

PID VALDIKLIS IR JO PARAMETRŲ PARINKIMAS ORLAIVIO STABILIAM SKRYDŽIUI

Mindaugas Kulbis

Aviacijos prietaisų katedra
el. p. mindaugas.kulbis@stud.vgtu.lt

Santrauka. Šiame straipsnyje nagrinėjamas proporcinis integrinis diferencinis valdiklis (toliau – PID valdiklis), jo veikimas bei pagrindiniai valdiklio parametrai. Aptariama, kaip pasiekiamas proceso stabilumas ir kokias sąlygas atitinka stabilus procesas. Apžvelgiamos Ziegler–Nichols ir AMIGO parametų parinkimo taisyklės PID valdikliui bei siūlomos taikyti AMIGO parametų parinkimo taisyklės orlaivių automatinio valdymo sistemų valdikliams. Pateikiama kituose šaltiniuose neminima, automatinio valdymo sistemų suvėlinimo išraiška.

Reikšminiai žodžiai: PID valdiklis, AMIGO, sistemos suvėlinimas, parametų parinkimas, stabilus skrydis.

1. Įvadas

Autonominio orlaivio automatinė valdymo sistema, tai tokia sistema, kuri sudaryta iš daugybės įvairių dalių: skaičiavimo sistemos, kurią sudaro mikroprocesorius, aerodinamines plokštumas valdančios pavaros bei įvairiausi jutikliai ir giroroskopai.

Orlaivio automatinės valdymo sistemos tikslas yra užtikrinti orlaivio stabilų skrydį. Jei automatinė valdymo sistema negali apdoroti duomenų, ji gali išeiti už stabilumo ribų ir tuomet skrydis tampa nestabilus.

Tiek autonominių, tiek ir kitų orlaivių automatinės valdymo sistemos valdymo uždaviniams spręsti dažniausiai naudoja PID valdiklius (Guowei *et al.* 2011). Juos naudojant galima įgyvendinti tikslus valdymo reikalavimus, tačiau, norint, kad sistema būtų stabili, reikia tinkamai parinkti šių valdiklių parametrus.

Šiame tyrime bus gilinamasi į PID valdiklį ir jo parametų parinkimo metodikas. Kaip alternatyva dažniausiai naudojami (Luo *et al.* 2010) Ziegler–Nichols parametų parinkimo metodikai, bus siūloma AMIGO parametų parinkimo metodika, kuri yra paprastai pritaikoma ir užtikrina geresnes stabilumo savybes.

Bus pateikta automatinės valdymo sistemos supaprastintą suvėlinimo išraišką, kurią sudarė tyrimo autorius ir kuri kituose šaltiniuose nėra minima.

2. Valdymas PID valdikliu

PID valdiklis yra plačiausiai naudojamas valdiklis industrijoje, nes jį lengviausia realizuoti ir eksploatuoti. Pats valdiklis yra tiesinis, tačiau veikia ir netiesinėse sistemose (Johansen 2004).

PID valdiklio paskirtis yra klaidos signalą (skirtumą tarp norimo signalo ir esamo) padaryti kaip įmanoma mažesnę, kitaip tariant, artinti jį prie nulio (Johansen 2004):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} x_d - x \rightarrow 0, \quad (1)$$

Šis tikslas gali būti pasiektas naudojant skirtingus PID variantus (Johansen 2004). Jie yra:

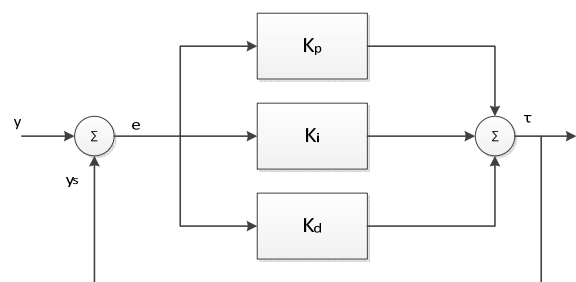
- Proporcinis (P) valdiklis;

- Proporcinis - integrinis (PI) valdiklis;
- Proporcinis - diferencinis (PD) valdiklis;
- Proporcinis - integrinis - diferencinis (PID) valdiklis.

Gali būti naudojami visi šie valdikliai atsižvelgiant į tai, koks sistemos atsakas yra reikalingas. Matematiškai PID valdiklis yra išreiškiamas taip (Cds... 2000):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t), \quad (2)$$

čia K_p , K_i , K_d , atitinkamai yra proporcinės, integrinės ir diferencinės reikšmės perdavimo koeficientas, t – proceso valdymo signalas. Jeigu nustatysime vieną ar du perdavimo koeficientus nuliui, gausime prieš tai minėtus valdiklius P, PI ir PD (Johansen 2004). PID valdiklio blokinė diagrama matyti 1 pav.



1 pav. PID valdiklio blokinė diagrama (Johansen 2004)

Fig. 1. PID controller block scheme (Johansen 2004)

Proporcinė komponentė K_p priklauso tik nuo įėjimo signalo ir proceso kintamojo skirtumo. Šis skirtumas geriau žinomas kaip klaida. K_p apibūdina išėjimo signalo kitimą atsižvelgiant į klaidos signalą. Taigi didindami proporcinio perdavimo koeficientą, pagreitiname sistemos atsaką. Tačiau, jei proporcinis perdavimo koeficientas yra per didelis, proceso kintamojo signalas pradės svyruoti, o tai reiškia, kad sistema pasidarys nestabili (National... 2011).

Integrinė komponentė K_i yra klaidos kitimas bėgant laikui. Gauname, kad net ir maža klaidos reikšmė privers integrinę komponentę didėti lėtai. Integrinis atsakas nuo-

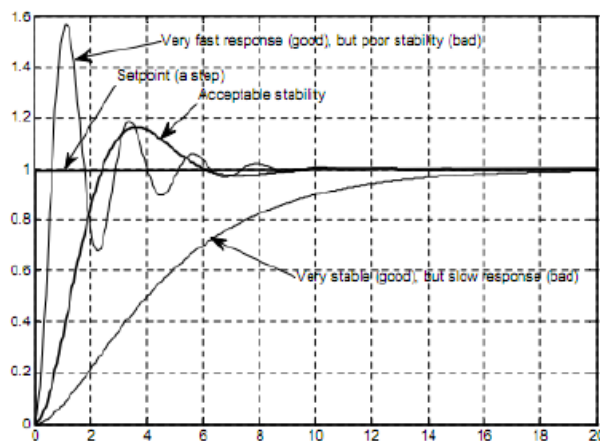
lat augs bėgant laikui, nebent klaida priartės prie nulio. Taigi tikslas yra privesti klaidą prie nulio. Klaida yra galutinis skirtumas tarp proceso kintamojo ir įėjimo signalo (atstojamosios vertės). Kartais gali nutikti taip, kad integracijos veiksmas priverčia valdiklio signalą švytuoti, taip neleidamas valdikliui mažinti klaidos signalo iki nulio (National... 2011).

Diferencinė komponentė K_d priverčia išėjimo signalą mažėti, jeigu proceso kintamasis staigiai didėja. Diferencinis atsako signalas yra proporcingas proceso kintamojo kitimo greičiui. Didindami integravimo laiką priverčiame valdymo sistemą stipriau reaguoti į pasikeitimus klaidos signalu; taip padidindamas visos valdymo sistemos atsako signalo greitis. Praktiškiausios valdymo sistemos naudoja labai mažą integravimo laiką, nes integravimo atsakas proceso kintamajame yra labai jautrus triukšmui. Jeigu jutiklio grįžtamąjį ryšį veikia triukšmas, išvestinės komponentės atsakas gali padaryti sistemą nestabilia (National... 2011).

Proporcinė komponentė K_p gali sumažinti sistemos atsako signalo kilimo laiką ir sumažinti, bet nepašalinti klaidos signalo. Integrinė komponentė K_i gali panaikinti klaidos signalą įėjime, bet tai padarys laikiną atsaką lėtesniu. Diferencinė komponentė K_d gali padidinti valdymo sistemos stabilumą sumažindama atsako signalo norimos vertės viršijimą ir taip pat gali pagerinti laikiną atsako signalą (Control... 2014). Kiekvieno PID valdiklio parametro (K_p , K_i , K_d) įtaka valdymo sistemos atsako signalui matyti 1 lentelėje.

PID valdiklio stabilumas pasiekiamas teisingai parenkant K_p , K_i ir K_d perdavimo koeficientų reikšmes (Jo-

hansen 2004). Proceso stabilumo grafinis vaizdas matyti 2 paveiksle.



2 pav. Proceso stabilumo grafinis atvaizdavimas (Johansen 2004)

Fig. 2. Process stability graphical expression (Johansen 2004)

Šie parametrai parenkami taip, kad klaidos signalas konverguotų iki nulio. Norint surasti K_p , K_i ir K_d vertes, reikia naudoti parametų parinkimo taisykles (Michigan... 2012) arba išmėginti sistemą su tuo procesu, kurį reikia valdyti. Taip galima gauti nuolatinį norimą signalą. Kai klaidos signalas mažėja iki nulio per norimą laiką ir neturi per didelio norimos vertės viršijimo bei signalo švytimumų, tuomet valdiklis yra stabilus (Johansen 2004).

1 lentelė. PID valdiklio parametų įtaka sistemos atsako signalui (Control... 2014)

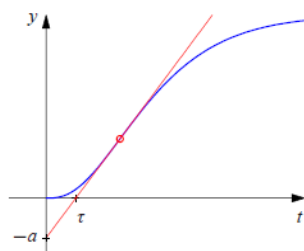
Table 1. PID Controller parameters influence to respondent signal (Control... 2014)

Parametrai	Signalų kilimo laikas	Signalų norimos vertės viršijimas	Signalų nusistovėjimo laikas	Klaidos signalo vertė
K_p	Mažėja	Didėja	Nedidelis pasikeitimas	Mažėja
K_i	Mažėja	Didėja	Didėja	Panaikina
K_d	Nedidelis pasikeitimas	Mažėja	Mažėja	Nieko nekeičia

3. PID valdiklio parametų parinkimo taisyklės

Ziegler ir Nichols PID parametų parinkimo metodikas sugalvojo dar 1940 metais. Šie metodai charakterizuoja proceso dinamiką atsižvelgiant į laiką ir dažnį (Cds... 2000).

Žingsnio atsako metodas remiasi proceso žingsnio atsako, atviro mazgo sistemos dalyje, matavimu. Šis metodas matyti 3 paveiksle:



3 pav. Žingsnio atsako metodas (Cds... 2000)

Fig. 3. Step response method (Cds... 2000)

Žingsnio atsakas matuojamas procese pritaikius žingsnio vieneto įėjimo signalą ir išrašant gaunamą atsaką. Atsakas yra charakterizuojamas parametrais T ir L . Parametras L yra sistemos laiko delsa, o T/L yra giliausias žingsnio atsako nuolydis. Parametras T yra laiko konstanta. Pastebime, kad nėra būtina laukti, kol pasiekama nusistovėjusi būseną tam, kad būtų surasti parametrai. Pakanka palaukti, kol atsakas turės lūžio tašką (Cds... 2000). Žingsnio atsako metodo taisyklės matyti 2 lentelėje.

Žingsnio atsako metodas gali būti pagerintas charakterizuojant žingsnio atsaką parametrais K , τ ir T tokia modelyje (Cds... 2000):

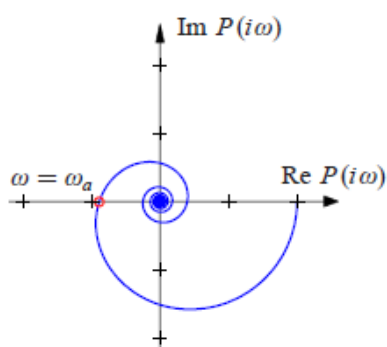
$$P(s) = \frac{K}{1 + sT} + e^{-\tau s}, \quad (3)$$

Parametrai gali būti gaunami pritaikius šį modelį išmatuotam žingsnio atsakui. Šio modelio pritaikymas prideda šiek tiek laiko parametų parinkimui todėl, kad perdavimo koeficiento K radimui reikia laukti tol, kol pasiekama nusistovėjusi būseną (Cds... 2000).

2 lentelė. Žingsnio atsako metodo taisyklės (Nzaier 2013)
Table 2. Step response method rules (Nzaier 2013)

Valdiklio tipas	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2\frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Dažnio atsako metode valdiklis yra sujungtas su procesu, integrinis ir diferencinis perdavimo koeficientai yra prilyginami nuliui, o proporcinis perdavimo koeficientas didinamas tol, kol sistemos atsako signalas pradeda švytuoti (Cds... 2000). Dažnio atsako metodas matyti 4 paveiksle.



4 pav. Dažnio atsako metodas (Cds... 2000)
Fig. 4. Frequency response method (Cds... 2000)

Kritinė proporcinio perdavimo koeficiento reikšmė k_c yra stebima kartu su švytavimo periodu T_c . Pagal Nyquist stabilumo kriterijų (Ece 2004) sistemos mazgo perdavimo funkcija $L = k_c P(s)$ susikerta su kritiniu tašku $\omega_c = 2\pi/T_c$ dažniu. Eksperimentas duoda mums tašką, kuriame, kaip matyti 4 paveiksle, fazė atsilieka per 180° (Cds... 2000). Dažnio atsako metodo taisyklės matyti 3 lentelėje:

3 lentelė. Dažnio atsako metodo taisyklės (Wings 2008)
Table 3. Frequency response method rules (Wings 2008)

Valdiklio tipas	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_c$	∞	0
PI	$0,45K_c$	$\frac{P_c}{1,2}$	0
PID	$0,6K_c$	$0,5P_c$	$\frac{P_c}{8}$

Čia K_c yra kritinė perdavimo funkcija, o P_c yra sistemos švytavimų periodas.

Dažnio atsako metodas gali būti pagerintas matuojant daugiau taškų Nyquist kreivėje. Tai gali būti pasiekama prijungiant integrinę dalį ir ją didinant, kol sistema pasiekia stabilumo ribą. Eksperimentas taip pat gali būti automatizuojamas, panaudojant relinį grįžtamąjį ryšį (Cds... 2000).

AMIGO parametrų parinkimo taisyklės remiasi KLT proceso modeliu, gautu žingsnio atsako eksperimente. Geriausiai žinomos žingsnio atsako taisyklės buvo pami-

nėtos anksčiau. Tai Ziegler–Nichols parametrų parinkimo taisyklės (Eriksson, Johansson 2007).

AMIGO parametrų parinkimo taisyklės buvo sukurtos analizuojant skirtingus parametrus, tokius, kaip eksploatacinės savybės, patikimumas ir kitus (Eriksson, Johansson 2007). Perdavimo koeficiento K parinkimo taisyklė yra tokia:

$$K = \frac{1}{K_p} \left(0,2 + 0,45 \frac{T}{L} \right), \quad (4)$$

čia K_p yra proporcinis perdavimo koeficientas, T – laiko konstanta, L – proceso suvėlinimas. Integruojančios grandies laiko pastoviosios T_i parinkimo taisyklė yra tokia:

$$T_i = \frac{0,4L + 0,8T}{L + 0,1T} L. \quad (5)$$

Diferencijuojančios grandies laiko pastoviosios T_d parinkimo taisyklė yra tokia:

$$T_d = \frac{0,5LT}{0,3L + T}, \quad (6)$$

Norint naudoti AMIGO parametrų parinkimo taisykles sistemoje kartu su filtru, taisyklės yra praplečiamos (Eriksson, Johansson 2007):

$$\begin{cases} k = K \\ k_i = \frac{K}{T_i} \\ k_d = K \cdot T_d \end{cases} \begin{cases} b = \begin{cases} 0, & \text{jei } \tau \leq 0,5 \\ 1, & \text{jei } \tau \geq 0,5 \end{cases} \\ c = 0 \\ T_f = \begin{cases} \frac{0,05}{\omega_{gc}}, & \text{jei } \tau \leq 0,2 \\ 0,1 \cdot L, & \text{jei } \tau \geq 0,2. \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

čia ω_{gc} yra perdavimo koeficiento persikirtimo dažnis.

Atliktas AMIGO ir Ziegler–Nichols parametrų parinkimo taisyklių tyrimas (Awoulda, Mamat 2010) rodo, kad sistemos signalas, gautas naudojant AMIGO parametrų parinkimo taisykles, švytuoja mažiau. Ziegler–Nichols parametrų parinkimo taisyklėmis gauti parametrai sukelia didesnius švytavimus sistemoje, todėl pati sistema gali išeiti už stabilumo ribų (Awoulda, Mamat 2010). Taip pat sistemos signalo nusistovėjimo laikas yra mažesnis bei signalo norimos vertės viršijimas nesiekia kelių procentų. Remiantis šiais tyrimų rezultatais galime pasiūlyti taikyti AMIGO parametrų parinkimo taisykles aviacijoje.

4. Valdymo sistemos suvėlinimas

AMIGO parametrų parinkimo taisyklės taip pat atsižvelgia ir į suvėlinimą.

Valdymo sistemos suvėlinimą sudaro skaičiavimo sistemos suvėlinimas, kuris priklauso nuo mikrovaldiklio darbo ir apdorojamų duomenų kiekio bei programos kodas. Taip pat suvėlinimą iššaukia valdomos pavaros, orlaivio valdymo plokštumos bei paties orlaivio atsakas į valdymo plokštumų atsilenkimo kampo pasikeitimą ir grįžtamasis ryšys. Supaprastintą suvėlinimo išraiška yra tokia:

$$L = \tau_{skaič.} + \tau_{servo} + \tau_{gr.} + \tau_{orlaivio}, \quad (8)$$

čia $\tau_{skaič.}$ yra skaičiavimo sistemos, mikrovaldiklio suvėlinimas; τ_{servo} – servo mechanizmų suvėlinimas, $\tau_{gr.}$ – grįžtamojo ryšio (jutiklių, giroskopų) suvėlinimas, $\tau_{orlaivio}$ – orlaivio mechaninių dalių, bei orlaivio atsako į valdymo signalą suvėlinimas.

5. Išvados

Naudodami PID valdiklį automatinio valdymo sistemoje, galime užtikrinti orlaivio stabilų skrydį. Tačiau privaloma tinkamai parinkti jo parametrus. Tai galima pasiekti naudojant Ziegler–Nichols parametrų parinkimo taisykles, tačiau jos ne visada gali užtikrinti norimus stabilumo reikalavimus. Bandymais patikrintos AMIGO parametrų parinkimo taisyklės gali būti naudojamos kaip alternatyva plačiausiai naudojamioms Ziegler–Nichols parametrų parinkimo taisyklėms.

Padėka

Dėkoju doc. dr. Ivan Suzdalev už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

- Awoulda, A. E.; Mamat, R. B. 2010. *New PID Tuning Rule Using ITAE Criteria*. Department of Mechatronics and Robotics, Universiti Teknologi Malaysia. 12 p.
- Cds caltech [Dinaminės sistemos] [interaktyvus] 2000. [žiūrėta 2014 gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa04/caltech/am04_ch8-3nov04.pdf
- Control tutorials [Valdymo pradžiamokslio tinklapis, PID valdiklio projektavimas] [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014 gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>
- Ece [Elektronikos ir kompiuterių inžinerijos departamento tinklapis, Nyquist stabilumo kriterijus] [interaktyvus]. 2004. [žiūrėta 2014 gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ece.rutgers.edu/~gajic/psfiles/nyquist.pdf>
- Eriksson, M.; Johansson, M. 2007. Simple PID tuning rules for varying time-delay systems, in *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference* [interaktyvus] [žiūrėta 2014 gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296347/article7.pdf>
- Guowei, C.; Chen, B. M.; Lee T. H. 2011. *Unmanned Rotorcraft Systems*. New York: Springer London Dordrecht Heidelberg. 263 p.
- Johansen, I. H. 2012. *Autopilot Design for Unmanned Aerial Vehicles*. Norwegian University of Science and Technology. 108 p.
- Luo, Y.; Di, L.; Han, J., et al. 2010. *VTOL UAV Altitude Flight Control Using Fractional Order Controllers*. University of Technology, Guangzhou. 6 p.
- Michigan Tech [Standartiniai PID nustatymo metodai] [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2014 gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/tuning_methods.pdf
- National instruments [National instruments svetainė, PID teorijos paaiškinimas] [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2014 gegužės 6 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ni.com/white-paper/3782/en/>
- Nzaier [Ziegler–Nichols parametrų parinkimo metodikos] [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2014 gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: http://www.nzaier.com/nzaierbb/system/uploads/files/Ziegler_Nichols.pdf
- Wings [Buffalo universiteto svetainė, dažnio atsako metodas] [interaktyvus]. 2008. [žiūrėta 2014 Gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://wings.buffalo.edu/eng/mae/courses/mae443/Freq.pdf>

PID CONTROLLER AND IT'S PARAMETERS TUNING FOR AIRCRAFT STABLE FLIGHT CONTROLL

M. Kulbis

Summary

In this article we talk about PID controller and it's main parameters. We take a look in how to make a control process stable and what system performance we should expect from a stable process. We analyze Ziegler–Nichols and AMIGO tuning rules for a PID controller, and we propose to use AMIGO tuning for automatic aircraft control systems. We also propose a control system time delay expression.

Keywords: PID controller, AMIGO, system delay, parameters selection, stable flight.