

АДАПТИВНО УПРАВЉАЊЕ КРАНОМ ПРИМЈЕНОМ „GAIN-SCHEDULING “
АЛГОРИТМА

A GAIN-SCHEDULING APPROACH FOR ADAPTIVE CRANE SYSTEM CONTROL

Ања Буљевић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – Тема овог рада јесте пројектовање адаптивног регулатора за управљање 3Д краном. Задатак овог регулатора јесте да управља позицијом крана уз стабилизацију терета током кретања тј. смањења његових осцилација. С обзиром на промјенљиву дужину клатна на ком је објешен терет, мијења се и динамика система, па је због тога неопходно имплементирати адаптивни регулатор. Адаптивни алгоритам који је кориштен у овом раду је gain-scheduling (ГС). Имплементирани су следећи регулатори: линеарни регулатор по стањима, линеарни регулатор по излазима и линеарни регулатор по излазима са интегралним дејством, а затим су сви њихови одзиви упоређени.

Кључне речи: 3Д кран, адаптивни регулатор, ГС

Abstract –The main purpose of this paper is designing adaptive controller for controlling 3D Crane system. This controller has a task to control a position of this crane providing that the payload on the crane makes as smaller as possible oscillations. The payload is hanging on pendulum which length can be changed and due to this fact it is necessary to implement adaptive controller. Adaptive algorithm that was used in this paper is called gain-scheduling (GS). Following controllers are implemented: linear state-space controller, linear output feedback controller and linear output feedback controller with integral component, and after that their responses are compared.

Keywords: 3D crane, adaptive controller, GS

1. УВОД

Кранови се користе у многим индустријама, фабрикама и магацинима како би пренијели терете са једног мјеста на друго. Иако у пракси најчешће срећемо човјека како управља овим машинама, аутоматизовани системи би били доста безбједнији за човјека, али и прецизнији.

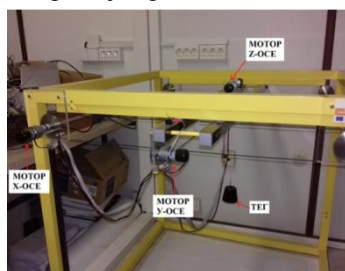
У литератури се могу пронаћи различити математички модели 3Д крана, као и различите технике за управљање краном [1], [2].

Inteco® 3D Crane [3] је лабораторијски модел 3Д крана чији се рад контролише уз помоћ рачунара.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Мирна Капетина, доцент.

Он представља нелинеарни електромеханички систем који има комплексно динамичко понашање и ствара занимљиве и изазовне проблеме приликом управљања. Изглед 3Д крана је приказан на слици 1.



Слика 1. Изглед 3Д крана

Први задатак овог рада био је формирање математичког модела 3Д крана који би на адекватан начин описивао динамику реалног система. Након тога је било неопходно естимирати непознате параметре модела и естимација је урађена методом најмањих квадрата [4]. Централно мјесто у овом раду заузима пројектовање адаптивног управљачког алгоритма који би обезбједио помјерање терета до жељене позиције, његову стабилизацију током промјене положаја и смањење његових осцилација. Проблем се јавља када се мијења дужина клатна јер се тада параметри модела мијењају, па самим тим и параметри регулатора који су подешени за једну висину нису више одговарајући. Проблем је ријешен примјеном адаптивног управљања који се заснива на регулатору са промјенљивим (табличним) појачањем (gain-scheduling, ГС)

2. ФОРМИРАЊЕ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА 3Д КРАНА

Као што је већ напоменуто, кран је веома нелинеаран комплексан динамички систем уколико се посматра са свим својим величинама и промјенљивом дужином клатна што изазива доста проблема у управљању. Међутим, за потребе управљања није неопходно посматрати такав сложен систем у цјелини, већ је довољно да се полазни нелинеарни систем опише поједностављеним линеарном моделом. За потребе овог рада описана је динамика кретања крана по једној оси и формиран је следећи математички модел

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_{22}x_2 + b_2u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= a_{43}x_3 + b_4u \end{aligned} \quad (1)$$

гдје је:

- x_1 - удаљеност шина са колицима од нулте позиције рама ,
- x_2 - брзина кретања шина са колицима,
- x_3 - угаони помјерај,
- x_4 - угаона брзина.

Прве двије једначине модела описују динамику кретања крана по позицији, а друге двије једначине дају динамику кретања угла крана. Примјећујемо да су једначине које описују кретање по позицији и отклон угла међусобно независне.

3. ЕСТИМАЦИЈА ПАРАМЕТАРА 3Д КРАНА

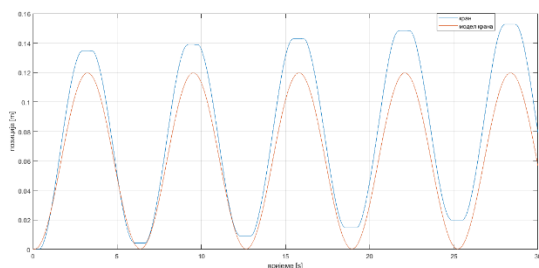
Естимација параметара подразумева проналазак непознатих параметара датог система. У овом раду је урађена офлајн естимација параметара и параметри који су требали да се идентификују су a_{22}, a_{43}, b_2, b_4 за x и y -осу. Као што је већ напоменуто, у моделу крана (1) позиција не утиче на угао, као ни угао на позицију. Због ове чињенице, модел је посматран из два дијела па су параметри a_{22} и b_2 естимирани независно од параметара a_{43} и b_4 . 3Д кран има промјенљиву дужину клатна и у зависности од дужине клатна, параметри математичког модела се мијењају, па је естимација параметара одрађена за 3 различите дужине: $l=0.05m, l=0.278m$ и $l=0.5m$. Метод који је кориштен за естимацију параметара a_{22}, b_2 , који се односе на дио модела кретања крана по позицији, је метод најмањих квадрата [5]. Алгоритам је такав да захтјева богат побудни сигнал, тако да је на улаз система доведен сигнал сљедећег облика $u(t) = 0.2 \sin(\pi t + 0.23) + 0.3 \sin(0.2\pi t)$. (2) Након нумеричке симулације добијени су сљедећи резултати за x -осу и y -осу (Табела 1.).

Табела 1. Добијени естимирани параметри за x и y осу за $l=0.278m$

	a_{22}	b_2
x	-10	2
y	-6	2.75

Дужина клатна не утиче на промјену непознатих параметара модела крана који описује кретање крана по позицији, тако да за било коју дужину клатна, математички модел позиције остаје исти.

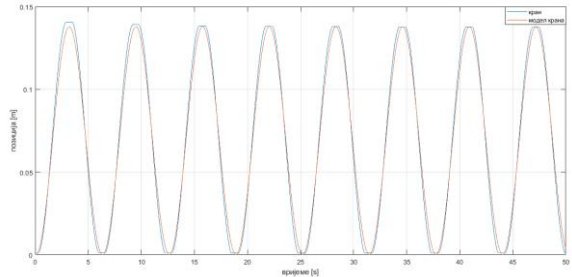
На сликама 3. и 4. је дат упоредни приказ понашања 3Д крана и његовог математичког модела за x и y -осу када је дужина клатна $l=0.278m$. Понашање система је слично и за остале дужине клатна, па ти одзиви неће бити приказани у наставку.



Слика 3. Одзив крана и модела позиције за x -осу

Током времена долази до „клизања” 3Д крана у једну страну, па можемо закључити да је кран „дефектан”,

односно не ради у потпуности на исправан начин по x -оси. Због тога осцилације правог крана на слици 3. нису константне амплитуде иако би требале да буду на периодичан управљачи сигнал $u(t)$ дат изразом (2). Такође, из тог разлога изгледа да пројектовани модел са естимираним параметрима не прати добро реални систем што није случај.



Слика 4. Одзив крана и модела позиције за y -осу

На основу слика 3. и 4. и објашњења везаног за x -осу можемо закључити да добијени математички модел адекватно описује кретање крана по позицији.

Метод најмањих квадрата је ткђ. кориштен за естимацију параметара a_{43} и b_4 који описују динамику угла, међутим резултати који су добијени нису били задовољавајући због превеликог утицаја сопствених осцилација. Овај проблем је ријешен тако што су параметри одређени експерименталним путем за 3 дужине: $l = 0.05m, l = 0.278m$ и $l = 0.5m$. Експеримент је био сљедећи: посматрана је промјена угла без дјеловања улазне силе. Наравно, тада је помјерај угла 0 rad/s . Након тога, клатно са тегом се ручно изведе из равнотежног стања што доводи до осцилација клатна. Уочено је да је овакво кретање својствено за осцилаторе другог реда и може се моделовати следећом функцијом преноса

$$G(s) = \frac{-k_\theta}{s^2 + 2\varepsilon\omega_0 s + \omega_0^2}$$

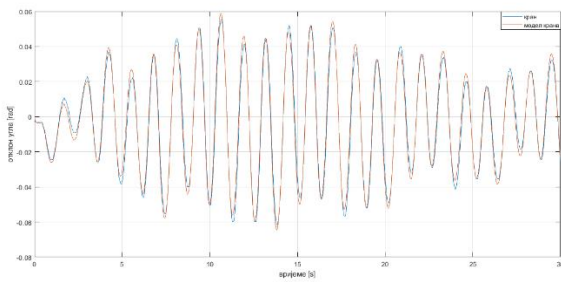
Параметар ω_0 је увијек позитиван и назива се **непригушеном природном учестаношћу**. Параметар ε је **коэффициент релативног пригушења**, а k_θ је **појачање система** и рачуна се по формули $k_\theta = \omega_0^2$.

Анализом снимљених осцилација клатна, мјерењем периоде осциловања, амплитуде и времене смирења осцилација, одређене су вриједности тражених параметара $\omega_0, \varepsilon, k_\theta$ и приказане су у Табели 2.:

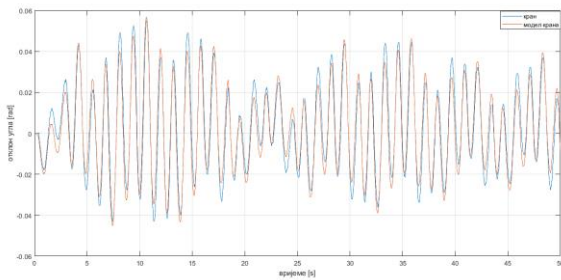
Табела 2. Добијени параметри модела за x и y -осу

	x-оса			y-оса		
l	0.005	0.278	0.5	0.005	0.278	0.5
ε	0.001	0.0025	0.03	0.001	0.0021	0.03
ω_0	5.926	4.654	3.927	5.8	4.8375	3.9
k_θ	35.124	21.661	15.423	33.64	23.401	15.21

На сликама 5. и 6. приказан је упоредни одзив крана и модела отклона угла за дужину клатна $l=0.278\text{m}$.



Слика 5. Одзив крана и модела отклона угла за x-осу



Слика 6. Одзив крана и модела отклона угла за y-осу

4. УПРАВЉАЊЕ 3Д КРАНОМ КОРИШЋЕЊЕМ ГС АЛГОРИТМА

Како се мијења динамика процеса са промјеном дужине клатна, а тиме и параметри модела процеса, за управљање краном неопходно је било примјенити адаптивни алгоритам. У овом случају одабран је ГС метод [6] који подразумијева формирање табеле параметара регулатора за различите радне тачке процеса. Управљачке структуре које су кориштене за управљање 3Д краном, а тиме и за формирање ГС скупа параметара регулатора, су регулатор по стањима, регулатор по излазима и регулатор по излазима са естимацијом поремећаја. У наставку ће бити приказани резултати за сваки од тих алгоритама, а затим ће њихови одзиви бити упоређени. Симулације су направљене тако да се референца за x и y-осу мијења током времена, а ткђ. се и дужина клатна мијења током времена. За сва 3 типа регулатора ће бити приказани одзиви за x и y-осу, промјена дужина клатна (слике 7., 9. и 11.), као и отклони углова (слике 8., 10. и 12.). ГС алгоритам је имплементиран тако да се интерполацијом рачунају параметри када се систем нађе изван радне тачке. Параметри система који су се мијењали су ω_0 , ε , k_θ . Наравно, у зависности од ових параметара, мијењају се појачања регулатора односно обсервера.

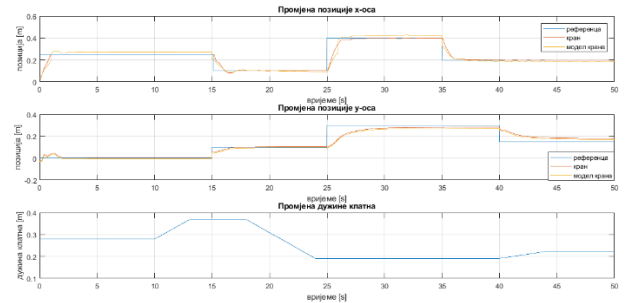
4.1. Линеарни регулатор по стањима процеса

Први управљачки закон који је имплементиран је био линеарни регулатор по стањима процеса [7].

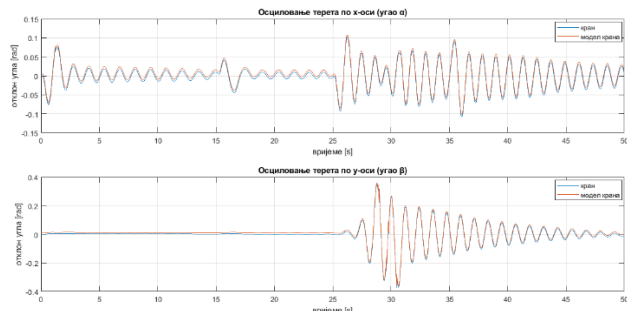
x-оса: Експерименталним путем је одређено да се најбољи резултати добију ако се полови система (1) у затвореној спреси поставе на $[-5, -4, -4, -4]$. Вриједности појачања регулатора се рачунају кориштењем Акерманове формуле, с тим што се

параметри регулатора адаптивно мијењају у зависности од дужине клатна.

y-оса: За y-осу се најбољи резултати добију ако се полови система у затвореној спреси поставе на $[-2, -1, -5, -3]$. Вриједности појачања регулатора се рачунају ткђ. по Акермановој формули.



Слика 7. Одзив крана по позицији и промјена дужине конопаца-регулатор по стањима



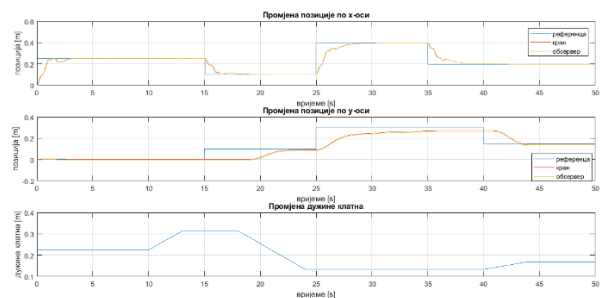
Слика 8. Отклони углова α и β терета - регулатор по стањима

4.2. Линеарни регулатор по излазима процеса

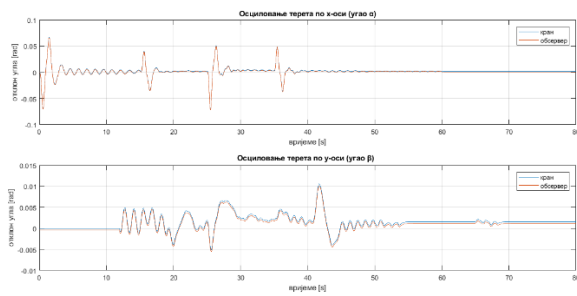
Линеарни регулатор по излазима процеса, [7], подразумијева регулатор по стањима и обсервер.

x-оса: Полови система у затвореној спреси су $[-5, -4, -4, -4]$. Полови обсервера морају бити бржи од полова система и за полове обсервера су узете вриједности $[-2\pi, -2\pi, -2\pi, -2\pi]$. Кориштењем Акерманове формуле добијамо вриједности појачања регулатора и обсервера.

y-оса: Полови система у затвореној спреси су $[-2, -1, -5, -3]$. Полови обсервера за y-осу су изабрани да буду $[-3\pi, -3\pi, -3\pi, -3\pi]$.



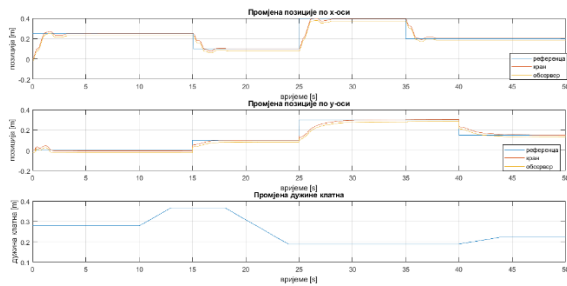
Слика 9. Одзив крана по позицији и промјена дужине конопаца-регулатор по излазима



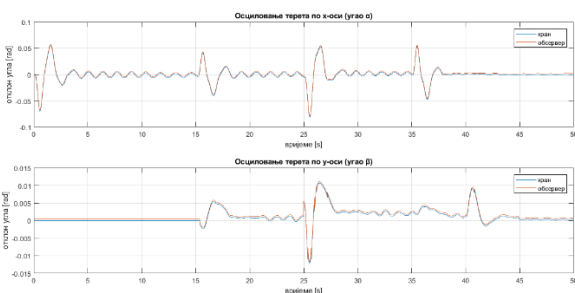
Слика 10. Отклони углова α и β терета - регулатор по излазима

4.3. Линеарни регулатор по излазима процеса са естимацијом поремећаја

Овај тип регулатора подразумева истовремену естимацију стања и поремећаја и по правилу, овај тип регулатора је знатно отпорнији на несавршености у односу на друге типове регулатора [7]. Полови у затвореној спреси, као и полови обсервера за обје осе су исти као код линеарног регулатора по излазима процеса.



Слика 11. Одзив крана по позицији и промена дужине кононца- регулатор по излазима са естимацијом поремећаја



Слика 12. Отклони углова α и β терета - регулатор по излазима са естимацијом поремећаја

4. ЗАКЉУЧАК

Упоредивши одзиве ова три регулатора можемо рећи да сваки од њих даје и више него задовољавајуће резултате. Уколико посматрамо одзив крана по позицији видимо да се најбољи резултати добију када се користи линеарни регулатор по излазима процеса са естимацијом поремећаја. Коришћењем овог регулатора, кран успијева да се позиционира на тачно одређене позиције које му се задају без обзира на дужину клатна. Нешто лошији резултати се добијају линеарним регулатором по излазима, који за једну промјену позиције на у-оси има малу грешку у устаљеном стању. Што се тиче линеарног регулатора

по стањима, и он има мале грешке у устаљеном стању. Посматрајући отклоне углова долазимо до аналогног закључка: линеарни регулатор по излазима процеса са естимацијом поремећаја најбоље стабилише осциловање терета, док линеарни регулатор по стањима прави највеће осцилације. Треба нагласити да су највеће осцилације које се јављају код регулатора по стањима 0.1 rad , што је јако мало, док су углови који се јављају уколико се управља регулатором по излазима процеса са естимацијом поремећаја приближни 0 rad .

На крају можемо закључити да су се теоретске формулације ових регулатора са свим својим врлинама и манама показале довољно добрим у пракси и оправдале своју примјенљивост у управљању сложенијим системима као што је 3Д кран.

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] X. Wu and X. He, "Partial feedback linearization control for 3-D under actuated overhead crane systems", ISATransactions, 65, 361–370., 2016.
- [2] S.Y.S. Hussein and R. Ghazali and H.I. Jaafar, and C.C. Soon, "Analysis of 3D gantry crane system by pid and vsc for positioning trolley and oscillation reduction", Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering, 8(7), 139–143, 2016.
- [3] 3D Crane User's Manual. <http://control.put.poznan.pl/old/sites/default/files/3DCrane.pdf> (приступљено у августу 2019.)
- [4] Rudolph Emil Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems", Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82(Series D):35–45, 1960.
- [5] Мирна Капетина, "Адаптивна естимација параметара система описаних ирационалним функцијама преноса", <http://www.ftn.uns.ac.rs/n1579068189/disertacija> (приступљено у августу 2019.)
- [6] D.J. Leith, W.E. Leithead, "Gain-scheduled controller design: an analytic framework directly incorporating non-equilibrium plant dynamics", <https://pdfs.semanticscholar.org/7d45/07472fbc2f34e09e73769b32afa11b3c26d.pdf>
- [7] Милан Р. Рапаић, Зоран Д. Јеличић., "Пројектовање линеарних регулатора и естиматора у простору стања", Факултет техничких наука, Нови Сад, 2014.

Кратка биографија:



Ања Буљевић рођена је у Београду 1996. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Аутоматика и управљање системима одбранила је 2019. год.
контакт: mail.anjabuljevic@uns.ac.rs