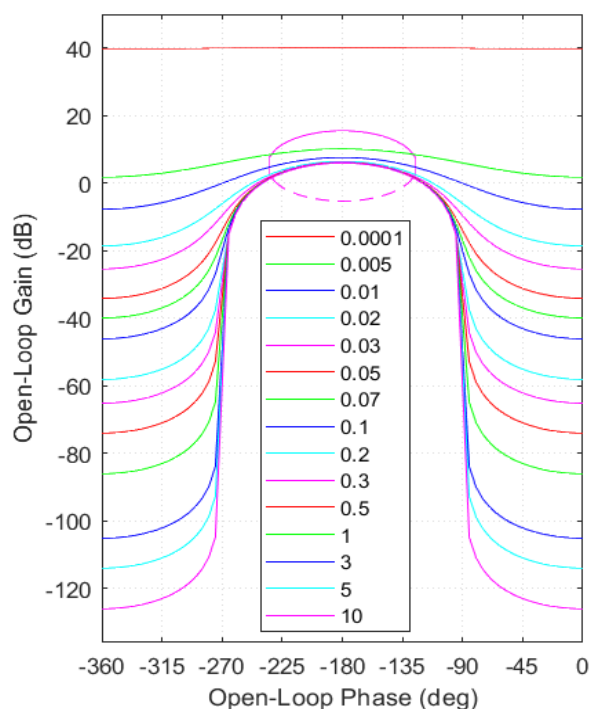
Parameter	A_1, A_3 [cm ²]	A_2, A_4 [cm ²]	a_1, a_3 [cm ²]	a_2, a_4 [cm ²]	h_1, h_2 [cm]	h_3 [cm]	h_4 [cm]	k_c	k_1	k_2	g [cm/s ²]
Hodnota	30	35	0.0977	0.0785	20	2.75	2.22	1	1.790	1.827	981

Úlohou je v systéme štvorice nádrží regulovať výšku hladín h_1 , h_2 v spodných dvoch nádržiach pomocou napätí čerpadiel v_1, v_2 , a to v celom pracovnom rozsahu, ktorý je daný rozsahmi nastavení ventilov v rámci minimálnofázovej konfigurácie systému. Danú úlohu riešime ako problém návrhu robustného decentralizovaného regulátora pre systém s parametrickou neurčitou.

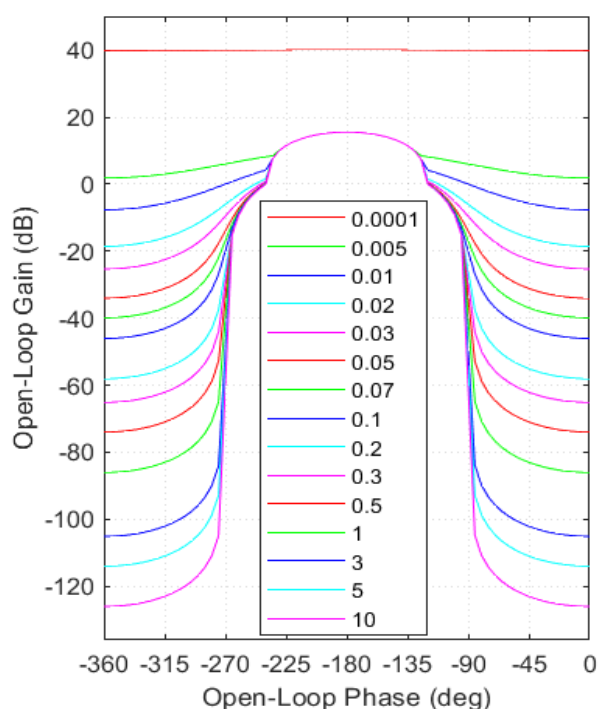
Návrh robustného decentralizovaného regulátora realizujeme podľa postupu opísaného v Kapitole 2.



Obr. 3.2 QFT šablóny ekvivalentných podsystémov $P_{ik}^{eq}(j\omega)$, $i = 1, 2$; $k = 2$.

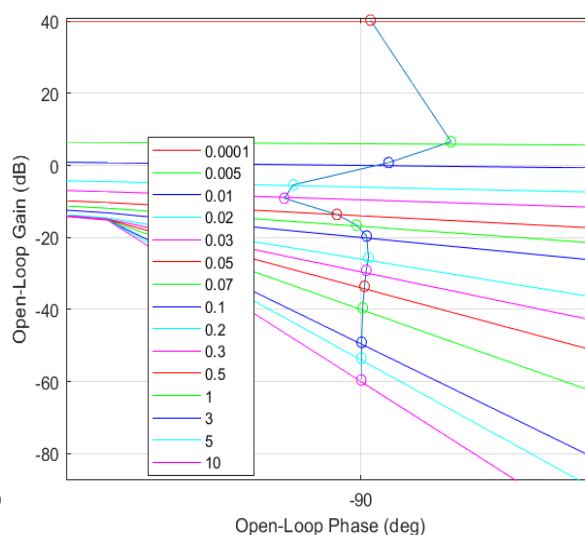
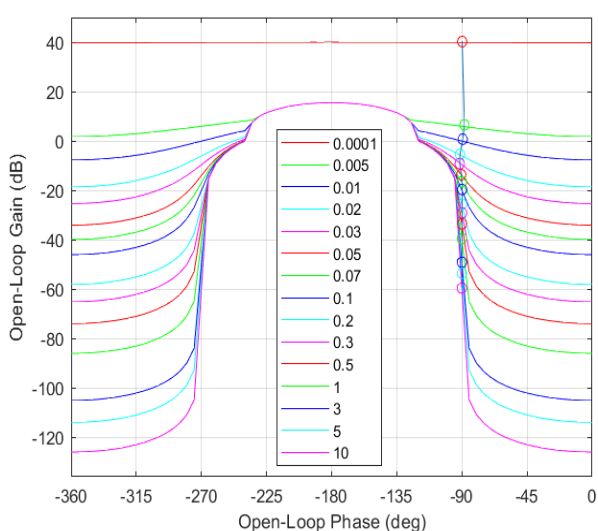


Obr. 3.3 Zjednotenie ohraňení pre $P_{12}^{5eq}(j\omega)$.



Obr. 3.4 Prienik ohraňení pre $P_{12}^{5eq}(j\omega)$.

Návrh sa realizuje v prostredí Matlab s použitím toolboxu QFTCT [12, 27] pre návrh QFT kompenzátora, ktorý sme modifikovali tak, aby bolo možné realizovať návrh jednotlivých QFT kompenzátorov pre ekvivalentné podsystémy.



Obr. 3.5 Návrh regulátora pre $P_{12}^{5eq}(j\omega)$ tvarovaním $L_{01}(j\omega) = P_{12}^{5eq}(j\omega)C_1(j\omega)$, vpravo detail.

Výsledná prenosová funkcia lokálneho PI regulátora pre $P_{12}^{5eq}(j\omega)$ je:

$$C_1(s) = 1.2485 + \frac{0.03844}{s} \quad (3.8)$$

Analogicky sa postup opakuje pre druhý ekvivalentný podsystem P_{22}^{5eq} .

Výsledná prenosová funkcia PI regulátora $C_2(s)$ pre $P_{22}^{5eq}(j\omega)$

$$C_2(s) = 1.4582 + \frac{0.04487}{s} \quad (3.9)$$

Výsledný decentralizovaný regulátor je vyjadrený v tvare diagonálnej matice s prenosovými funkciami lokálnych regulátorov:

$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2485 + \frac{0.0384}{s} & 0 \\ 0 & 1.4582 + \frac{0.04487}{s} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Výsledné riešenie a splnenie požiadaviek na kvalitu analyzujeme:

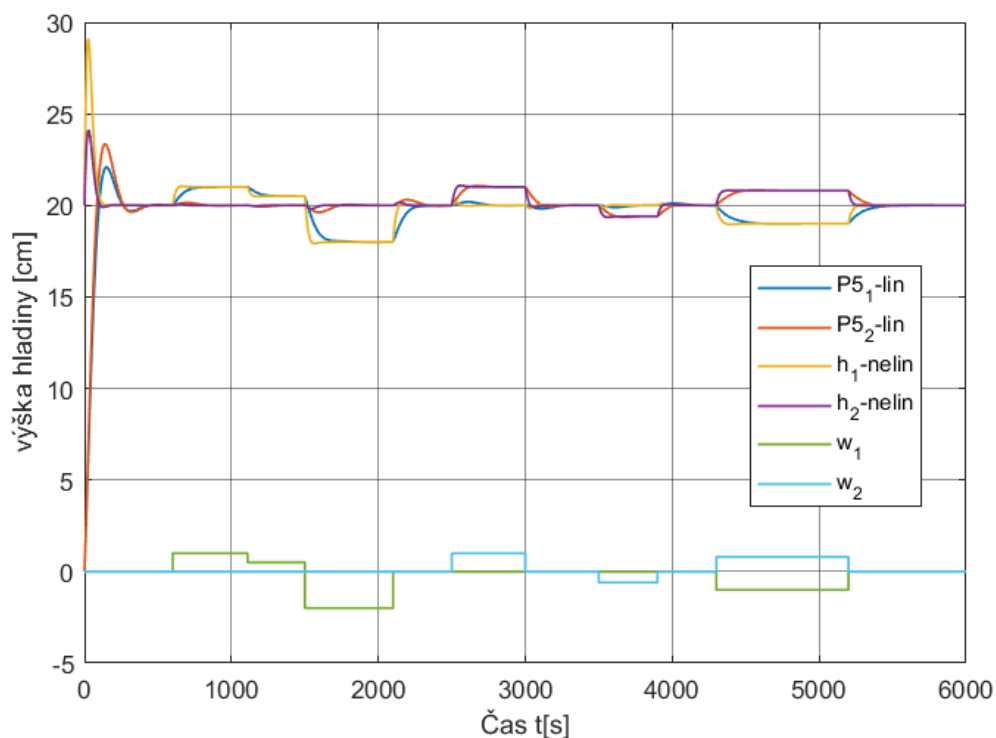
I. Vo frekvenčnej oblasti:

- Na základe Nicholsových diagramov otvorených regulačných obvodov ekvivalentných podsystemov s navrhnutými regulátormi $L_{0i}(j\omega) = P_{i2}^{eq}(j\omega)C_i(j\omega)$, $i = 1, 2$ pre všetkých $N = 10$ realizácií neurčitého systému ,
- vykreslením priebehu modulu citlivosti $|T_3(j\omega)|$ pre všetkých $N = 10$ realizácií neurčitého systému,
- overením stability pomocou zovšeobecneného Nyquistovho kritéria pre všetkých $N = 10$ realizácií neurčitého systému s decentralizovaným regulátorom.

II. V časovej oblasti:

- simuláciami pre skokové zmeny žiadaných hodnôt výšky hladín v spodných nádržiach (jednotlivo) pre všetky realizácie neurčitého systému,
- simuláciami pre rôzne scenáre skokových zmien žiadaných hodnôt výšky hladín v spodných nádržiach pre všetky realizácie neurčitého systému.

Simulácie boli realizované na linearizovanom ako aj na nelineárnom modeli.



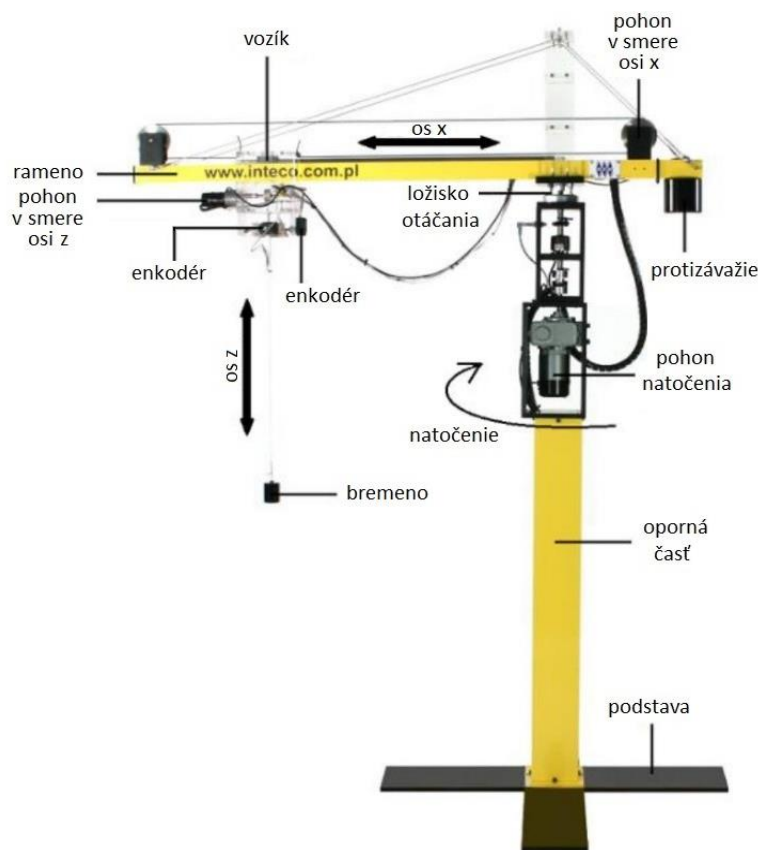
Obr. 3.6 Časový priebeh výšky hladiny v prvej aj druhej nádrži (plný systém s decentralizovaným regulátorom, nominálny systém, lineárny aj nelineárny model).

Z priebehov na obrázku 3.6 vyplýva, že požiadavka na priebeh modulu URO $|T_1(j\omega)| < \delta_1(\omega) = W_s = 1.2$ je splnená – maximálne preregulovanie odoziev $h_1(t)$ a $h_2(t)$ je $\eta_{\max} < 20\%$.

3.2 Robustné riadenie tlmenia kmitov bremena laboratórneho modelu vežového žeriava

Tlmenie nízkofrekvenčných kmitov predstavuje samostatnú výskumnú oblasť s aplikáciami napr. v energetike (návrh stabilizačných spätných väzieb pri regulácii napätia synchronných generátorov v elektrizačnej sieti, tzv. PSS regulátory) [30] alebo pri zdvíhaní a premiestňovaní ťažkých bremien pomocou rôznych typov žeriavov.

Laboratórny vežový žeriav od spoločnosti INTECO obr. 3.7 pozostáva z veže a ramena. Na nosnej veži je namontovaný jednosmerný motor zabezpečujúci rotačný pohyb ramena (podsystem riadenia natočenia ramena). Rameno je pripevnené kolmo k veži a obsahuje motorček, ktorý umožňuje pohyb vozíka pozdĺž ramena (podsystem riadenia polohy vozíka). Bremeno pripevnené na konci závesu sa pohybuje v smere osi z pomocou motorčeka na vozíku (podsystem riadenia dĺžky závesu).



Obr. 3.7 Laboratórny model vežového žeriavu [2].

Z hľadiska riadenia je žeriav nelineárny elektromechanický MIMO systém ovládaný z PC pomocou riadiacich signálov vysielaných z počítača do jednosmerných motorov prevedených na PWM signál. To sa realizuje na základnej doske, ktorá je naprogramovaná tak, aby bolo možné signály priamo ovládať prostredníctvom programov Matlab-Simulink. Vstupmi do laboratórneho žeriavu sú signály PWM (kotvové napätia jednotlivých motorov) a výstupmi sú poloha vozíka na ramene, natočenie ramena a vertikálna poloha bremena (dĺžka závesu).

Úlohou je navrhnúť regulátor, ktorý zabezpečí zníženie amplitúdy a frekvencie kmitov bremena zaveseného na vozíku pozdĺž ramena žeriava (v smere osí x) pre rôzne dĺžky závesu, ktoré sú vyvolané pôsobením poruchy $d(t)$ na vstupe do podsystemu riadenia polohy vozíka.

Úlohu riešime použitím štandardného QFT postupu, v širšom zmysle použitím MEP – QFT metódy pre $m \times m$ maticu prenosových funkcií, kde $m = 1$. V takom prípade je ekvivalentný podsystem daný priamo ako frekvenčná charakteristika prenosovej funkcie riadeného systému.

Pracovné body (PB) sú definované rovnakou polohou vozíka na ramene vo vzdialenosti $x = 0.25\text{m}$, natočením ramena $\theta = 1.57\text{rad}$ a rôznymi dĺžkami závesu závažia $h_i, i = 1, 2$:

- PB1: $h_1 = 0\text{m}$
- PB2: $h_2 = 0.12\text{m}$

Identifikované prenosové funkcie sú v tvare:

$$P_{PB1}(s) = \frac{0.032082}{0.016121s^2 + 0.004702s + 1} \quad (3.11)$$

$$P_{PB2}(s) = \frac{0.077114}{0.02977s^2 + 0.001984s + 1} \quad (3.12)$$

Určí sa parametrická neurčitost':

Tabuľka 2. Rozsahy parametrov prenosovej funkcie kmitavého systému

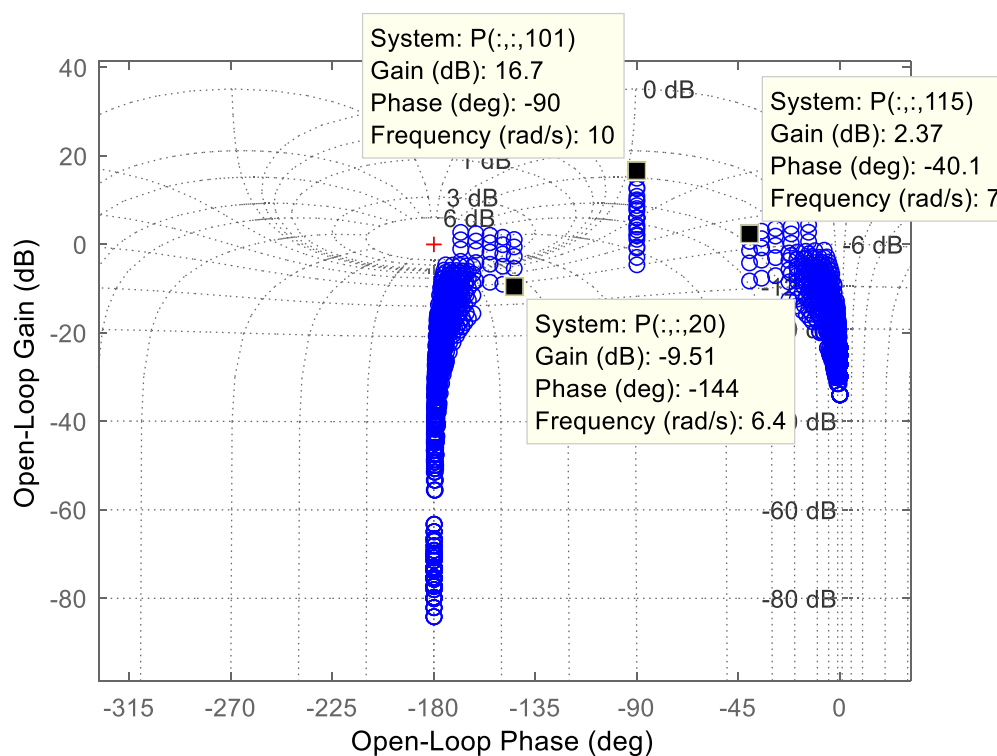
Parameter	$K_{\min}$	$K_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\max}$	$b_{\min}$	$b_{\max}$
Hodnota	0.02	0.08	0.1	0.2	0.005	0.02

Vyberieme nominálny model, ktorého hodnoty parametrov (Tab. 3) sú strednými hodnotami rozsahov uvedených v Tab. 2.

Tabuľka 3. Hodnoty parametrov pre nominálny model

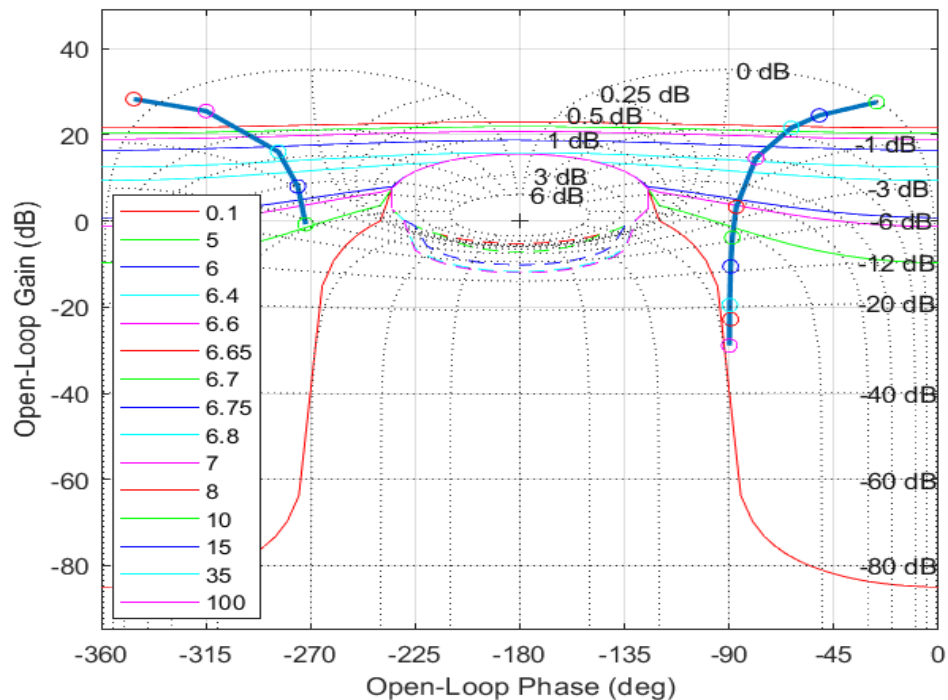
Parameter	K_{nom}	T_{nom}	b_{nom}
Hodnota	0.05	0.15	0.01

Z vygenerovaných modelov systému vykreslíme QFT šablóny v Nicholsovom diagrame:



Obr. 3.8 Šablóny QFT pre všetky modely systému s parametrickou neurčitost'ou

V Nicholsovom diagrame s vykresleným prienikom všetkých ohraničení navrhne späťoväzobný regulátor tlmenia kmitov tvarovaním frekvenčnej charakteristiky nominálneho systému (obr.3.9).



Obr. 3. 9 Nicholsov diagram ORO

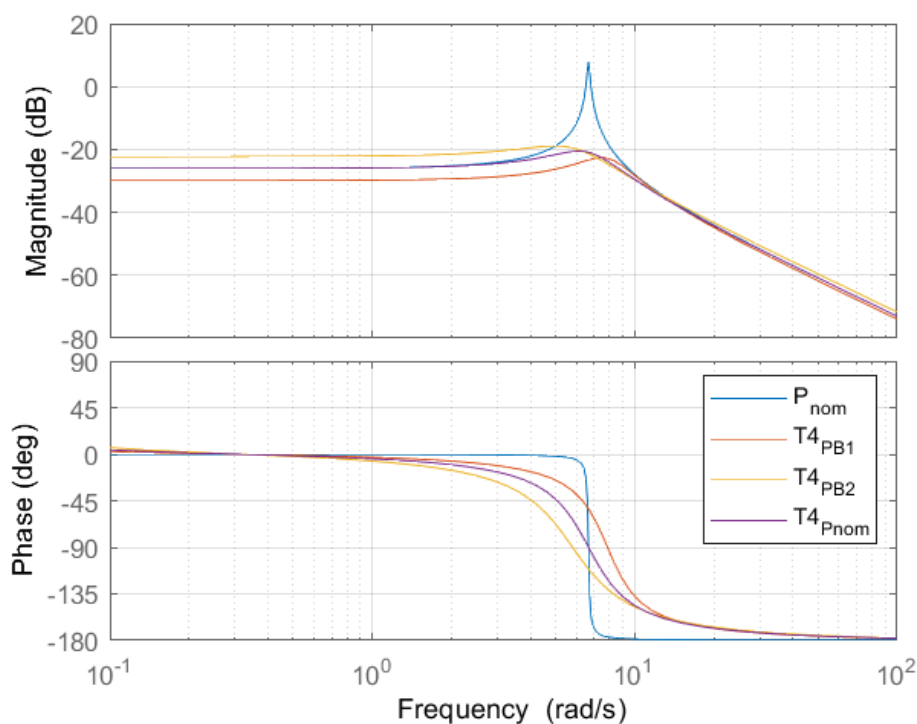
Prenosová funkcia regulátora v štandardnom PID tvare je

$$C(s) = 0.1604 + \frac{1.604}{s} + 0.0016s \quad (3.13)$$

Výsledné riešenie a splnenie požiadaviek na kvalitu analyzujeme:

I. Vo frekvenčnej oblasti:

- Porovnaním Bodeho charakteristík nominálneho modelu netlmeného systému a tlmených systémov s navrhnutým robustným regulátorom tlmenia (nominálny model $P_{nom}(s)$ a modely pre dve hodnoty dĺžky závesu $P_{PB1}(s)$ a $P_{PB2}(s)$),
- Vykreslením frekvenčnej závislosti modulu citlivostnej funkcie $|T_3(j\omega)|$.

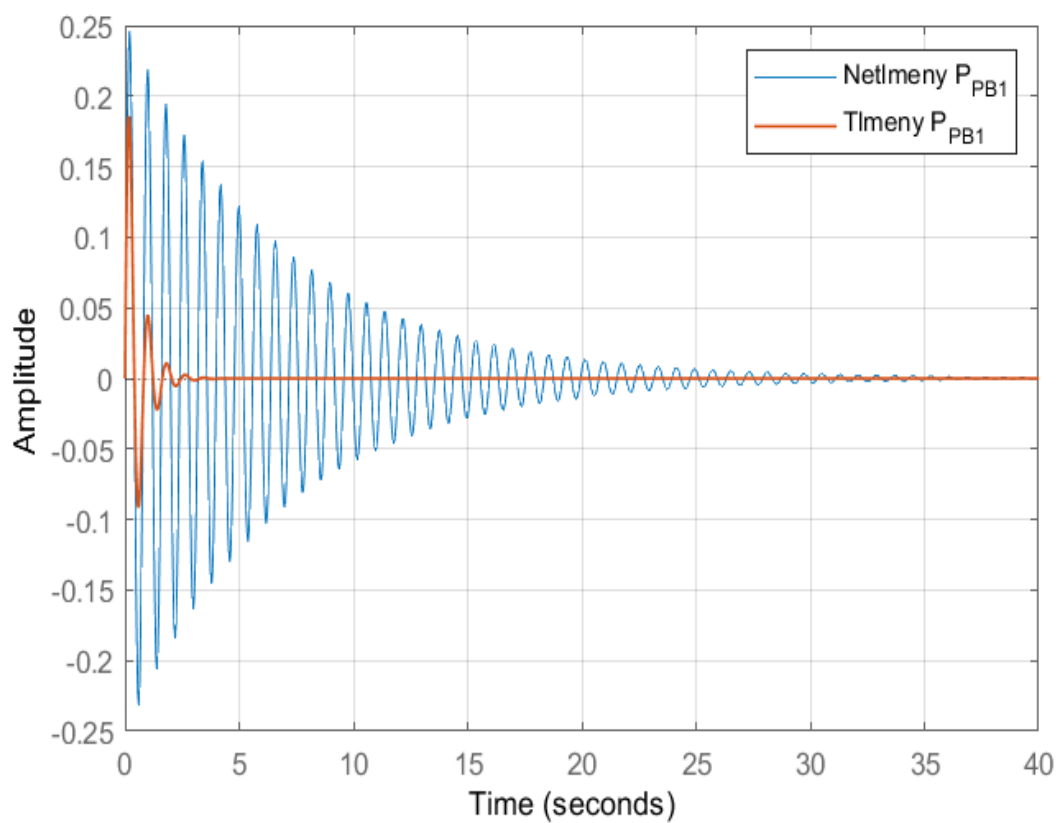


Obr. 3.10 Bodeho diagramy URO s navrhnutým regulátorom $C(s)$ pre nominálny model a modely v 2 uvažovaných pracovných bodoch.

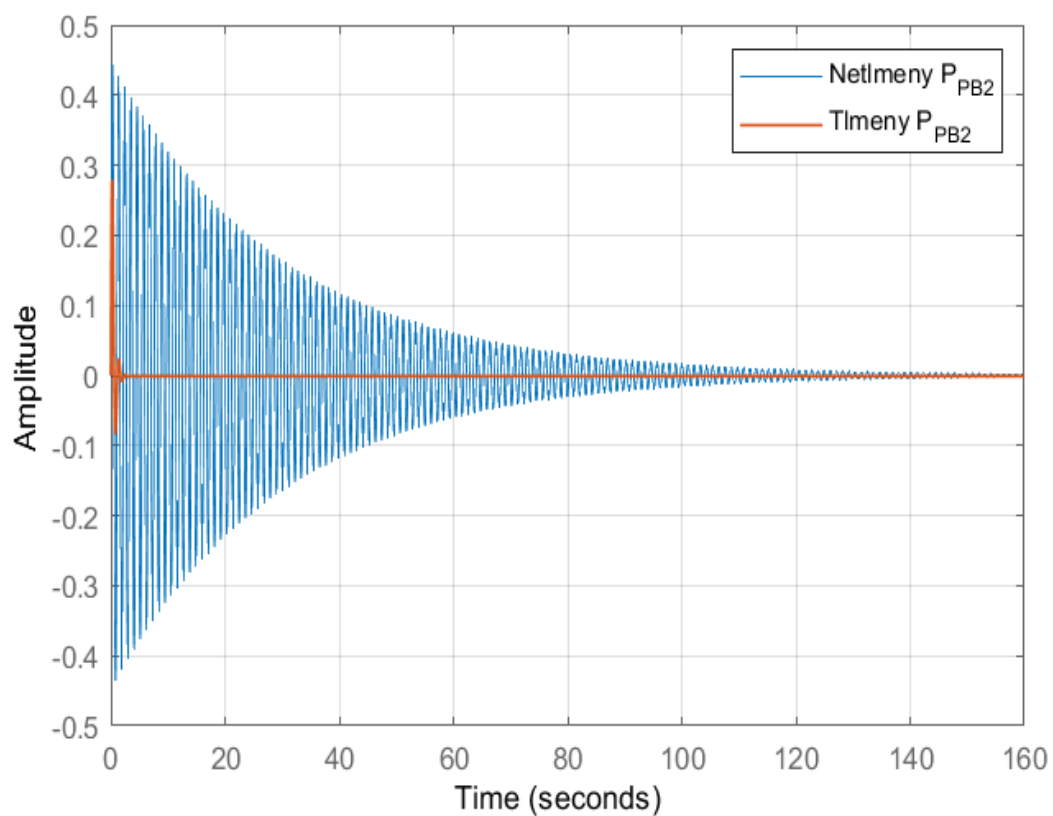
Z priebehov na obr. 3.10 vyplýva výrazné zníženie rezonančného prevýšenia z pôvodnej hodnoty $M_r \approx 34\text{dB}$ na $M_{r_{Pnom}} \approx 5.51\text{dB}$ pre uzavretý obvod s nominálnym modelom P_N , $M_{r_{PB1}} \approx 7.32\text{dB}$ pre URO s PB1 a $M_{r_{PB2}} \approx 3.43\text{dB}$ pre URO s PB2.

II. V časovej oblasti:

Navrhnutý regulátor tlmenia kmitov bol overený simulačne pre matematické modely kmitov závesu bremena dvoch rôznych dĺžok - PB1 a PB2 a pre nominálny model. Efekt tlmenia pre obidve dĺžky závesu bremena je evidentný z priebehov na obr. 3.11 a 3.12.



Obr. 3.11 Porovnanie impulzných charakteristík pre netlmený a tlmený model PB1.



Obr. 3.12 Porovnanie impulzných charakteristík pre netlmený a tlmený model PB2.

Záver

Predložená dizertačná práca sa zaoberá návrhom originálnej univerzálnej frekvenčnej metódy syntézy robustného decentralizovaného regulátora na báze Metódy ekvivalentných podsystémov (MEP).

Pôvodne odvodená MEP ako frekvenčná metóda nezávislého návrhu decentralizovaného regulátora vychádza zo splnenia nutnej a postačujúcej podmienky stability MIMO systému s decentralizovaným regulátorom. Podľa MEP sa nezávislý návrh lokálnych regulátorov realizuje pre ekvivalentné podsystémy generované z frekvenčných charakteristík izolovaných podsystémov tvarovaním vybraným frekvenčným vlastným číslom matice interakcií. Na návrh je možné použiť ľubovoľnú SISO frekvenčnú metódu. Stabilita ekvivalentných podsystémov je nutnou a postačujúcou podmienkou stability plného systému s decentralizovaným regulátorom, dosiahnutá kvalita riadenia na úrovni URO ekvivalentných podsystémov je garantovaná na úrovni URO plného systému. Integrovaním podmienok robustnej stability do MEP vznikla univerzálna metóda návrhu robustného decentralizovaného regulátora vhodná pre neurčité MIMO systémy modelované ako nominálna matica prenosových funkcií s vybraným typom neštruktúrovanej neurčitosti [26].

V pôvodnej univerzálnej metóde navrhutej v tejto práci ostáva MEP základným rámcom pre realizáciu nezávislého návrhu lokálnych regulátorov ekvivalentných podsystémov, pričom na ich návrh sa využíva štandardný SISO QFT postup [12, 13]. Lokálne regulátory navrhnuté použitím QFT metódy zaručujú splnenie ľubovoľných (realizovateľných) požiadaviek na kvalitu riadenia na úrovni ekvivalentných podsystémov, a tým aj na úrovni plného systému.

Navrhovaná metóda syntézy robustného decentralizovaného regulátora bola úspešne overená na dvoch prípadových štúdiách pre MIMO a SISO mechatronické systémy, konkrétne:

- na návrh robustného decentralizovaného regulátora výšky hladín hydraulického systému štvorice prepojených nádrží (benchmark príklad z literatúry [21]) a
- na návrh robustného riadenia tlmenia kmitov bremena laboratórneho modelu žeriava pre rôzne dĺžky závesu (model reálneho laboratórneho zariadenia identifikovaný z meraní).

V oboch prípadoch boli navrhnuté robustné regulátory zaručujúce stabilitu a požadovanú kvalitu pre predpísaný rozsah neurčitosti úspešne overené.

Prínosy dizertačnej práce sú v teoretickej a praktickej oblasti.

Prínosy dizertačnej práce v teoretickej oblasti:

Navrhnutá MEP-QFT je originálna frekvenčná metóda syntézy robustného decentralizovaného regulátora, ktorá

- je využiteľná pre MIMO systémy s rovnakým (ľubovoľným) počtom vstupov a výstupov opísané maticou prenosových funkcií s parametrickou neurčitou jednotlivých prvkov (vrátane SISO systémov),
- pracuje s neparametrickými modelmi ekvivalentných podsystémov v tvare frekvenčných závislostí zobrazených v Nicholsovom diagrame,
- návrh lokálnych regulátorov realizuje nezávisle pre jednotlivé ekvivalentné podsystémy použitím štandardného postupu tvarovania Nicholsovej charakteristiky otvoreného obvodu (loop-shaping).

Výhodou využitia QFT postupu na syntézu lokálnych regulátorov ekvivalentných podsystémov je

- zníženie konzervatívnosti návrhu v porovnaní s univerzálnou metódou [26] vzhľadom na využitie parametrickej neurčitosti,
- možnosť prakticky ľubovoľne špecifikovať požiadavky na kvalitu riadenia v tvare ohraničení modulov príslušných frekvenčných prenosov v rámci zvoleného frekvenčného rozsahu a tiež jeho podoblastí.

Prínosy dizertačnej práce v praktickej oblasti:

Návrh originálnej univerzálnej metódy syntézy robustného decentralizovaného regulátora MEP-QFT, ktorá

- umožňuje využitie nezávislého návrhu lokálnych regulátorov (independent design) pri splnení nutnej a postačujúcej podmienky stability nominálneho systému a zároveň umožňuje dosiahnuť požadovanú kvalitu riadenia, prakticky ľubovoľne špecifikovateľnú vo frekvenčnej oblasti,
- umožňuje realizovať návrh lokálnych SISO regulátorov v prostredí QFT Control Toolboxu [5] rozšírenom o vlastné skripty vytvorené autorkou dizertačnej práce,
- vďaka využitiu neparametrických modelov a grafickej reprezentácie ďalších frekvenčných závislostí podporuje názorný, interaktívny a pri znalosti základných princípov intuitívny proces syntézy,
- je priamo a univerzálne využiteľná pre spojité aj diskkrétne, minimálne aj neminimálnofazové systémy ako aj pre systémy s oneskorením.

Jedinou podmienkou použitia MEP – QFT sú stabilné interakcie medzi podsystémami.

Zoznam publikácií autora

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADN01 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena - MINÁR, Martin. Experimental modelling and control of a tower crane in the frequency domain. In *Strojnícky časopis = Journal of Mechanical engineering*. Vol. 69, No. 3 (2019), s. 17-26. ISSN 0039-2472 (2019: 0.247 - SJR, Q3 - SJR Best Q). V databáze: DOI: 10.2478/scjme-2019-0025; SCOPUS: 2-s2.0-85076309823.

Kategória publikácie od 2022: V3

Ohlasy:

1. [1] KENAN, Hamit - AZELOĞLU, Oktay. Design of scaled down model of a tower crane mast by using similitude theory. In *Engineering Structures*, 2020, vol. 220, Art. no. 110985. ISSN 0141-0296., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

2. [1] WEI, Congming - CHEN, Jiazhe - WANG, An - WANG, Beibei - SHI, Hongsong - WANG, Xiaoyun. Chosen base-point side-channel attack on Montgomery ladder with x-only coordinate: With application to secp256k1. In *IET Information Security*, 2020, vol. 14, no. 5, pp. 483-492. ISSN 1751-8709., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

3. [1] CAPORELLI, Roberto P.L. Anti-sway method for reducing vibrations on a tower crane structure. In *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2023, Vol. 24, no. 1, pp. 171-184. ISSN 1565-1339., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC01 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena - MINÁR, Martin - ONDREJIČKA, Kristián. Robust QFT-based control of the DC motor laboratory model. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj]: 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers : IEEE, 2020, [6] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039892; WOS: 000753938900044; SCOPUS: 2-s2.0-85083107510; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039892.

Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] TAKACS, Gergely - BOLDOCKY, Jan - MIKULAS, Erik - KONKOLY, Tibor - GULAN, Martin. MotoShield: Open Miniaturized DC Motor Hardware Prototype for Control Education. In *Proceedings Frontiers in Education Conference, FIE, 2021, vol. 2021-October*. ISSN 1539-4565., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

AFC02 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena. Damping of tower crane payload vibrations. In *ACCS/PEIT 2019: 6th International conference on advanced control circuits and systems; 5th International conference on new paradigms in electronics & information technology. Hurghada, Egypt. November 17-20, 2019*. Danvers: IEEE, 2019, S. 180-184. ISBN 978-1-

7281-6354-3. V databáze: IEEE: 9062903; SCOPUS: 2-s2.0-85084087242.

Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] KODKIN, Vladimir L. - ANIKIN, Alexandr S. The Reflection Mode of the Moment Loads by an Asynchronous Electric Drive with Vector Control and the Features of this Mode in the Rotation Drive of the Tower Crane. In *Proceedings 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2020*, 2020, Art. no. 9216272, pp. 416-420. ISBN 978-172816209-6., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

2. [1] KODKIN, V. L. - ANIKIN, A. S. - BALDENKOV, A. A. The parametric control in the electric hoist drive of the tower crane. In *Proceedings 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021*, 2021, pp. 269-273. ISBN 978-172814587-7., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

AFC03 KOZÁKOVÁ, Alena - ČÁPKOVÁ, Romana - BUCZ, Štefan. Tuning methods to attenuate oscillatory load-disturbance response : A comparative study. In *ACCS/PEIT 2019 : 6th International conference on advanced control circuits and systems; 5th International conference on new paradigms in electronics & information technology. Hurghada, Egypt. November 17-20, 2019*. Danvers: IEEE, 2019, S. 197-202. ISBN 978-1-7281-6354-3. V databáze: IEEE: 9062845; SCOPUS: 2-s2.0-85084091610; DOI: 10.1109/ACCS-PEIT48329.2019.9062845.

Kategória publikácie od 2022: V2

AFC04 KOZÁKOVÁ, Alena - ČÁPKOVÁ, Romana - PULEVA, Teofana. Robust controller design for a boiler-turbine unit. In *2022 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj]: Proceedings; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko*. 1. vydanie. Danvers, Massachusetts, USA: IEEE, 2022, [6] s. ISBN 978-1-6654-8775-7. V databáze: DOI: 10.1109/KI55792.2022.9925922; SCOPUS: 2-s2.0-85142018425; IEEE: 9925922.

Typ výstupu: príspevok z podujatia; Výstup: zahraničný; Kategória publikácie od 2022: V2

AFC05 MINÁR, Martin - ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena - GOGA, Vladimír. Experimental modelling and control of a tower crane using Nichols chart. In *Applied mechanics 2019: 21st International conference. Ostravice, Czech Republic. April 17-19, 2019*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, S. 135-140. ISBN 978-80-248-4287-5.

Kategória publikácie od 2022: V2

AFC06 MINÁR, Martin - GOGA, Vladimír - ČÁPKOVÁ, Romana - ONDREJČKA, Kristián - MURÍN, Justín. Basic parameters of coiled fishing line actuator. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj]: 30th International Conference. Velké Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020*. 1. ed. Danvers: IEEE, 2020, [4] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039870; WOS: 000753938900022; SCOPUS: 2-s2.0-85083104051; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039870.

Kategória publikácie od 2022: V2

AFC07 ONDREJČKA, Kristián - ČÁPKOVÁ, Romana - MINÁR, Martin - HUBA, Mikuláš. Experimental modelling of proton exchange membrane fuel cell voltage losses. In *2020 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj]: 30th International Conference. Velké*

Karlovice, Czech Republic. January 29-February 1, 2020. 1. ed. Danvers: IEEE, 2020, [5] s. ISBN 978-1-7281-4381-1. V databáze: IEEE: 9039883; WOS: 000753938900035; SCOPUS: 2-s2.0-85083115356; DOI: 10.1109/KI48306.2020.9039883.
Kategória publikácie od 2022: V2

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 ČÁPKOVÁ, Romana - BISTÁK, Pavol - KOZÁKOVÁ, Alena. Virtual and remote laboratory for hydraulic plant control. In *2018 Cybernetics & Informatics (K&I) [elektronický zdroj]: 29th International Conference. Lazy pod Makytou, Slovakia. January 31-February 3, 2018*. 1. vyd. Bratislava : Slovak Chemical Library, 2018, USB, [6] s. ISBN 978-1-5386-4420-1. V databáze: IEEE: 8337553; WOS: 000454633500024; SCOPUS: 2-s2.0-85050919591.
Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] LORO, Felix Garcia - LOSADA, Pablo - GIL, Rosario - REY, Africa Lopez - CRISTOBAL, Elio San - MOLINA, Clara Perez - DIAZ, Gabriel - CASTRO, Manuel. Real Experiments in a MOOC Through Remote Lab VISIR: Challenges, Successes and Limits. In *Proceedings of 2018 Learning With MOOCS, LWMOOCs 2018*, 2018, Art. no. 8534695, pp. 98-101. ISBN 978-153866533-6., Registrované v: SCOPUS

Ohlas: zahraničný

2. [1] MIRAUDA, Domenica - CAPECE, Nicola - ERRA, Ugo. StreamflowVL: A Virtual Fieldwork Laboratory that Supports Traditional Hydraulics Engineering Learning. In *APPLIED SCIENCES-BASEL*, 2019, vol. 9, no. 22, art. no. 4972. ISSN 2076-3417., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS

Ohlas: zahraničný

3. [1] MIRAUDA, Domenica - CAPECE, Nicola - ERRA, Ugo. Sustainable Water Management: Virtual Reality Training for Open-Channel Flow Monitoring. In *SUSTAINABILITY*, 2020, vol. 12, no. 3, Art. no. 757. ISSN 2071-1050., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS

Ohlas: zahraničný

AFD02 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena. Modelling and control of the tower crane laboratory model. In *ELITECH'18 [elektronický zdroj] : 20th Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 23, 2018*. 1. ed. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, CD-ROM, [5] p. ISBN 978-80-227-4794-3.
Kategória publikácie od 2022: V2

AFD03 ČÁPKOVÁ, Romana - MINÁR, Martin - KOZÁKOVÁ, Alena - GOGA, Vladimír. Modelling and control of a laboratory DC motor. In *ELITECH'19 [elektronický zdroj] : 21st Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 29, 2019*. 1. ed. Bratislava : Vydavateľstvo Spektrum STU, 2019, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-80-227-4915-2.
Kategória publikácie od 2022: V2

AFD04 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena. Experimental modelling and control of a tower crane. In *Process Control 2019: 22nd International Conference on Process Control, Štrbské Pleso, Slovensko, 11.-14.6.2019*. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2019, S. 97-101. ISBN 978-1-7281-3758-2. V databáze: IEEE: 8815327; WOS: 000539039300017; SCOPUS: 2-s2.0-85072540950; DOI: 10.1109/PC.2019.8815327.
Kategória publikácie od 2022: V2

Ohlasy:

1. [1] JIANG, Weiguang - DING, Lieyun - ZHOU, Cheng. Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model. In AUTOMATION IN CONSTRUCTION, 2022, vol. 138, no., pp. ISSN 0926-5805., Registrované v: WOS, CC, SCOPUS

Ohlas: zahraničný

2. [1] LOVEIKIN, V. S. - ROMASEVICH, Yu A. - SHYMKO, L. S. - LOVEIKIN, Yu, V - POCHKA, K., I. The dynamic analysis of the joint trolley movement and hoisting mechanism in the tower crane. In: Opir Materialiv i Teoria Sporud-strength of Materials and Theory of Structures, 2022, no. 108, pp. 267-282. ISSN 2410-2547., Registrované v: WOS

Ohlas: zahraničný

AFD05 ČÁPKOVÁ, Romana - KOZÁKOVÁ, Alena - MINÁR, Martin. Attenuation of tower crane payload vibrations: A case study. In *ELITECH'20 [elektronický zdroj]: 22nd Conference of doctoral students. Bratislava, Slovakia. May 27, 2020.* 1. ed. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2020, [8] s. ISBN 978-80-227-5001-1.

Kategória publikácie od 2022: V2

Ostatné:

Konzultácie k diplomovej práci: 1ks.

Literatúra

- [1] Alavi S. M. M. and Hayes M. J., "Quantitative Feedback Design for a Benchmark Quadruple-Tank Process," 2006 IET Irish Signals and Systems Conference, 2006, pp. 401-406.
- [2] Antal P., "Riadenie laboratórneho vežového žeriava", Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2020, p. 55.
- [3] Bakošová M., Fikar M., "Riadenie procesov", Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2008, 191 s. ISBN 978-80-227-2841-6.
- [4] Bhattacharyya S. P., "Robust Control under parametric uncertainty", An overview and recent results, *Annual Reviews in Control*, 2017, <https://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.05.001>.
- [5] Borghesani C., Chait Y. a Yaniv O., "Quantitative Feedback Theory Toolbox – For User with MATLAB", Terasoft, San Diego, CA, 2002.
- [6] Borghesani C., Chait Y., and Yaniv O., "The QFT Frequency Domain Control Design", Toolbox for Use with MATLAB. User's Guide. The MathWorks, Inc., Massachusetts, 2003, USA.
- [7] Čápková R., Kozáková A., "Damping of tower crane payload vibrations," In ACCS/PEIT 2019: 6th International conference on advanced control circuits and systems; 5th International conference on new paradigms in electronics & information technology. Hurghada, Egypt. November 17-20, 2019. Danvers: IEEE, 2019, S. 180-184. ISBN 978-1-7281-6354-3.
- [8] Čápková R., Kozáková A., "Experimental modelling and control of a tower crane," In Process Control 2019: 22nd International Conference on Process Control, Štrbské Pleso, Slovensko, 11.-14.6.2019. 1. vyd. Danvers : IEEE, 2019, S. 97-101. ISBN 978-1-7281-3758-2.
- [9] Čápková R., Kozáková A., Minár M., "Experimental modelling and control of a tower crane in the frequency domain," In *Strojnícky časopis = Journal of Mechanical engineering*. Vol. 69, No. 3 (2019), s. 17-26. ISSN 0039-2472.
- [10] Duong Q. K., Hubinsky P., Paszto P., Florek M., Sovcik J., Kajan M., "Effectiveness of input shaping and real-time nurbs interpolation for reducing feedrate fluctuation," *Procedia Engineering*, Volume 96, 2014, Pages 81-90, ISSN 1877-7058.
- [11] Enzmann M., Döschner C., "Decentralised Multivariable Vibration Control of Smart Structures Using QFT," 2001, 10.1007/978-94-010-0724-5_42.
- [12] Garcia-Sanz M., "Robust Control Engineering: Practical QFT Solutions", Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. 978-1-138-03207-1, 2017.
- [13] Garcia-Sanz M., Guillen J. C. a Ibarrola J. J., "Robust controller design for time delay systems with application to a pasteurisation process", *Control Eng. Pract.* 9, 2001, 961-972.
- [14] Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E., "Control system design," Prentice Hall, 2001, ISBN 0-13-958653-9.
- [15] Häuptle P., Hubinský P. and Gruhler G., "Investigation in online-methods estimating the oscillating frequency to improve control adaptively," *2011 16th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics*, 2011, pp. 398-401, doi: 10.1109/MMAR.2011.6031380.
- [16] Horowitz I. M., "Synthesis of feedback systems". New York: Academic Press, 1963.
- [17] Hovd M., Skogestad S., "Improved independent design of robust decentralized controllers, " In 12th IFAC World Congress, Sydney, Australia, 1993, vol. 5, pp. 271-274.
- [18] Chiu M.S., Arkun Y., "A methodology for sequential design of robust decentralized control systems," In *Automatica*, 1992, vol. 28, pp. 997-1001, ISSN 0005-1098.
- [19] INTECO. Tower Crane - User's Manual ver. 9.6 [online]. Inteco. 63 s. [cit: 2020-02-10] Dostupné na: <https://a-lab.ee/man/Towercrane-user-manual.pdf>

- [20] Johansson K. H. and Nunes J. L. R., "A multivariable laboratory process with an adjustable zero," Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207), 1998, pp. 2045-2049 vol.4, doi: 10.1109/ACC.1998.702986.
- [21] Johansson K. H., "The quadruple-tank process: a multivariable laboratory process with an adjustable zero", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 8 (3), 2000, 456-465.
- [22] Kelemen M. a Bagchi A., "Modeling and feedback control of a flexible arm of a robot for prescribed frequency domain tolerances", Automatica, 1993, 29, 899-909.
- [23] Kozáková A. a Bucz Š., "Multilop control of a drum boiler, " In Journal of Electrical Systems and Information Technology, Vol. 1, Iss. 1 (2014), s. 26-35. ISSN 2314-7172.
- [24] Kozáková A. a Veselý V., "A Unified Frequency Domain Method for Designing Robust Decentralized Controllers., " In Large Scale Complex Systems Theory and Applications: 13th IFAC Symposium. Sanghai, China, Shanghai: IFAC, 2013,s.266-271. ISBN 978-3-902823-39-7.
- [25] Kozáková A. a Veselý V., "Independent Design of Decentralized Controllers in the Frequency domain, " In Periodica Polytechnica- Electrical Engineering, Vol. 51, No. 1-2 (2007), s.33-41. ISSN 0324-6051.
- [26] Kozáková A., Veselý V. a Kučera V., "Robust decentralized controller design based on equivalent subsystems", Automatica, 2019, vol.107, pp. 29-35.
- [27] Kozáková A. a Veselý V., "Robust Decentralized Controller Design for Systems with Additive Affine-Type Uncertainty, " In International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 3, No. 5 (2007), s.1109-1120. ISSN 1349-4198.
- [28] Kozáková A., "Návrh robustných regulátorov pre viacrozmerové dynamické systémy vo frekvenčnej oblasti", Bratislava: Slovenská chemická knižnica - STU v Bratislave, Radlinského 9, 2016, pp. 82. ISBN 978-80-89597-45-1.
- [29] Kozáková A., Čápková R. Puleva T., "Robust controller design for a boiler-turbine unit," In 2022 Cybernetics & Informatics (K&I). Proceedings; 31st International Conference; 11-14 September 2022 Visegrád, Maďarsko, Massachusetts, USA: IEEE, 2022, [6] s. ISBN 978-1-6654-8775-7.
- [30] Kozáková A., Čápková R., Bucz Š., "Tuning methods to attenuate oscillatory load-disturbance response: A comparative study, " In ACCS/PEIT 2019: 6th International conference on advanced control circuits and systems; 5th International conference on new paradigms in electronics & information technology. Hurghada, Egypt. November 17-20, 2019. Danvers: IEEE, 2019, S. 197-202. ISBN 978-1-7281-6354-3.
- [31] Kozáková A., Veselý V. a Osuský J., "A New Nyquist-Based Technique for Tuning Robust Decentralized Controllers, " In Kybernetika, Vol. 45, No. 1 (2009), s.63-83. ISSN 0023-5954.
- [32] Kozáková A., Veselý V., "Robust Decentralized Controller Design: Independent Design, " In IFAC Workshop „Applications of Large Scale Industrial Systems“ ALSIS' 06. Helsinki – Stockholm, August 30-31, 2006.
- [33] Lakshmi K., Rajesh T., Anusuya D., Prowince P. G. and Pranesh B., "Design and Implementation of Multivariable Quadruple tank system with different PID tuning control techniques," 2019 International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering (ICACCE), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICACCE46606.2019.9079983.
- [34] Laughlin D. L., Morari M. a Braatz R. D., "Robust Performance of Cross-directional Basis-weight Control in Paper Machines, " Great Britain, 1989.
- [35] Mahdi Alavi S. M., Saif Mehrdad, "A QFT-Based Decentralized Design Approach for Integrated Fault Detection and Control, " in IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 20, no. 5, pp. 1366-1375, Sept. 2012, doi: 10.1109/TCST.2011.2162646.
- [36] Minár M., Čápková R., Kozáková A., Goga V., "Experimental modelling and control of a tower crane using Nichols chart," In Applied mechanics 2019: 21st International conference. Ostravice,

- Czech Republic. April 17-19, 2019. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2019, S. 135-140. ISBN 978-80-248-4287-5.
- [37] Moura Oliveira P. B., Vrančić Damir, "Underdamped Second-Order Systems Overshoot Control," IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 3, 2012, Pages 518-523, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823182.
 - [38] Muthukumar N., Gomathi V., Ramkumar K. and Balasubramanian G., "Prediction based optimal control of a quadruple tank process," 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013, pp. 685-690, doi: 10.1109/ICCPCT.2013.6529033.
 - [39] Numsomran A., Suksri T., Tipsuwanporn V., Trisuwannawat T. and Tirasesth K., "Design of PI Controller using decoupling and CRA techniques for quadruple-tanks process," 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, 2011, pp. 1358-1363.
 - [40] Numsomran A., Tipsuwanporn V. and Tirasesth K., "Modeling of the modified Quadruple-Tank Process," 2008 SICE Annual Conference, 2008, pp. 818-823, doi: 10.1109/SICE.2008.4654768.
 - [41] Numsomran A., Tipsuwanporn V., Trisuwannawat T. and Tirasesth K., "Design of PID controller for the modified quadruple-tank process using inverted decoupling technique," 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, 2011, pp. 1364-1368.
 - [42] Osmon C., Pachter M. a Houpis C. H., "Active flexible wing control using QFT". IFAC 13th World Congress, vol. H, San Francisco, 1996, CA, pp. 315-320.
 - [43] Rasmussen S. J. a Houpis C. H., "Development implementation and flight of a MIMO digital flight control system for an unmanned research vehicle using quantitative feedback theory", Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control, Winter Annual Meeting of ASME, Chicago, IL, 1994.
 - [44] Reynolds O. R., Pachter M. a Houpis C. H., "Design of a subsonic flight control system for the Vista F-16 using quantitative feedback theory", Proceedings of the American Control Conference, Baltimore, 1994, MD, pp. 350-354.
 - [45] Rosinová D. and Kozáková A., "Robust decentralized PID controller design" in Introduction to PID controllers — theory tuning and application to frontier areas Part 3 (Multivariable systems — Automatic tuning and adaptation), Rijeka, Croatia: InTech, pp. 133-168, 2012.
 - [46] Rueda T. M. a Velasco F. J., "Robust QFT controller for marine course-changing control", 5th International Symposium on QFT and Robust Frequency Domain Methods, Pamplona, Spain, 2001, pp. 67-72.
 - [47] Skogestad S. and Postlethwaite I., "Multivariable feedback control: analysis and design", 2nd repr. ed. Chichester: John Wiley, 2008, pp. 585. ISBN 0-470-01168-8.
 - [48] Skogestad S., Morari M., "Robust performance of decentralized control systems by independent designs, " Automatica, 1989, vol. 25, no. 1, pp. 119-125, ISSN 0005-1098.
 - [49] Tetsuaki N., "Auto-tuning of Vibration Suppression FIR Filter Using Adaptive Filter in Servo System, Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers", 2018, Volume 54, Issue 1, Pages 129-137, 2018, Online ISSN 1883-8189, Print ISSN 0453-4654, <https://doi.org/10.9746/sicetr.54.129> (in Japanese).
 - [50] Veselý V. a Harsanyi L., "Robustné riadenie, Aplikácie", Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave v Nakladateľstve STU, Vazovova 5, 2015, pp. 222. ISBN 978-80-227-4339-6.
 - [51] Veselý V., Rosinová D. and Kozáková A., "Robust Controller Design: New Approaches in the Time and the Frequency Domains. In Robust Control, Theory and Applications, " Rijeka: Intech, Croatia, 2011. ISBN 978-953-307-229-6.
 - [52] Virgul'a P., "Robustné riadenie", Diplomová práca. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2015, p. 80.
 - [53] Wen-Hua Ch. and Ballance D. J., "Stability Analysis On the Nichols Chart and Its Application in QFT, " Glasgow, August, 1997.