České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra měření, Katedra řídicí techniky

Úsporný autopilot

Diplomová práca - Letecké informační a řídicí systémy

Dátum odovzdania - január 2006

Autor: **Peter Molitoris**
Vedúci diplomovej práce: **doc. Ing. Zdislav Pech, CSc.**

Obsah

1 Úvod **5**
1.1 Prehlásenie . . . 5
1.2 Zadanie . . . 6
1.3 Definícia úlohy . . . 7

2 Dynamické vlastnosti lietadla - matematický popis **8**
2.1 Pohyb lietadla - základné veličiny . . . 8
2.2 Pohybové rovnice . . . 8
2.2.1 Pozdĺžny pohyb . . . 11
2.2.2 Stranový pohyb . . . 12

I Klasický autopilot **13**

3 Hierarchické úrovne riadenia **13**

4 Autopiloty - úvod **14**
4.1 Úlohy . . . 14
4.2 Štruktúra . . . 14

5 Autopilot pozdĺžneho sklonu **15**
5.1 Štruktúra autopilota . . . 15
5.2 Tlmič . . . 15
5.3 Stabilizátor . . . 17
5.4 Autopilot . . . 18

6 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$ a barometrickej výšky H **20**
6.1 Kinematická rovnica výšky . . . 20
6.2 Základné spôsoby stabilizácie výšky . . . 21
6.3 Stabilizácia výšky s autopilotom pozdĺžneho sklonu . . . 21
6.4 Stabilizácia výšky so stabilizátorom vertikálnej rýchlosti . . . 22
6.4.1 Nastavenie autopilota . . . 22
6.4.2 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti . . . 23
6.4.3 Nastavenie stabilizátora výšky . . . 24
6.4.4 Stabilizácia pri konštantnej, nenulovej hodnote poryvu vetra . . . 24
6.4.5 Vplyv riadenia rýchlosti na stabilizáciu výšky . . . 25
6.4.6 Stabilizácia výšky bez automatu ťahu . . . 25
6.4.7 Zhrnutie . . . 26

7 Let v zostupnej rovine - Glideslope **27**
7.1 Kinematické rovnice . . . 27
7.2 Vlastnosti lietadla pri lete v zostupnom paprsku . . . 28
7.3 Štruktúra autopilota . . . 29
7.4 Nastavenie a výsledky . . . 30
7.4.1 Odolnosť voči vertikálnemu poryvu vetra . . . 32

II Úsporný autopilot **33**

8 Prístrojové vybavenie úsporného autopilota: systém S-TEC S55 **34**
8.1 Prístrojové vybavenie . . . 34
8.2 Módy činnosti . . . 35

9 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$ - mód VS **36**
9.1 Rovnica vertikálnej rýchlosti . . . 36
9.2 Kinematická rovnica normálového zrýchlenia . . . 36
9.2.1 Základná rovnica . . . 36
9.2.2 Linearizácia . . . 37
9.2.3 Výsledný tvar rovnice normálového zrýchlenia . . . 38
9.3 Štruktúra autopilota . . . 38
9.4 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti bez spracovania signálu normálového zrýchlenia a_n . . . 39
9.4.1 Nastavenie tlmiča . . . 39
9.4.2 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti . . . 40
9.4.3 Odolnosť systému voči konštantnému signálu vertikálneho poryvu vetra U_Y . . . 41
9.5 Stabilizácia $\dot{H}$ s uvažovaním signálu normálového zrýchlenia a_n - porovnanie výsledkov . . . 42
9.5.1 Nastavenie tlmiča . . . 42
9.5.2 Nastavenie regulátora normálového zrýchlenia . . . 42
9.5.3 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti - porovnanie so systémom bez regulácie a_n . . . 43
9.5.4 Odolnosť systému voči konštantnému signálu vertikálneho poryvu vetra U_Y . . . 44
9.6 Zhrnutie . . . 45
9.7 Vplyv automatu ťahu . . . 45
9.7.1 Odpojenie automatu ťahu . . . 45
9.7.2 Návrh bez automatu ťahu . . . 46
9.8 Priblíženie druhé - návrh s derivátorom normálového zrýchlenia . . . 49
9.8.1 Nastavenie tlmiča derivácie zrýchlenia - $K_{\dot{a_n}}$ a ostatných spätných väzieb 50
9.8.2 Výsledná prechodová charakteristika a potlačenie vertikálneho poryvu vetra U_Y . . . 52
9.8.3 Návrh s automatom ťahu . . . 52
9.9 Priblíženie tretie - návrh s derivátorom a tlmičom normálového zrýchlenia . . . 54
9.9.1 Nastavenie a výsledky . . . 54
9.9.2 Návrh s automatom ťahu . . . 55
9.10 Porovnanie jednotlivých riešení . . . 56
9.10.1 Porovnanie pre nastavenia bez automatu ťahu . . . 56
9.10.2 Porovnanie konfigurácií s automatom ťahu . . . 57
9.10.3 Zhrnutie . . . 58

10 Stabilizácia barometrickej výšky H - mód ALT **59**
10.1 Nastavenie bez automatu ťahu . . . 60
10.1.1 Priblíženie prvé - stabilizácia s tlmičom normálového zrýchlenia . . . 60
10.1.2 Priblíženie druhé - stabilizácia s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia 62
10.1.3 Priblíženie tretie - stabilizácia s tlmičmi $\dot{a_n}$ a a_n . . . 64

10.2 Nastavenie s automatom ťahu 65
10.2.1 Priblíženie prvé - stabilizácia s tlmičom normálového zrýchlenia 65
10.2.2 Priblíženie druhé - stabilizácia s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia 66
10.2.3 Priblíženie tretie - stabilizácia s tlmičmi $\dot{a_n}$ a a_n 66
10.3 Porovnanie jednotlivých riešení 67
10.3.1 Porovnanie výsledkov pre konfigurácie bez automatu ťahu 67
10.3.2 Porovnanie výsledkov pre konfigurácie s automatom ťahu 68
10.3.3 Zhrnutie 68

11 Let v zostupnom paprsku - mód Glideslope 70
11.1 Štruktúra 70
11.2 Programu výpočtu autopilota, nastavenie a výsledky 72
11.2.1 Nastavenie tlmiča rýchlych kmitov 72
11.2.2 Nastavenie tlmiča normálového zrýchlenia a_n 73
11.2.3 Nastavenie regulátora $\dot{\varepsilon}_{GS}$ 74
11.2.4 Vplyv vertikálnej zložky vetra U_Y 77
11.2.5 Pokus pre počiatočnú výšku h=550m 78
11.2.6 Výchylka výškovky - δ_V 79
11.3 Vplyv premenného deliteľa 80
11.3.1 Vplyv na lietadlá II. kategórie ICAO 81
11.3.2 Vplyv na lietadlá III.A kategórie ICAO 82
11.4 Vplyv automatu ťahu 83

12 ZÁVER - Porovnanie výsledkov úsporného a klasického autopilota 84
12.1 Stabilizácia výšky a vertikálnej rýchlosti 84
12.2 Zachytenie a let v zostupnom paprsku 85
12.3 Možnosti ďalšieho štúdia úsporného autopilota 86

1 Úvod

1.1 Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ....
podpis

1.2 Zadanie

1. Overte činnosť klasického autopilota stabilizácie pohybu lietadla zadaného jeho pohybovými rovnicami.

2. Zoznámte sa so štruktúrou a funkciou autopilota pre malé lietadlá S-Tec System 55 s úsporným prístrojovým vybavením. Vykonajte rozbor vlastností jeho prvkov: snímačov letových a navigačných veličín, korekčných členov, servomechanizmov.

3. V prostredí Simulink zostavte model uzavretého regulačného obvodu vrátane vlastností jeho prvkov.

4. V uzavretom regulačnom obvode lietadlo - autopilot upresnite štruktúru autopilota, navrhnite potrebné korekčné články a overte jeho činnosť.

1.3 Definícia úlohy

Záujem o použitie systémov automatického riadenia v lietadlách pretrváva už od počiatku letectva, napríklad bratia Wrightovci si patentovali už v roku 1909 jednoduchý systém stabilizácie pozdĺžneho sklonu. Kedže prvé lietajúce stroje boli málo stabilné, slúžili v počiatkoch automaty hlavne na vylepšenie vlastností lietadiel, čím výrazne prispievali k zvyšovaniu bezpečnosti letu a nemálo uľahčovali prácu pilotovi.

S postupným rozvojom teoretických vedomostí o lietaní a zákonitým zdokonaľovaním konštrukcie lietadiel záujem o stabilizátory trochu upadol. Predlžovanie dĺžky letu a doby pobytu lietadla vo vzduchu, požiadavky na let v ťažkých poveternostných podmienkach a v podmienkach zhoršenej viditeľnosti spôsobili opätovný nárast záujmu o rozvoj automatických systémov riadenia letu. Objavujú sa požiadavky na stabilizáciu pozdĺžneho a priečneho sklonu lietadla, prípadne kurzu. Ďalší rozvoj letectva prináša pre autopiloty nové úlohy, ako je stabilizácia výšky, vedenie lietadla po trati, priblíženie na pristátie, alebo aj samostatné pristávanie.

Základom týchto klasických autopilotov boli systémy tlmenia rotačných rýchlostí lietadla a stabilizácie polohových uhlov, ktoré boli postupne dopĺňané o ďalšie senzory tak, aby autopilot splnil všetky úlohy, ktoré od neho užívatelia očakávali. Konštrukčným základom klasických autopilotov sú teda gyroskopické prístroje a ich použitie uvidíme v prvej časti tejto diplomovej práce.

V počiatkoch boli gyroskopy pomerne veľké a ťažké zotrvačníky, takže ich použitie bolo možné len na výkonných strojoch. Vývojom dochádza k nahradeniu mechanických senzorov laserovými gyroskopmi, ktoré sú presnejšie a ľahšie ako tie pôvodné, ich cena je však veľmi vysoká a preto limitijúca pri použitií na menších obchodných lietadlách a ostatných strojoch ľahších hmotnostných kategórií. Preto z dôvodu použitia komplexnejších autopilotov aj na letúňoch nižšej cenovej kategórie je zaujímavá štúdia vlastností a vývoj riadiaceho systému s obmedzeným použitím gyroskopických prístrojov. Príkladom takéhoto systému môže byť System 55 spoločnosti S-TEC, s ktorého montážov sa počíta do lietadla AE-270 IBIS z produkcie Aera Vodochody. Týmto systémom a ich vlastnostiam v oblasti pozdĺžneho pohybu lietadla sa venuje druhá časť diplomovej práce.

Uvidíme napríklad, že systém s tlmičom rýchlych kmitov a barometrickým výškomerom dokáže úspešne regulovať vertikálnu rýchlosť lietadla. Tento režim s úsporným vybavením by teda mohol u klasických autopilotov slúžiť ako záloha v prípade, že by vysadila gyrovertikála.

N.B. Všetky veličiny sú uvádzané v súradnicovej sústave podľa normy GOST.

2 Dynamické vlastnosti lietadla - matematický popis

Pre štúdium vlastností lietadla, návrh systémov automatického riadenia a rozbor ich vlastností vychádzame zo sústavy šiestich linearizovaných pohybových rovníc, ktorých základy rozpracoval E. Bryan v roku 1911.

2.1 Pohyb lietadla - základné veličiny

Pohyb lietadla je charakterizovaný 6 stupňami voľnosti a delíme ho na rotačný a posuvný (translačný).
Rotačný pohyb charakterizujú Eulerové polohové uhly medzi zemskou a lietadlovou súradnicovou sústavou:

- pozdĺžny sklon ϑ
- priečny náklon γ
- kurz ψ

a ďalej uhly ofukovania medzi sústavou aerodynamickou a lietadlovou:

- uhol nábehu α
- uhol vybočenia β

Posuvný pohyb vzťahujeme k dráhe letu a určujú ho nasledovné veličiny:

- uletená vzdialenosť L
- letová hladina H, respektíve odchýlka od letovej hladiny dH
- stranová vzdialenosť Z, respektíve stranová odchýlka dZ

2.2 Pohybové rovnice

Ako som spomenul v úvode kapitoly 2, na štúdium vlastností lietadla využívame matematický model definovaný 6 základnými rovnicami. Aby sme mohli tieto pohybové rovnice popísať, zavádzame niekoľko predpokladov:

- Lietadlo je tuhé teleso, je geometricky a hmotovo súmerné
- Hmotnosť lietadla a vonkajšieho prostredia je konštantná
- Hlavné osy zotrvačnosti lietadla sú totožné s lietadlovou súradnicovou sústavou
- Smer vektoru ťahu motorov je totožný z pozdĺžnou osou lietadla
- gravitačné zrýchlenie g je konštantné
- Zemská súradnicová sústava je inerciálna, neuvažuje sa otáčanie zeme a tým vyvolané Coriolisove zrýchlenie
- Atmosféra je pevne spojená so zemskou súradnicovou sústavou

Rovnice lietadla vychádzajú zo základných princípov Newtonovskej mechaniky. Základný tvar silovej a momentovej rovnice pre tuhé teleso vykonávajúci posuvný a rotačný pohyb v referenčnej sústave je:

$$\overline{F} = m(\frac{d\overline{v}}{dt} + [\overline{\omega} \times \overline{v}]) = \sum \overline{F}_i \tag{1}$$

$$\overline{M} = \frac{\overline{H}}{dt} + [\overline{\omega} \times \overline{H}] = \sum \overline{M}_i \tag{2}$$

Rozpísaním rovníc 1 a 2 do zložkového tvaru dostávame sústavu 6 nelineárnych rovníc.
3 silové rovnice:

- $F_x = -X + P - G\sin(\vartheta) = m(\frac{dv_x}{dt} + v_z\omega_y - v_y\omega_z)$
- $F_y = -Y - G\sin(\gamma) = m(\frac{dv_y}{dt} + v_x\omega_z - v_z\omega_x)$
- $F_z = Z + G\cos(\vartheta)\sin(\gamma) = m(\frac{dv_z}{dt} + v_y\omega_x - v_x\omega_y)$

kde X je čelný odpor, Y vztlak, Z bočná sila pôsobiaca na lietadlo, P predstavuje ťah motora a G gravitačnú silu.
3 momentové rovnice:

- $M_x = J_x\frac{d\omega_x}{dt} + \omega_y\omega_z(J_z - J_y) + (\omega_x\omega_z - \dot{\omega_y})D_{xy}$
- $M_y = J_y\frac{d\omega_y}{dt} + \omega_z\omega_x(J_x - J_z) + (\omega_y\omega_z - \dot{\omega_x})D_{xy}$
- $M_z = J_z\frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x\omega_y(J_y - J_x) + (\omega_y^2 + \omega_x^2)D_{xy}$

Tieto rovnice vyjadrujú matematický popis pohybu lietadla. Je to sústava nelineárnych diferenciálnych rovních, ktorá vyjadruje zložitú závislosť pohybu lietadla na jeho parametroch a spôsoboch riadenia. Z uvedenej sústavy však nemožno priamo analyticky vyjadriť obecné riešenie, ktoré by charakterizovalo pohyb lietadla. Preto sústavu linearizujeme v okolí určitého pracovného bodu, vďaka čomu môžeme priebežne analyzovať všetky faktory, ktoré môžu mať vplyv na zmenu parametrov pohybu, stability a riaditeľnosti lietadla, pomocou jednoduchého matematického aparátu.

Linearizáciu realizujeme zavedením metódy malých veličín, ktorá vychádza z predpokladu, že pri pôsobení vonkajších porúch alebo po výchylkách orgánov riadenia vykonáva lietadlo pohyb, ktorý je len málo odlišný od pôvodného. Pri splnení tejto požiadavky môžeme v pohybových rovniciach lietadla zanedbať malé členy, ktoré obsahujú druhé a vyššie mocniny odchýlky, a vzájomné súčiny prírastkov vstupných a výstupných veličín. Dostávame tak sústavu **6 lineárnych rovníc** s konštatnými koeficientami, ktoré charakterizujú pohyb lietadla a ich riešenie je relatívne jednoduché:

$$F_x: \quad \dot{v} + a_{11}v + a_{12}\alpha + a_{13}\vartheta = c_{11}\delta_m$$

$$F_y: \quad a_{21}v + \dot{\alpha} + a_{22}\alpha - \dot{\vartheta} + a_{23}\vartheta = c_{22}\delta_V$$

$$M_z: \quad a_{31}v + a_{30}\dot{\alpha} + a_{32}\alpha + \ddot{\vartheta} + a_{33}\dot{\vartheta} = c_{32}\delta_V$$

$$F_z: \quad \dot{\beta} + b_{11}\beta + b_{12}\gamma - \dot{\psi} = d_{12}\delta_s$$

$$M_x: \quad b_{12}\beta + \ddot{\gamma} + b_{22}\dot{\gamma} + b_{23}\dot{\psi} = d_{21}\delta_k$$

$$M_y: \quad b_{31}\beta + b_{32}\dot{\gamma} + \ddot{\psi} + b_{33}\dot{\psi} = d_{31}\delta_k + d_{32}\delta_s$$

Rovnice F_x, F_y a M_z popisujú pozdĺžny a rovnice F_z, M_x a M_y stranový pohyb lietadla.

Koeficienty týchto rovníc sú konštantné a sú definované nasledovnými hmotovými a geometrickými parametrami letu:

- Hmotnosť lietadla - m
- Plocha krídla - S
- Aerodynamická tetiva - l
- Rýchlosť letu - V
- Hustota vzduchu - ρ
- Momenty zotrvačnosti - J_x, J_y, J_z

Pre definovanie koeficientov pozdĺžneho pohybu potrebujeme poznať aj nasledovné aerodynamické derivácie pozdĺžneho pohybu lietadla:
$c_x^V, c_x^\alpha, c_x^\vartheta, c_x^{\delta_m}, c_y^V, c_y^\alpha, c_y^{\delta_m}, m_z^\alpha, m_z^{\dot\alpha}, m_z^{\dot\vartheta}, m_z^{\delta_m}$

Koeficienty stranového pohybu sú definované aj nasledovnými aerodynamickými deriváciami stranového pohybu lietadla:
$c_z^\beta, c_z, c_z^{\delta_m}, m_x^\beta, m_x^{\dot\gamma}, m_x^{\dot\psi}, m_x^{\dot\delta_k}, m_y^\beta, m_y^{\dot\gamma}, m_y^{\dot\psi}, m_y^{\dot\delta_k}, m_y^{\dot\delta_s}$

Koeficienty pozdĺžneho pohybu prepočítavame podľa vzťahov z tabuľky 1.

	a_{ij}			c_{ij}	
i \ j	1	2	3	1	2
1	$\frac{c_x^V}{A} = \frac{1}{m}(X^V - P^V)$ $c_x^V = \frac{V}{Sq}(X^V - P^V)$	$\frac{c_x^\alpha}{A} = \frac{1}{mV}X^\alpha$ $c_x^\alpha = \frac{1}{Sq}X^\alpha$	$\frac{c_x^\vartheta}{A} = \frac{g}{V}\cos(\vartheta_0)$ $c_x^\vartheta = \frac{mg}{Sq}\cos(\vartheta_0)$	$\frac{c_x^{\delta_m}}{A} = \frac{1}{mV}P^{\delta_m}$ $c_x^{\delta_m} = \frac{1}{Sq}P^{\delta_m}$	
2	$\frac{c_y^V}{A} = \frac{1}{m}X^V$ $c_y^V = \frac{V}{Sq}Y^V$	$\frac{c_y^\alpha}{A} = \frac{1}{mV}Y^\alpha$ $c_y^\alpha = \frac{1}{Sq}Y^\alpha$	$\frac{c_y^\vartheta}{A} = \frac{g}{V}\sin(\vartheta_0)$ $c_y^\vartheta = \frac{mg}{Sq}\sin(\vartheta_0)$		$-\frac{c_y^{\delta_v}}{A} = \frac{1}{mV}Y^{\delta_v}$ $c_y^{\delta_v} = \frac{1}{Sq}Y^{\delta_v}$
3	$-\frac{m_z^V}{C} = -\frac{V}{J_z}M_z^V$ $m_z^V = \frac{1}{Sql}M_z^V$	$-\frac{m_z^\alpha}{C} = -\frac{1}{J_z}M_z^\alpha$ $m_z^\alpha = \frac{1}{Sql}M_z^\alpha$	$-\frac{B}{C}m_z^{\dot\vartheta} = \frac{1}{J_z}M_z^{\dot\vartheta}$ $m_z^{\dot\vartheta} = \frac{1}{Sql}\frac{2V}{l}M_z^{\dot\vartheta}$		$\frac{m_z^{\delta_v}}{A} = \frac{1}{J_z}M_z^{\delta_v}$ $m_z^{\delta_v} = \frac{1}{Sql}M_z^{\delta_v}$
$a_{30} = -\frac{B}{C}m_z^{\dot\alpha} = -\frac{1}{J_z}M_z^{\dot\alpha},\ m_z^{\dot\alpha} = \frac{1}{Sql}\frac{2V}{l}M_z^{\dot\alpha}$					
$A = \frac{mV}{Sq},\ B = \frac{l}{2V},\ C = \frac{J_z}{Sgl}$					

Tabuľka 1: Koeficienty pozdĺžneho pohybu lietadla

Hodnoty koeficientov stranového pohybu sú uvedené v tabuľke 2.

	b_{ij}			d_{ij}	
i \ j	1	2	3	1	2
1	$-\frac{c_z^\beta}{A} = -\frac{1}{mV}Z^\beta$ $c_z^\beta = \frac{1}{Sq}Z^\beta$	$-\frac{c_z^\gamma}{A} = -\frac{g}{V}\cos\vartheta_0$ $c_z^\gamma = \frac{mg}{Sq}\cos(\vartheta_0)$	1		$\frac{c_z^{\delta_s}}{A} = \frac{1}{mV}Z^{\delta_s}$ $c_z^{\delta_s} = \frac{1}{Sq}Z^{\delta_s}$
2	$-\frac{m_x^\beta}{D} = -\frac{V}{J_x}M_x^\beta$ $m_x^\beta = \frac{1}{Sql}M_x^\beta$	$-\frac{B}{D}m_x^{\dot\gamma} = -\frac{1}{J_x}M_x^{\dot\gamma}$ $m_x^{\dot\gamma} = \frac{1}{Sql}\frac{2V}{l}M_x^{\dot\gamma}$	$-\frac{B}{D}m_x^{\dot\psi} = -\frac{1}{J_x}M_x^{\dot\psi}$ $m_x^{\dot\psi} = \frac{1}{Sql}\frac{2V}{l}M_x^{\dot\psi}$	$\frac{m_x^{\delta_k}}{D} = \frac{1}{J_x}M_x^{\delta_k}$ $m_x^{\delta_k} = \frac{1}{Sql}M_x^{\delta_k}$	
3	$-\frac{m_y^\beta}{E} = -\frac{1}{J_y}M_y^\beta$ $m_y^\beta = \frac{1}{Sql}M_y^\beta$	$-\frac{B}{E}m_y^{\dot\gamma} = -\frac{1}{J_y}M_y^{\dot\gamma}$ $m_y^{\dot\gamma} = \frac{1}{Sql}M_y^{\dot\gamma}$	$-\frac{B}{E}m_y^{\dot\psi} = -\frac{1}{J_y}M_y^{\dot\psi}$ $m_y^{\dot\psi} = \frac{1}{Sql}M_y^{\dot\psi}$	$\frac{m_x^{\delta_k}}{E} = \frac{1}{J_y}M_y^{\delta_k}$ $m_y^{\delta_k} = \frac{1}{Sql}M_y^{\delta_k}$	$\frac{m_y^{\delta_s}}{E} = \frac{1}{J_y}M_y^{\delta_s}$ $m_y^{\delta_s} = \frac{1}{Sql}M_y^{\delta_s}$
$D = \frac{J_x}{Sql}$, $E = \frac{J_y}{Sgl}$					

Tabuľka 2: Koeficienty stranového pohybu lietadla

2.2.1 Pozdĺžny pohyb

Ako sme už uviedli, rovnice F_x, F_y a M_z popisujú pozdĺžny pohyb lietadla. Pre dalšie štúdium vlastností tohto pohybu upravujeme rovnice na stavový popis v tvare: $\dot{x} = Ax+Bu, y = Cx + Du$, kde:

- x: vektor stavových premenných - v prípade pozdĺžneho pohybu: v, α, ϑ, $\dot\vartheta$
- u: vektor vstupov - v prípade pozdĺžneho pohybu: δ_m - prípusť motora, δ_v - výchylka výškovky
- y: vektor výstupov
- A,B,C,D: matice stavového popisu

Matice linearizovaného pozdĺžneho pohybu lietadla sú nasledovné:

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & 0 \\ -a_{21} & -a_{22} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{21}a_{30} & a_{22}a_{30} - a_{32} & 0 & -a_{33} - a_{30} \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 \\ 0 & c_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & c_{32} - c_{22}a_{30} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.2 Stranový pohyb

Rovnice F_z, M_x a M_y popisujú stranový pohyb lietadla a jeho stavový popis je definovaný nasledovnými stavovými maticami:

$$A = \begin{bmatrix} -b_{11} & -b_{12} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_{21} & 0 & 0 & -b_{22} & -b_{23} \\ -b_{31} & 0 & 0 & -b_{32} & -b_{33} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Vektor stavových premenných stranového pohybu lietadla je: β, γ, ψ, $\dot{\gamma}$, $\dot{\psi}$.

Vstupné veličiny predstavuje výchylka smerovky d_s a výchylka krídelok d_k.

Časť I
Klasický autopilot

Ako vidíme na linearizovanom matematickom modele lietadla, základnými veličinami stavového popisu sú polohové uhly, rotačné rýchlosti, respektíve derivácie polohových uhlov a uhly ofukovania. Z tohto vyplýva využitie gyroskopov ako základných meracích prvkov v realizácii klasických systémov automatického riadenia.

3 Hierarchické úrovne riadenia

Podľa druhu stabilizovanej veličiny rozdeľujeme riadenie lietadla do viacerých hierarchických úrovní:

- I. Hierarchická úroveň
  Patria sem systémy úpravy vlastností lietadla **AP/SUS**:
  - Tlmiče, ktoré tlmia rotačné rýchlosti $\dot{\vartheta}$, $\dot{\psi}$, $\dot{\gamma}$
  - Stabilizátory, ktoré stabilizujú polohové uhly α a β
- II. Hierarchická úroveň
  Nájdeme v nej systémy riadenia dynamiky pohybu lietadla, teda autopiloty:
  - Autopilot pozdĺžneho sklonu, ktorý ovláda uhol ϑ
  - Autopilot stranového pohybu, ktorý stabilizuje náklon γ a kurz ψ
  - Automat ťahu
- III. Hierarchická úroveň
  Úroveň automatického riadenia, ktoré stabilizuje lietadlo v horizontálnej aj vertikálnej rovine.
  - Stabilizácia barometrickej výšky H a vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$ (mód ALT)
  - Horizontálne vedenie po trati (mód TRACK)
  - Automatické priblíženie na pristátie (mód APPR)
  - Stabilizácia vzdušnej rýchlosti respektíve machovho čísla (mód IAS/M)
- IV. Hierarchická úroveň
  Systém komplexného riadenia a optimalizácie letu FMS.

4 Autopiloty - úvod

4.1 Úlohy

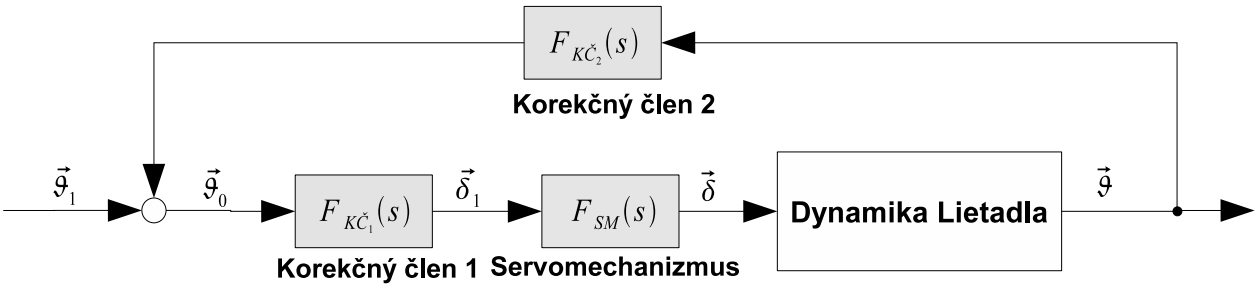
Autopilot je systémom stabilizácie 2. hierarchickej úrovne. Ako taký musí teda zvládnuť všetky požiadavky na systém z 1. hierarchickej úrovne:

- Stabilizácia uhlovej rýchlosti ω_i
- Stabilizácia uhlov ofukovania α, β
- Koordinácia stranového pohybu

K týmto sa pripájajú úlohy vlastné pre 2. hierarchickú úroveň:

- Stabilizácia polohových uhlov pre priamočiari let
- Riadenie a stabilizácia polohových uhlov pre:
  a) zmenu výšky
  b) zmenu kurzu
  c) riadenú zatáčku
- Vyváženie pozdĺžneho kanálu

4.2 Štruktúra



Obr. 1: Základná štruktúra systému riadenia dynamiky lietadla

Z obrázku 1 vidíme, že platí:

- $\overline{\delta(s)} = [F_{SM}(s)] \cdot \overline{\delta_1(s)}$
- $\overline{\delta_1(s)} = \left[F_{K\check{C}_1}(s)\right] \left[F_{K\check{C}_2}(s)\right] \cdot \overline{\vartheta(s)}$

A teda rovnica:

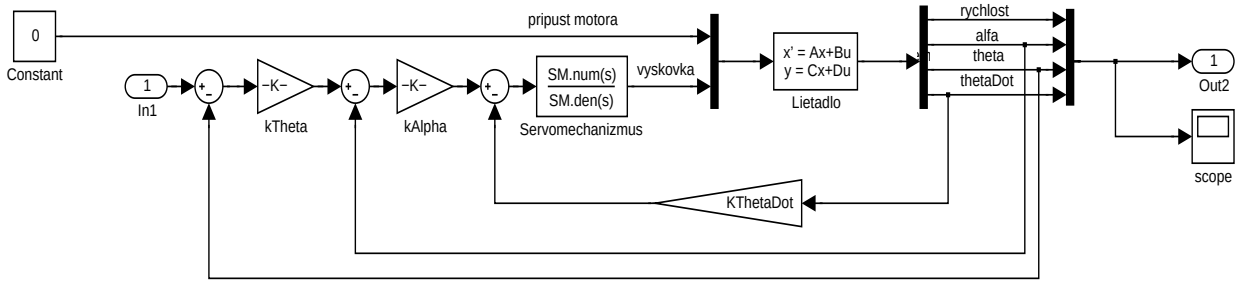
$$\overline{\delta(s)} = [F_{SM}(s)]\,[F_{K\check{C}}(s)] \cdot \overline{\vartheta(s)} \tag{3}$$

definuje autopilota, kde $F_{SM}(s)$ predstavuje prenos servomechanizmu a $F_{K\check{C}}(s)$ prenos korekčných členov.

5 Autopilot pozdĺžneho sklonu

Stabilizácia pozdĺžneho sklonu je základným módom činnosti klasického autopilota. V nasledujúcom texte si preto ukážeme jeho štruktúru a vplyv jednotlivých konštrukčných členov na jeho vlastnosti.

5.1 Štruktúra autopilota



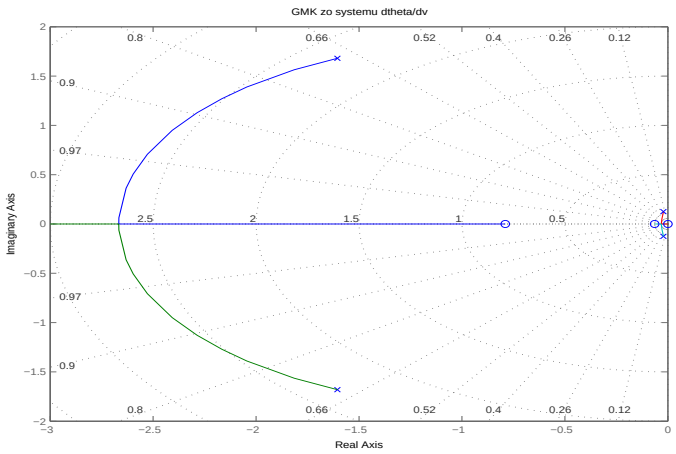
Obr. 2: Bloková schéma autopilota pozdĺžneho pohybu

Ako vidíme na schéme 2, autopilot pozdĺžneho sklonu obsahuje tri spätné väzby.

1. Tlmič - spätná väzba popísaná rovnicou: $-\delta_V = K_{\dot{\vartheta}} \cdot \dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_1$.
2. Stabilizátor popísaný rovnicou: $-\delta_V = K_\alpha \cdot (\alpha - \alpha_1)$.
3. Autopilot so spätnou väzbou $-\delta_V = K_\vartheta \cdot (\vartheta - \vartheta_1)$

5.2 Tlmič

Tlmič patrí medzi systémy úpravy vlastností lietadla a slúži hlavne na utlmenie rýchlej zložky pozdĺžneho pohybu lietadla.



Obr. 3: Geometrické miesto kořenov prenosu $F(s) = \frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$

Pri syntéze tlmiča vychádzame z prenosu $F(s) = \frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$ (GMK na obrázku 3)a popisujeme ho rovnicou $-\delta_V = K_{\dot{\vartheta}} \cdot \dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_1$. Zosilnením $K_{\dot{\vartheta}}$ nastavujeme požadované tlmenie. Porovnanie pólov v tabuľkách 3 a 4 dokumentuje vplyv tlmiča, ktorý zvýšil pôvodnú hodnotu tlmenia rýchlych pólov na $a_1 = 1,2 \times a$.

Vidíme, že došlo k zvýšeniu tlmenia pólov rýchleho pohybu, ale nepatrne tlmič pôsobí aj na ostatné póly. Zvýšila sa aj vlastná frekvencia rýchlych pólov, frekvencia pomalých pólov klesla.

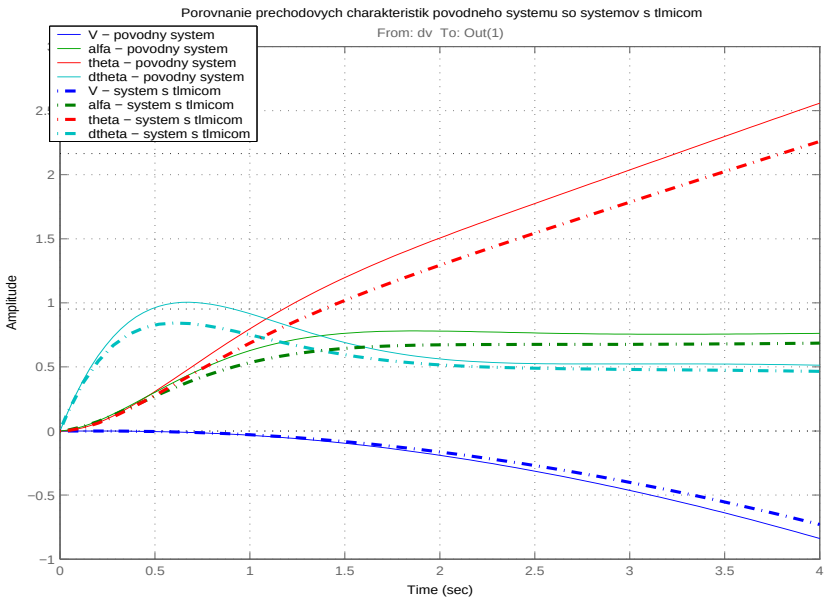
Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-1,60 + 1,68$\jmath$	0,691	2,32
-1,60 - 1,68$\jmath$	0,691	2,32
-0,0216 + 0,126$\jmath$	0,169	0,128
-0,0216 - 0,126$\jmath$	0,169	0,128

Tabuľka 3: Poloha pólov - pôvodný systém

Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-2,01 + 1,42$\jmath$	0,816	2,46
-2,01 - 1,42$\jmath$	0,816	2,46
-0,0221 + 0,119$\jmath$	0,184	0,121
-0,0221 - 0,119$\jmath$	0,184	0,121

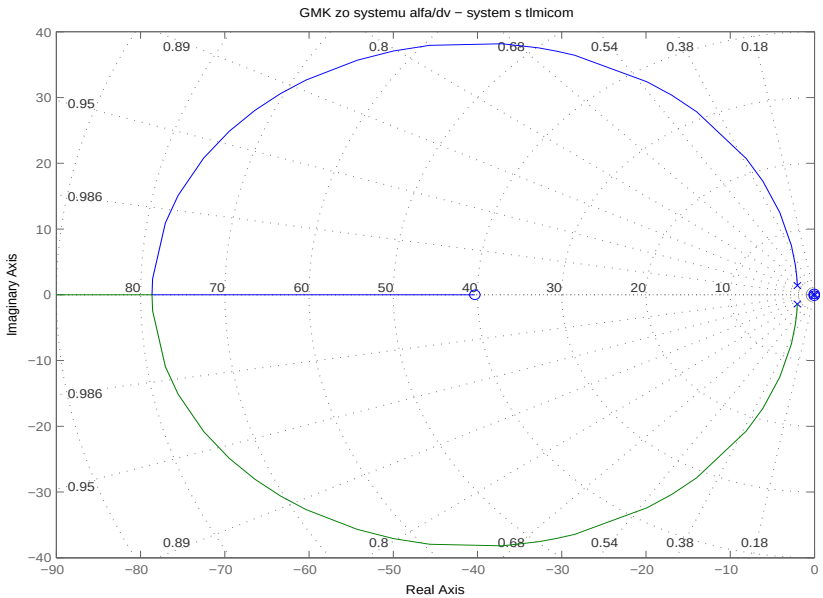
Tabuľka 4: Poloha pólov - systém s tlmičom

Prechodové charakteristiky z grafu 4 dokumentujú pôsobenie vyššie popísaného tlmiča. Pozorujeme zníženie prevýšenia prechodovej charakteristiky $F(s) = \frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$, ako aj celkové spomalenie prechodových dejov ostatných stavových veličín.



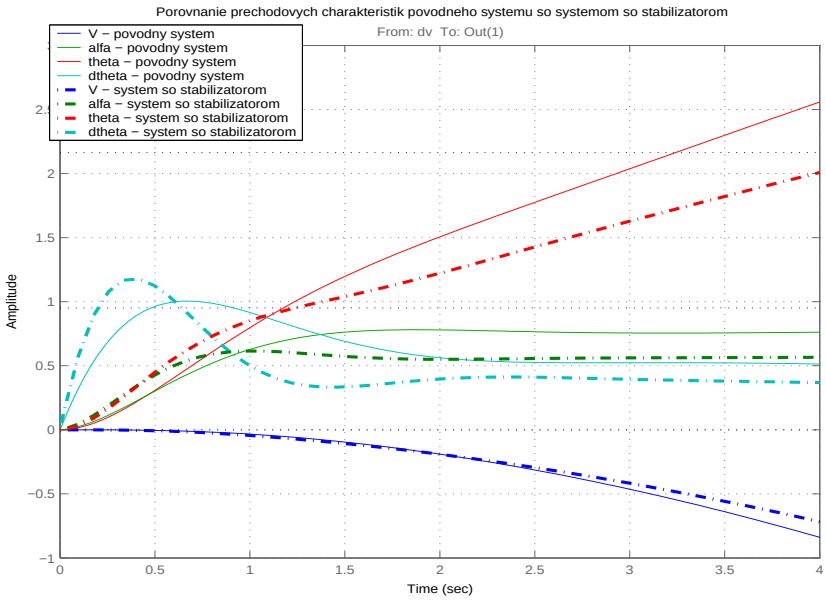
Obr. 4: Porovnanie prechodových charakteristík pôvodného systému a lietadla s tlmičom

5.3 Stabilizátor



Obr. 5: Geometrické miesto kořenov prenosu $F(s) = \frac{\alpha(s)}{\delta_V(s)}$

Stabilizátor, rovnako ako tlmič, patrí medzi systémy I. hierarchickej úrovne a stabilizuje uhol nábehu α, teda uhol, ktorý zviera vektor rýchlosti a pozdĺžna osa lietadla. K úprave vlastností v spätnoväzbovom prenose $\frac{\alpha(s)}{\alpha_1(s)}$ dochádza úpravou prirodzenej frekvencie lietadla ω_n. Stabilizátor je popísaný rovnicou $-\delta_V = K_\alpha \cdot (\alpha - \alpha_1)$.



Obr. 6: Porovnanie prechodových charakteristík pôvodného systému a lietadla so stabilizátorom

Zosilnením K_α nastavujeme požadovanú prirodzenú frekvenciu rýchlych pólov lietadla. Prechodové charakteristiky z grafu 6 porovnávajú pôvodný systém a lietadlo so stabilizátorom, ktorý nastavuje kruhovú frekvenciu na hodnotu $\omega_1 = 1,5 \times \omega$.

Prechodový dej stabilizácie uhlu nábehu α je na počiatku charakteristiky výraznejší, v dalšom slede však spomalil. Podobné vlastnosti môžeme pozorovať aj u ostatných stavových veličín. Zrýchlenie prechodových dejov dokazuje aj tabuľka 5. Porovnaním jednotlivých hodnôt s hodnotami v tabuľke 4 zisťujeme, že došlo k nárastu prirodzenej frekvencie rýchlych pólov podľa očakávania 1,5krát. Zároveň pozorujeme, že u týchto pólov došlo k výraznému zníženiu tlmenia.

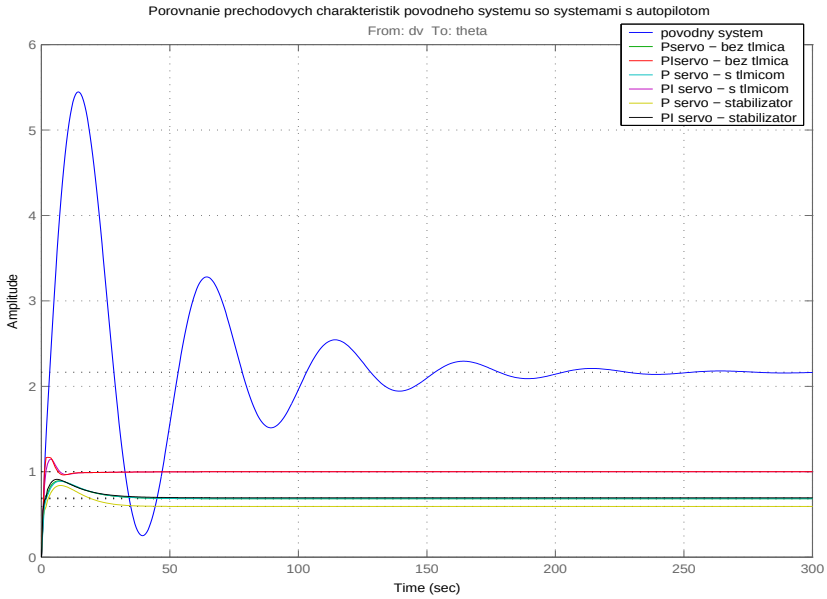
Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-2,10 + 3,02$\jmath$	0,571	3,68
-2,10 - 3,02$\jmath$	0,571	3,68
-0,022 + 1,33$\jmath$	0,163	0,134
-0,022 - 1,33$\jmath$	0,163	0,134

Tabuľka 5: Poloha pólov - systém so stabilizátorom

5.4 Autopilot

Autopilot v klasickom ponímaní upravuje dynamiku lietadla ovládaním uhlu pozdĺžneho sklonu ϑ. Je zadaný rovnicou $-\delta_V = K_\vartheta \cdot (\vartheta - \vartheta_1)$ a teda k ovládaniu sklonu dochádza prostredníctvom výchylky výškovky rovnako ako v prípade tlmiča a stabilizátora. Autopilot môže byť v rozličných konfiguráciách: bez tlmiča a stabilizátora, len s tlmičom a s tlmičom a stabilizátorom zároveň. K týmto konfiguráciám sa pridáva aj vplyv použitého servomechanizmu:

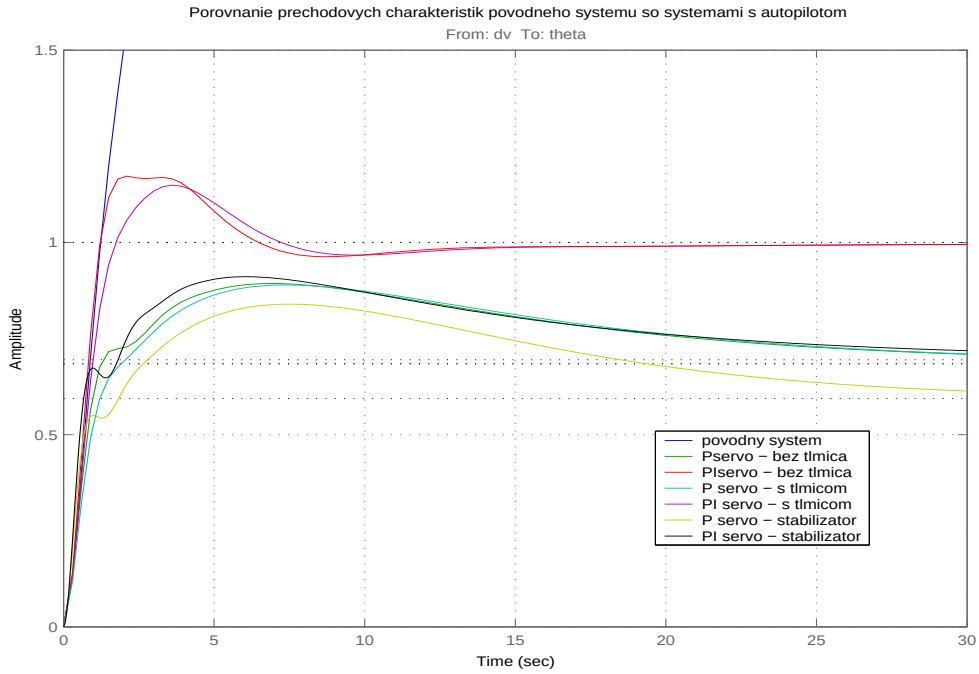
- P servomechanizmus s prenosom $F_{SM} = 1$
- PI servomechanizmus s prenosom $F_{SM} = \frac{s+1}{s}$



Obr. 7: Porovnanie prechodových charakteristík rôznych konfigurácií autopilota

Na grafe 7 vidíme porovnanie jednotlivých konfigurácií s použitím prenosového koeficientu $K_\vartheta = 1$. Napriek tomu, že študované lietadlo bolo stabilné, je vplyv autopilota na dynamické

vlastnosti lietadla evidentný. Všetky testované autopiloty výrazne znížili regulačný čas a statickú chybu. K ustáleniu charakteristiky do pásma $\pm 5\%$ ustálenej hodnoty dochádza v priebehu približne 10 s oproti 250 sekundám u pôvodného systému.



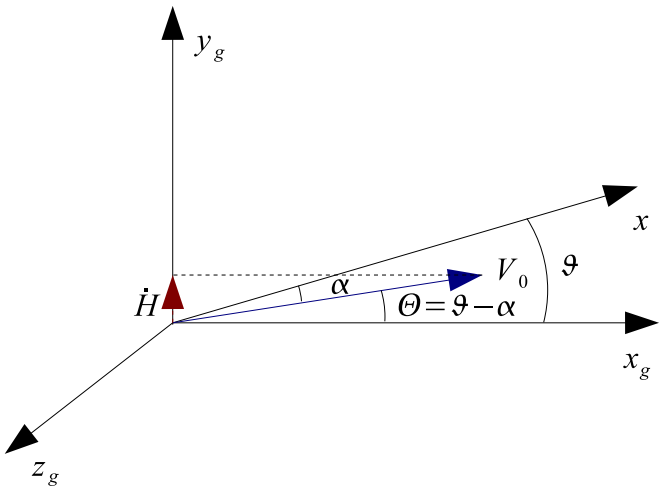
Obr. 8: Porovnanie prechodových charakteristík rôznych konfigurácií autopilota - detailné zobrazenie

Dôkladnejšie porovnanie jednotlivých konfigurácií autopilota nám umožnuje detailné zobrazenie počiatku prechodových charakteristík na grafe 8. Môžeme skonštatovať, že najlepšie výsledky dosiahol autopilot s tlmičom, bez stabilizátora a so servomechanizmom typu PI. Astatický pól servomechanizmu odstránil statickú chybu autopilota, použitie tlmiča znížilo oproti systému bez tlmiča prekývnutie na 15%. Systém s touto konfiguráciou autopilota stabilizuje pozdĺžny sklon ϑ do pásma $\pm 5\%$ ustálenej hodnoty za čas $t_r = 6$ sekúnd .

6 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$ a barometrickej výšky H

Systémy stabilizácie barometrickej výšky patria do 3. hierarchickej úrovne riadenia, teda medzi systémy automatického riadenia. Stabilizácia výšky sa uplatňuje pri lete lietadla v letovej hladine. Počas tohto letu musí autopilot udržať konštantnú, prednastavenú výšku v rôznych letových situáciách, ako je zmena vzdušnej rýchlosti, čí pri pôsobení rušivých vplyvov vyvolaných vertikálnou zložkou vetra. Ako uvidíme ďalej, má úspešná stabilizácia vertikálnej rýchlosti priaznivý vplyv na vlastnosti systému ovládania barometrickej výšky.

6.1 Kinematická rovnica výšky



Obr. 9: Kinematická rovnica vertikálnej rýchlosti - norma GOST

Z obrázku 9 vidíme, že vertikálna rýchlosť $\dot{H}$ je popísaná rovnicou: $\dot{H} = V_0 \sin(\Theta)$. Keďže sa nachádzame v oblasti malých výchyliek, môžeme túto rovnicu linearizovať s použitím vzťahu $\sin(x) = x$[1]. Pre $\dot{H}$ môžeme teda písať:

$$\dot{H} = V_0\Theta = V_0(\vartheta - \alpha) \tag{4}$$

Rovnica 4 sa v prípade pôsobenia vertikálnej zložky vetra U_Y upraví na tvar:

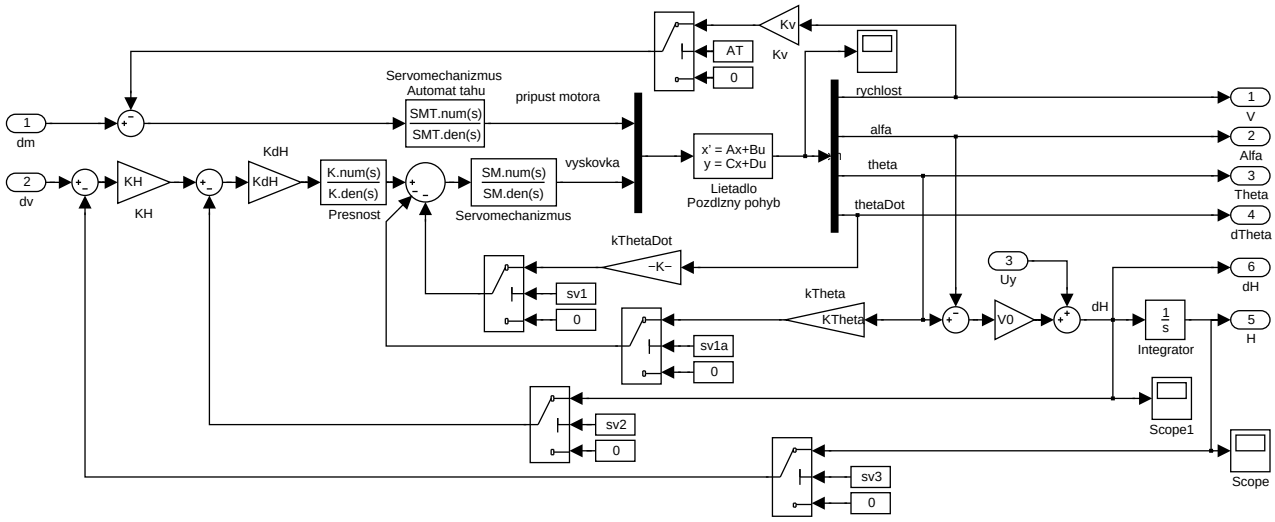
$$\dot{H} = V_0\Theta + U_Y = V_0(\vartheta - \alpha) + U_Y. \tag{5}$$

Barometrickú výšku vypočítame následne z rovnice:

$$H = \int \dot{H} dt \tag{6}$$

[1] pre $x = \pm 5°$

6.2 Základné spôsoby stabilizácie výšky



Obr. 10: Stabilizácia barometrickej výšky s klasickým autopilotom pozdĺžneho sklonu

Schéma stabilizácie barometrickej výšky na obrázku 10 je doplnená o stabilizáciu rýchlosti, tzv. automat ťahu, definovaný:

- Koeficientom spätnej väzby $K_V = 1$.
- Servomechanizmom s prenosom $F_{AT}(s) = 3,0871 + \frac{1}{s}$.

Takto definovaný automat ťahu vykázal výborné vlastnosti v úlohe stabilizácie rýchlosti a zároveň má priaznivý vplyv na návrh automatu stabilizácie barometrickej výšky.

Existujú dva základné spôsoby stabilizácie barometrickej výšky:

A) systém s autopilotom pozdĺžneho sklonu. Takýto autopilot je popísaný rovnicou:

$$-\delta_v = K_{\dot{\vartheta}}\dot{\vartheta} + K_{\vartheta}\vartheta + K_H H \tag{7}$$

B) systém so stabilizáciou vertikálnej výšky. Rovnica autopilota je v tomto prípade:

$$-\delta_v = K_{\dot{\vartheta}}\dot{\vartheta} + K_{\vartheta}\vartheta + K_{\dot{H}}\dot{H} + K_H H \tag{8}$$

6.3 Stabilizácia výšky s autopilotom pozdĺžneho sklonu

Autopilot definovaný vzťahom 7 sa ukázal ako dobrý pre stabilizáciu výšky. Výsledná stabilizácia bola bez prekmitu, čas regulácie 25 sekúnd pri použití P servomechanizmu, respektíve 15 sekúnd s PI servomechanizmom, bol vyhovujúci potrebám.

Tento systém je však veľmi citlivý na stabilizáciu rýchlosti, keď jednotková zmena rýchlosti vyvolala zmenu výšky v ráde 60 metrov pri použití PI servomechanizmu a až 160 metrov pri použití P servomechanizmu.

Autopilot je tiež veľmi citlivý na odpojenie automatu ťahu, ktoré spôsobilo až 4 násobné predĺženie času regulácie.

Systém popísaný rovnicou 7 sa ukázal ako nedostatočný aj pri rušení konštatnou hodnotou vertikálneho poryvu vetra, keď ani systém s P a ani s PI servomechanizmom nedokázali potlačiť túto poruchu.

6.4 Stabilizácia výšky so stabilizátorom vertikálnej rýchlosti

Hlavne posledne popísaný problém rieši autopilot so stabilizátorom vertikálnej rýchlosti popísaný rovnicou 8. Ako uvidíme ďalej, takto navrhnutý autopilot sa vie vysporiadať aj s ostatnými vyššie popísanými neduhmi predchádzajúceho automatu.

Základná idea autopilota vychádza z faktu, že jednoduchý spätnoväzbový regulátor je schopný potlačiť len konštatné rušenie na výstupe, ktorý reguluje.

V prípade, že dosadíme do rovnice č. 6 barometrickej výšky rovnicu 5 vertikálnej rýchlosti s vyjadreným vertikálnym poryvom vetra, dostávame nasledovný tvar:

$$H = \int (V_0(\vartheta - \alpha) + U_Y)dt \tag{9}$$

Za predpokladu konštatného poryvu vetra môžeme rovnicu 9 napísať v tvare:

$$H = V_0(\vartheta - \alpha)t + U_Y t \tag{10}$$

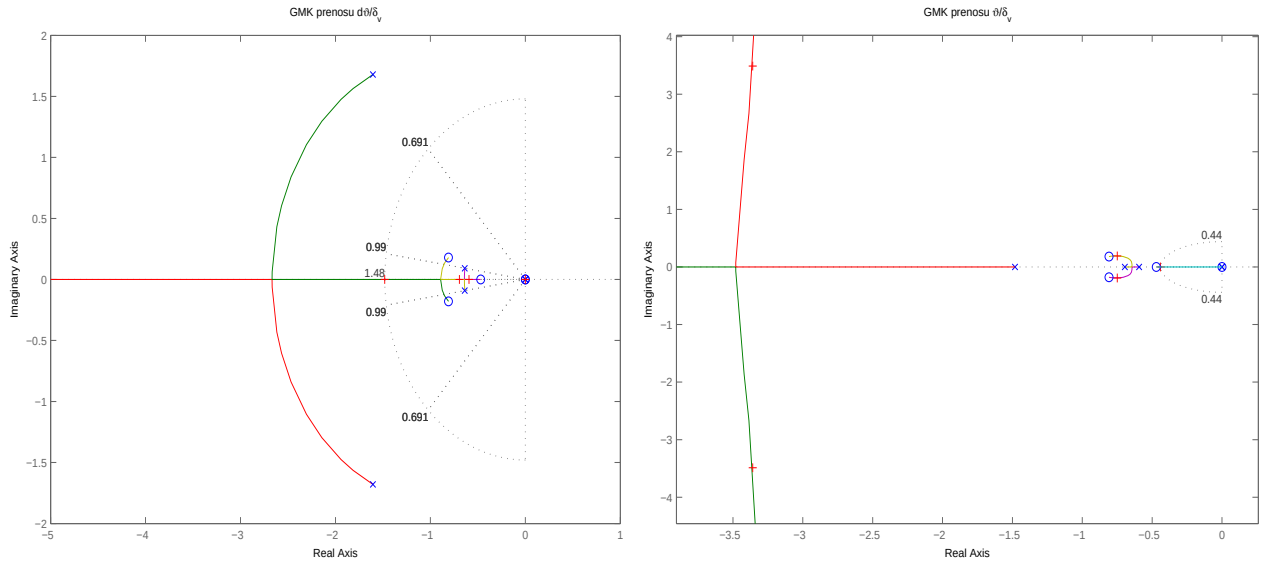
Z rovnice 10 vidíme, že konštatný poryv vetra sa pri stabilizácii výšky mení na signál "rampa", ktorý autopilot v kapitole 6.3 nedokáže potlačiť. Regulátor v spätnej väzbe $\dot{H}$ má preto za úlohu potlačiť rušenie spôsobené vertikálnym poryvom vetra a regulátor výšky už len potlačí konštatnú chybu, ktorá vznikne integrovaním nenulových hodnôt počas prechodového deja stabilizácie vertikálnej rýchlosti.

Z uvedeného vyplýva, že podmienkou úspešnej realizácie tohto systému je presnosť regulácie $\dot{H}$, ktorá musí potlačiť rušenie bez statickej chyby.

V nasledujúcej syntéze uvažujeme prenos servomechanizmu výškovky $F_{SM}(s) = 1$.

6.4.1 Nastavenie autopilota

V prípade stabilizácie barometrickej výšky nastavíme tlmič a autopilot pozdĺžneho sklonu tak, aby sme systém pretlmili. Výsledné konštanty sú: $K_{\dot{\vartheta}} = 1,11$ a $K_{\vartheta} = 4,96$. Výsledné GMK takto nastaveného autopilota pozdĺžneho sklonu je zobrazené na grafoch 11[2].



Obr. 11: GMK - Nastavenie tlmiča a autopilota pozdĺžneho sklonu pre stabilizáciu výšky

[2]Výsledné nastavenie je zobrazené prostredníctvom krížikov.

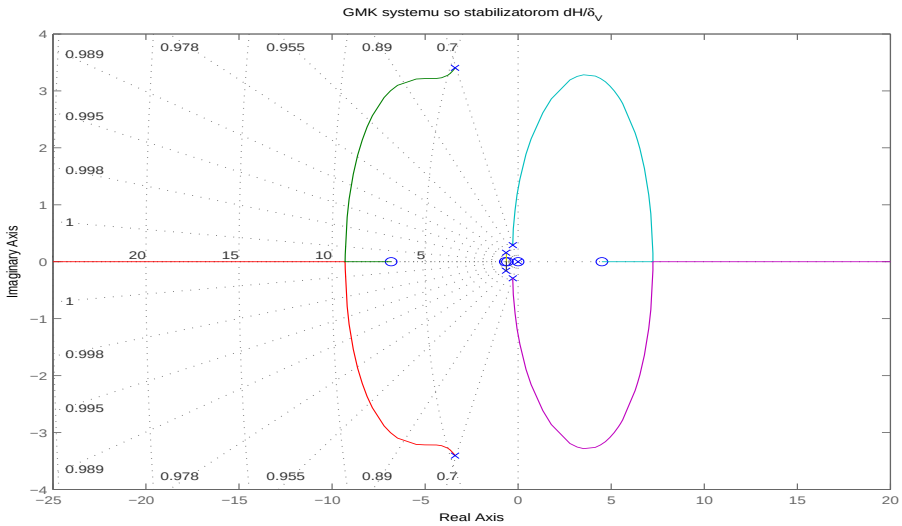
6.4.2 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti

Ako som už spomínal, rýchlosť a presnosť stabilizácie vertikálnej rýchlosti sú rozhodujúcimi faktormi pri tomto druhu stabilizácie barometrickej výšky.

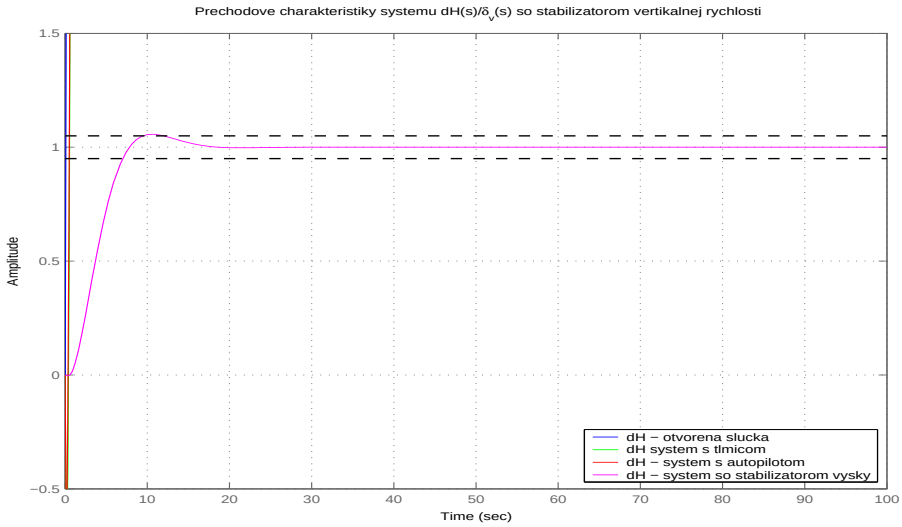
Rozdiel $(\vartheta - \alpha)$ z rovnice 5 vnáša do systému nestabilnú nulu, ktorú môžeme pozorovať na grafe 12. Táto nula spôsobí, že systém bude podmienene stabilný, čo obmedzuje voľbu koeficientu $K_{\dot{H}}$.

Pri voľbe koeficientu zosilnenia $K_{\dot{H}}$ sa snažíme, aby bola stabilizácia čo najrýchlejšia a bez statickej chyby. Práve z dôvodu jej odstránenia vnesieme do korekčného členu integračný prvok.

Výsledný korekčný člen má prenos $F_{\dot{H}}(s) = \frac{0{,}02}{s}$. Na obrázkoch 12 a 13 vidíme GMK a prechodovú charakteristiku takto nastaveného systému. Pozorujeme, že čas stabilizácie je $t_r =$ 7s a že systém nevykazuje statickú chybu.



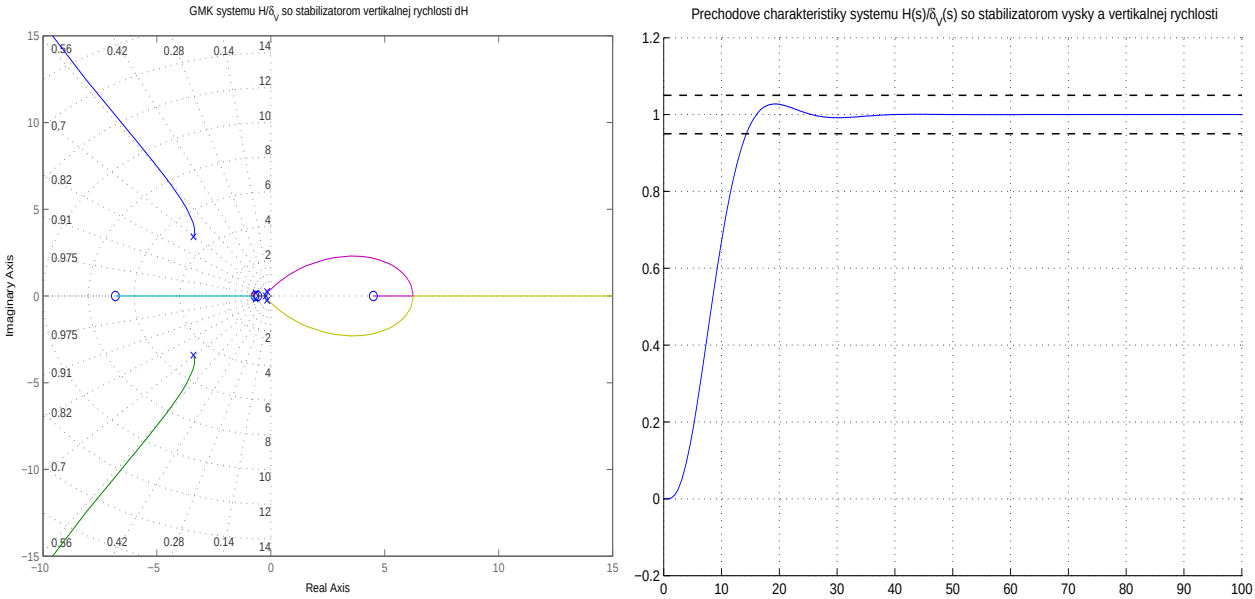
Obr. 12: GMK stabilizácia vertikálnej rýchlosti



Obr. 13: prechodová charakteristika $\dot{H}(s)/\dot{H}_1(s)$

6.4.3 Nastavenie stabilizátora výšky

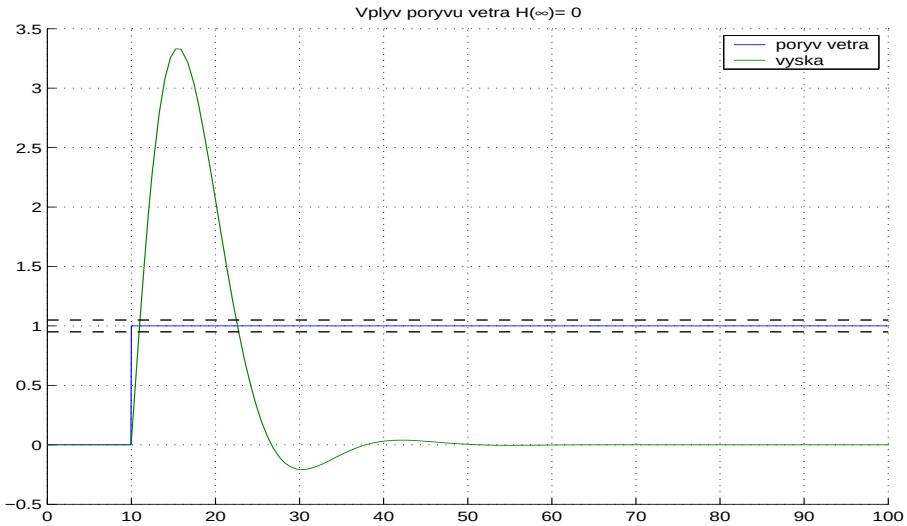
Koeficient zosilnenia K_H znovu nastavujeme tak, aby bola regulácia výšky čo najrýchlejšia s priateľným prekmytom a bez statickej chyby. Výsledné zosilnenie vyide $K_H = 0,12$.



Obr. 14: GMK stabilizácie barometrickej výšky a Prechodová charakteristika $H(s)/H_1(s)$

Grafy 14 zobrazujú GMK a prechodovú charakteristiku takto nastaveného systému. Môžeme vidieť, že čas odozvy je $t_r = 15$s a že systém nevykazuje statickú chybu.

6.4.4 Stabilizácia pri konštantnej, nenulovej hodnote poryvu vetra



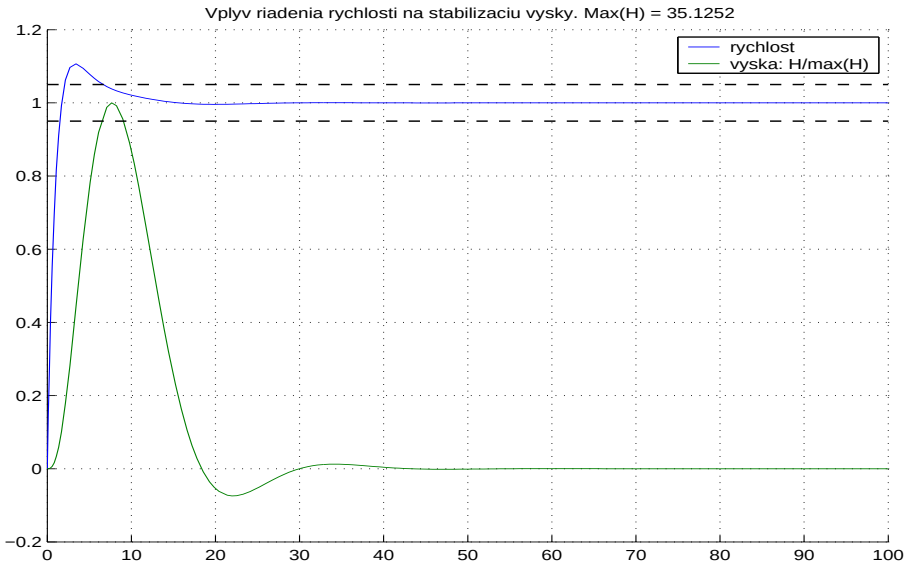
Obr. 15: Stabilizácia vertikálnej rýchlosti: $H(s)/U_Y(s)$

Z grafu 15 vidíme, že počiatočná myšlienka zavedenia spätnej väzby od výstupu $\dot{H}$ ako rozhodujúceho prvku odstránenia statickej chyby na výstupe H, bola správna. Systém stabili-

zácie výšky úplne odstraňuje chybu spôsobenú vertikálnym poryvom vetra. Maximálna hodnota zmeny výšky je 3,5 metra.

6.4.5 Vplyv riadenia rýchlosti na stabilizáciu výšky

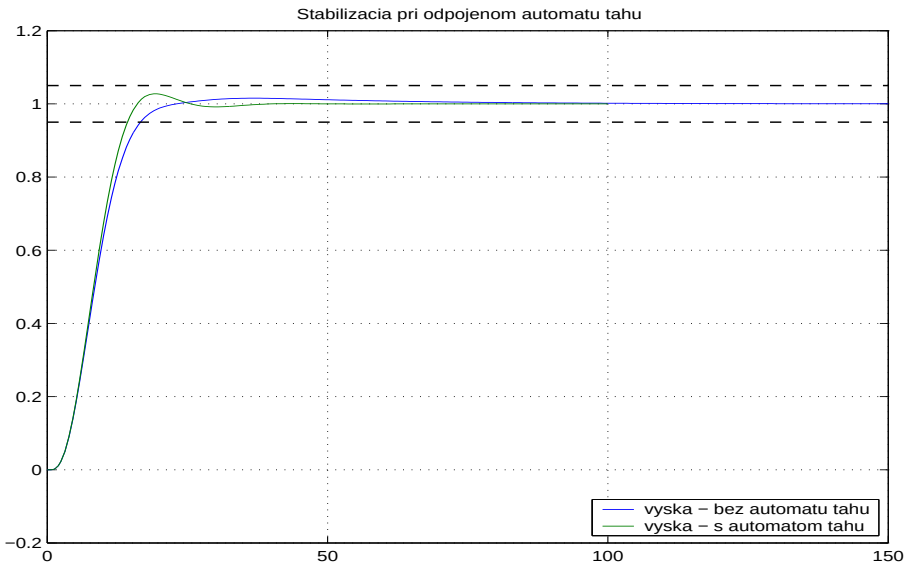
Z grafu 16 vidíme, že riadenie rýchlosti nemá vplyv na ustálenú hodnotu výšky pri tomto stabilizátore. Po úvodnom vychýlení vracia autopilot výšku do nastavenej hodnoty.



Obr. 16: $H(s)/H_1(s)$ a $V(s)/V_1(s)$ pri riadení rýchlosti

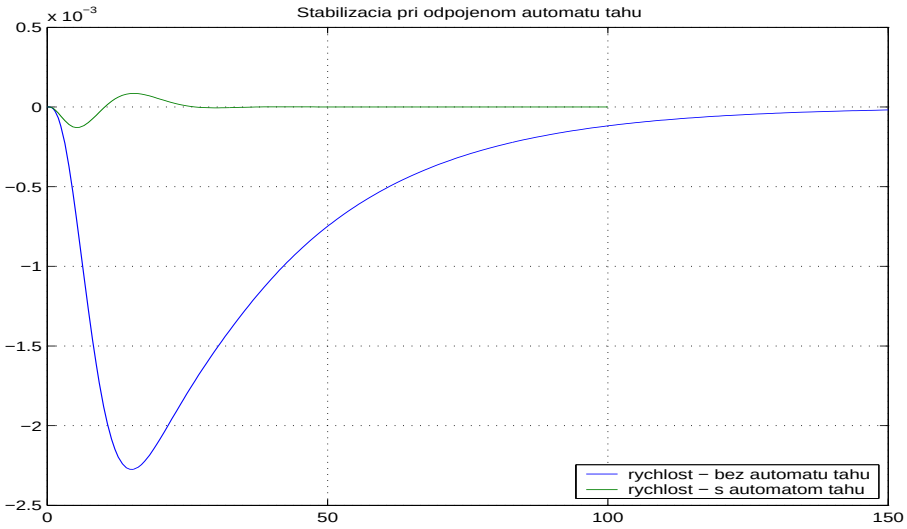
6.4.6 Stabilizácia výšky bez automatu ťahu

Z grafu 17 vidíme, že odpojenie automatu ťahu nemá skoro žiadny vplyv na dynamiku stabilizácie barometrickej výšky. Nepatrne sa spomalila odozva systému.



Obr. 17: $H(s)/H_1$ pri odpojenom automate ťahu

Odpojenie automatu ťahu ma výrazný, avšak očakávaný vplyv na dynamiku vzdušnej rýchlosti, ako to ukazuje charakteristika rýchlosti na obrázku 18 zodpovedajúci nastavovaniu výšky podľa priebehu na grafu 17.



Obr. 18: Vplyv odpojenia automatu ťahu na priebeh stabilizácie rýchlosti

6.4.7 Zhrnutie

V predchádzajúcich kapitolách sme si ukázali, že systém automatického riadenia výšky definovaný rovnicou $-\delta_v = K_{\dot{\vartheta}}\dot{\vartheta} + K_{\vartheta}\vartheta + K_{\dot{H}}\dot{H} + K_H H$ má výborné vlastnosti pri jej regulovaní:

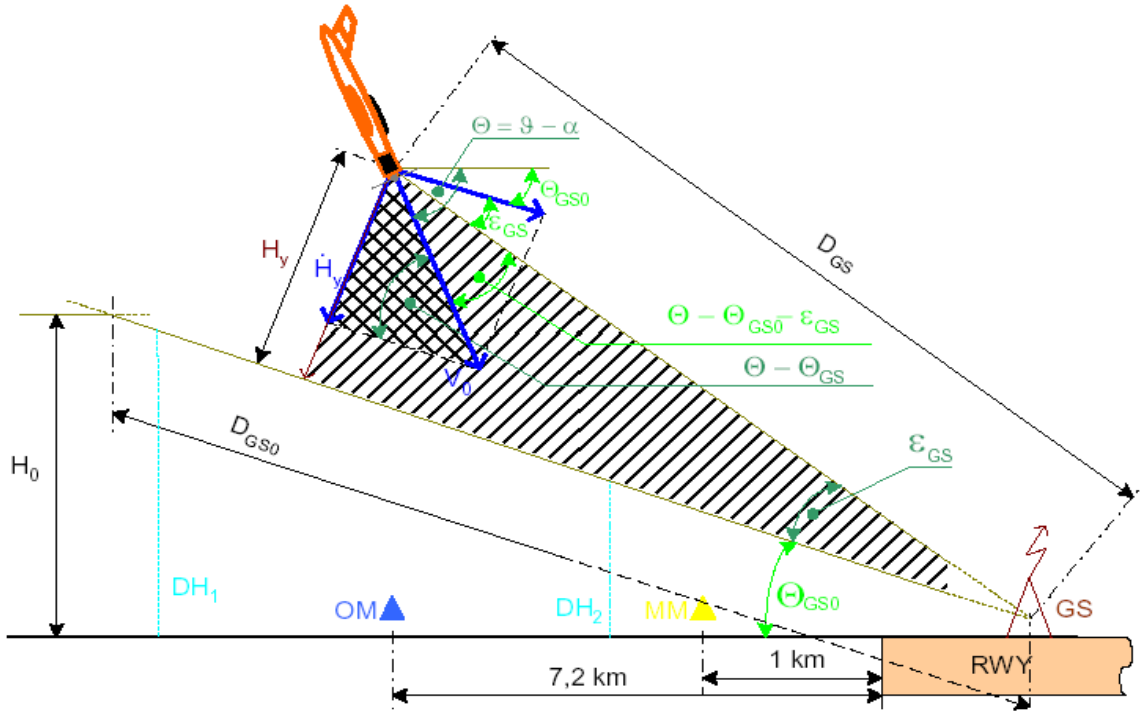
- čas regulácie 15s
- prekmit 5%
- statická chyba v ustálenej hodnote je nulová

Zároveň sme videli, že tento systém *potláča rušenie spôsobené konštatným vertikálnym poryvom vetra*, zistili sme, že *udržiava nastavenú výšku aj pri zmene rýchlosti* a nakoniec, že *na jeho fungovanie má automat ťahu, respektíve jeho odpojenie, minimálny vplyv.*

7 Let v zostupnej rovine - Glideslope

Let v zostupnej rovine začína po pretnutí zostupnej roviny na čiare zostupu a končí vo výške rozhodnutia, poprípade zahájením manévru podrovnania. [1]

7.1 Kinematické rovnice



Obr. 19: Let v zostupnej rovine - obrázok je prevzatý z knihy [1]

Z obrázku 19 vyplývajú nasledovné vzťahy:

$$\frac{H_y}{D_{GS}} = \sin(\varepsilon_{GS}); \qquad \frac{\dot{H}_y}{V_0} = sin(\Theta - \Theta_{GS0}) \tag{11}$$

Po linearizácii[3] a substitúcii dostávame vzťah:

$$\varepsilon_{GS} = \frac{H_y}{D_{GS}} = \frac{V_0}{D_{GS}} \cdot \int_0^t (\Theta - \Theta_{GS0}) d\tau \tag{12}$$

Vzdialenosť D_{GS} vo vzťahu 12 je premenná a môžeme ju vyjadriť rovnicou:

$$D_{GS} = D_{GS0} - V_0 \int_0^t \cos(\Theta - \Theta_{GS0} - \varepsilon_{GS}) d\tau \equiv {}^4 D_{GS0} - V_0 t \tag{13}$$

Po dosadení tohto tvaru do rovnice 12 dostávame výsledný integrálny tvar:

$$\varepsilon_{GS} = \frac{V_0}{D_{GS0} - V_0 t} \cdot \int_0^t (\Theta - \Theta_{GS0}) d\tau \tag{14}$$

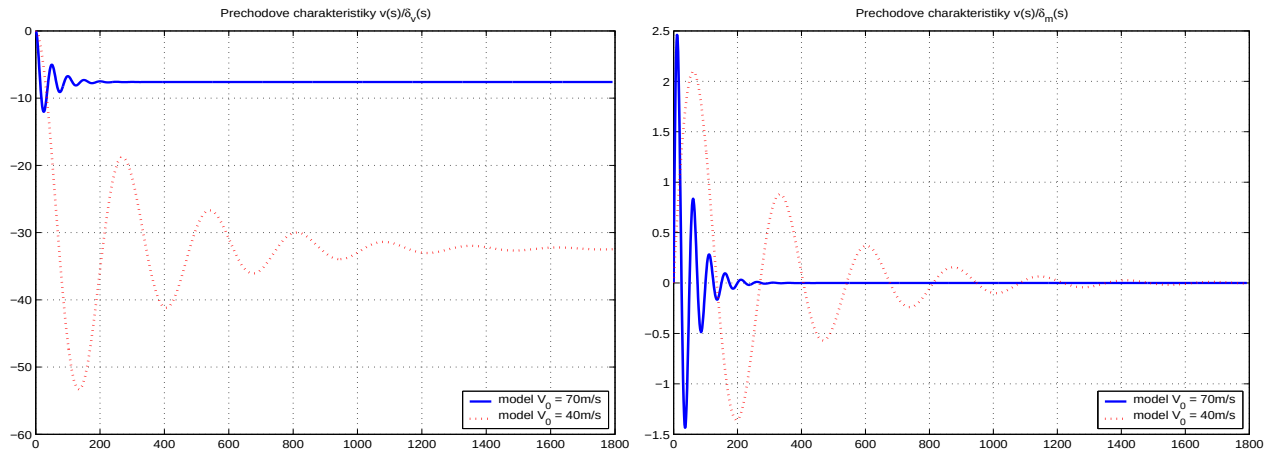
[3] $\sin(x) = x$; pre $x = \pm 5°$
[4] $\cos(x) = 1$; pre $x = \pm 5°$

Z rovnice 14 vyplýva zväčšovanie časovo premenného koeficientu pri lete v zostupnom paprsku smerom k vysielaču. Jeho rast je matematickým vyjadrením zužovania zostupového paprsku s približovaním sa k vysielaču GS a má za následok zväčšovanie citlivosti systému automatického vedenia lietadla po zostupnom paprsku[1].

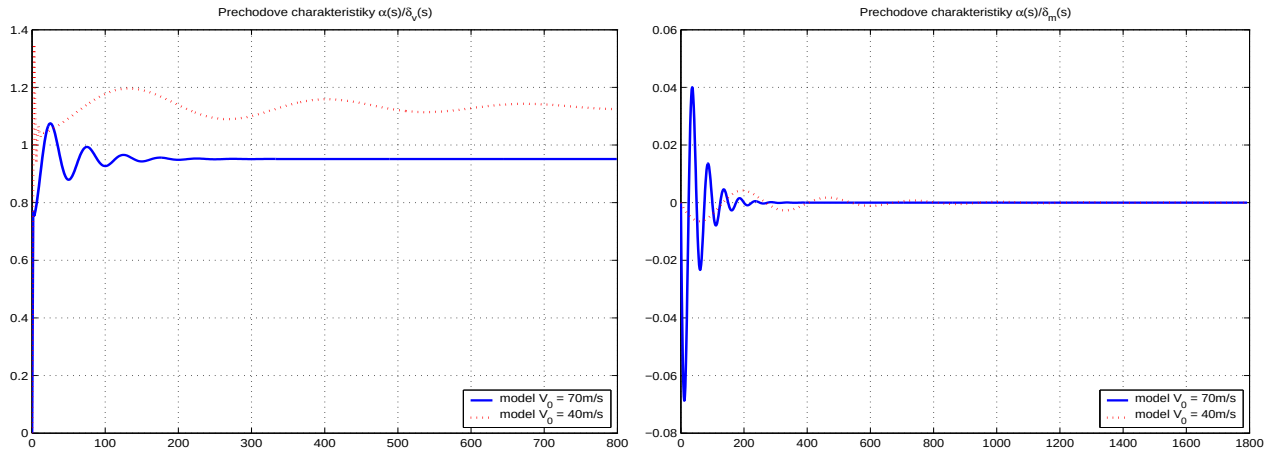
7.2 Vlastnosti lietadla pri lete v zostupnom paprsku

Zatiaľčo cestovná rýchlosť lietadla L410, ktorého model som mal k dispozícii, je približne 70 m/s, jeho približovacia rýchlosť je len 40 m/s. Rýchlosť je jedným zo stavových parametrov a výrazne ovplyvňuje vlastnosti lietadla. Z tohto dôvodu sme pre simuláciu letu v zostupnom paprsku museli použiť linearizovaný model zodpovedajúci letu približovacou rýchlosťou.

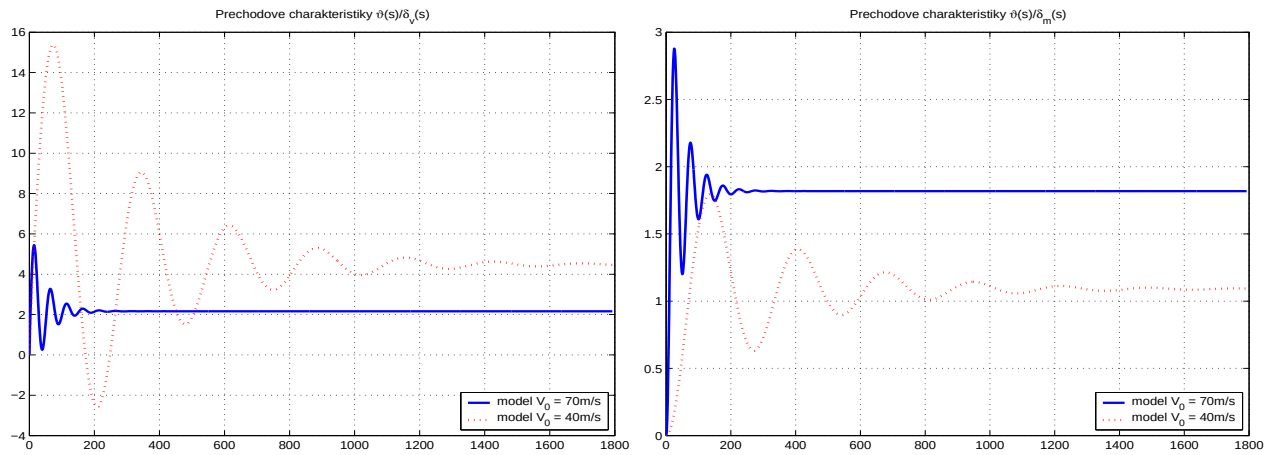
Nasledovné prechodové charakteristiky porovnávajú správanie jednotlivých stavových veličín pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou.



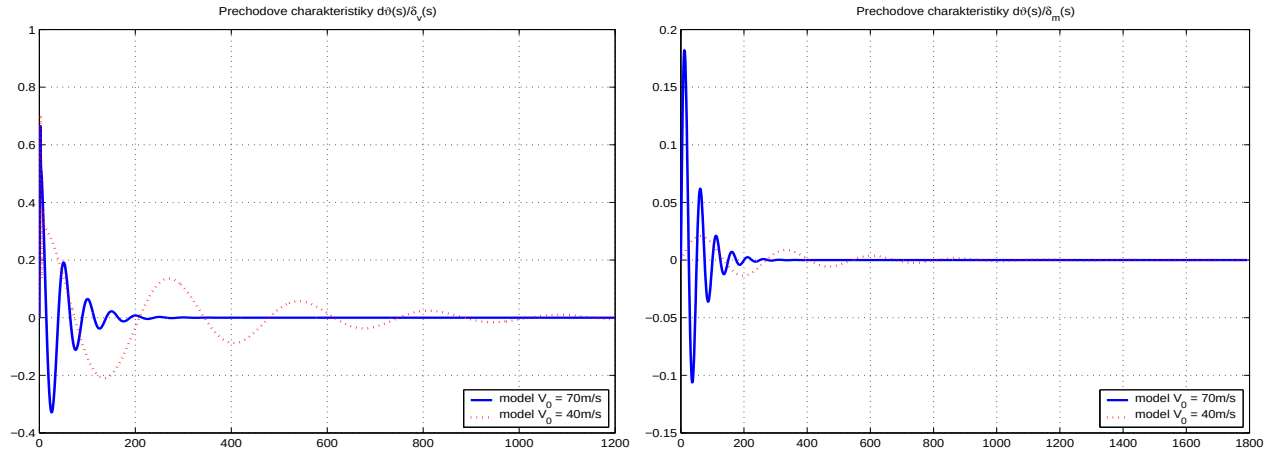
Obr. 20: Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{v(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{v(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou



Obr. 21: Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\alpha(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\alpha(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou



Obr. 22: Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\vartheta(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\vartheta(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a priblížovacou rýchlosťou



Obr. 23: Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a priblížovacou rýchlosťou

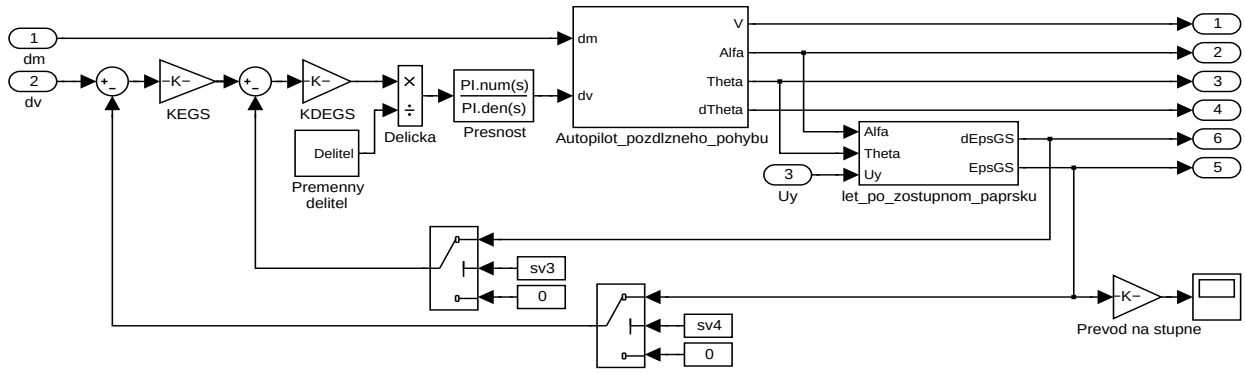
Všetky vyššie uvedené grafy ukazujú výrazné spomalenie dynamických dejov, ktoré spôsobilo zníženie rýchlosti.

7.3 Štruktúra autopilota

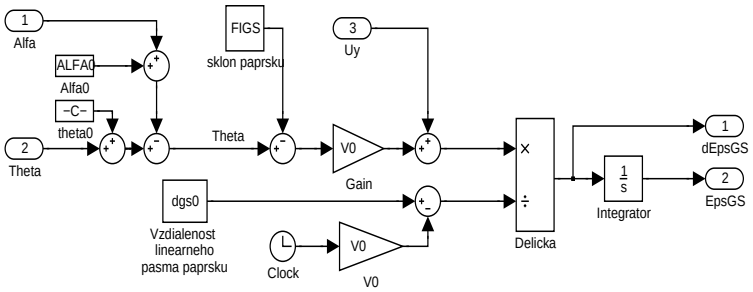
Regulačný obvod na obrázku 24 vychádza z autopilota pozdĺžneho sklonu, ktorý je doplnený systémom, ktorý počíta odchýlku ε_{GS} podľa kinematickej rovnice 14.

Obrázok 25 zobrazuje detail bloku výpočtu kinematickej rovnice letu v zostupnom paprsku. Konštanty α_0 a ϑ_0 zodpovedajú ustáleným hodnotám týchto veličín pri stabilizácii barometrickej výšky, teda v móde, v ktorom lietadlo letí pred začiatkom zostupu.

Rast koeficientu zosilnenia, popísaný v kapitole 7.1, môže spôsobiť, že uzavretý regulačný systém autopilot-lietadlo sa dostane do nestabilných hodnôt. Z toho dôvodu je regulačný obvod doplnený o premenný deliteľ, ktorý pravidelne znižuje zosilnenie priamej vetvy tak, aby korene regulačného obvodu zostali v stabilných hodnotách.



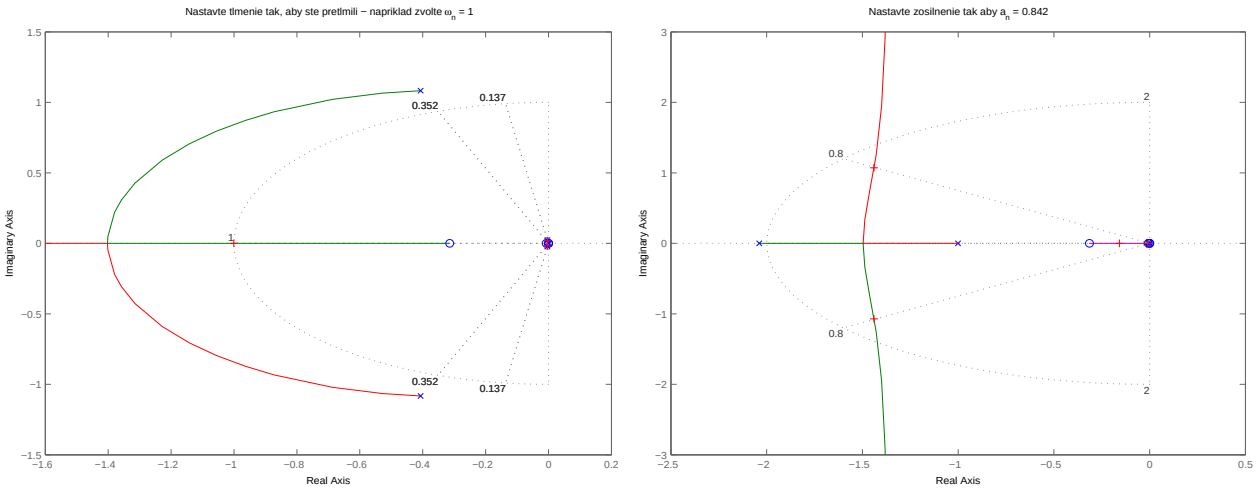
Obr. 24: Schéma systému stabilizácie letu v zostupnom paprsku - klasický autopilot



Obr. 25: Detail bloku výpočtu kinematickej rovnice ε_{GS} - blok "let po zostupnom paprsku"

7.4 Nastavenie a výsledky

GMK na obrázku 26 ukazujú nastavenie tlmiča a autopilota pozdĺžneho sklonu pre let v zostupnej rovnice[5]. Tlmič je nastavený tak, aby bol systém pretlmený, autopilot upravuje prirodzenú frekvenciu a tlmenie zároveň. Použil som PI servomechanizmus, aby bola regulácia pozdĺžneho sklonu bez statickej chyby.



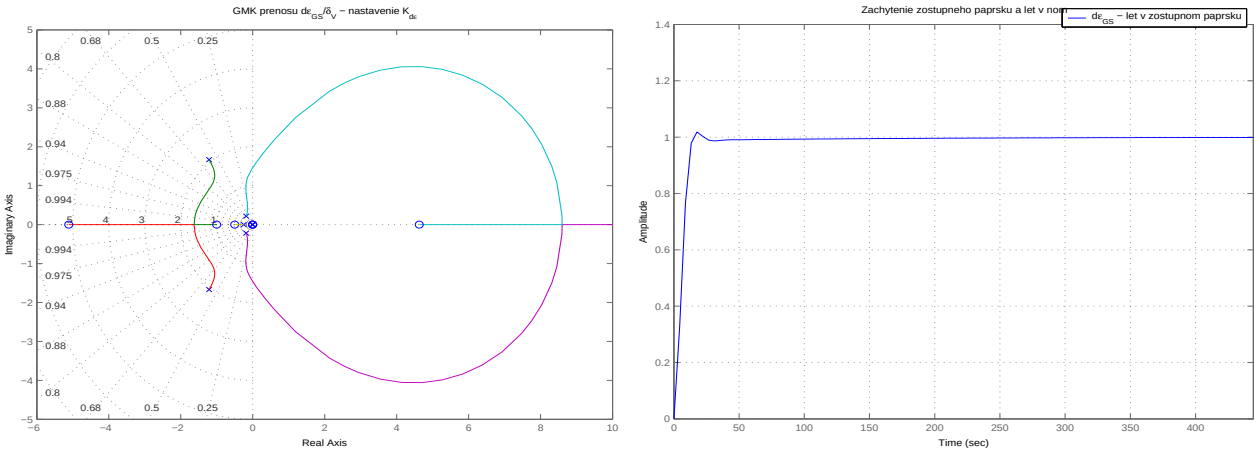
Obr. 26: Nastavenie koeficientov $K_{\dot{\vartheta}}$ a K_{ϑ} autopilota pozdĺžneho sklonu pre let v zostupnom paprsku

[5]Nové nastavenie je zobrazené krížikmi

Ako vidíme na schéme na obrázku 25 do kinematickej rovnice zasahuje aj vertikálny poryv vetra - vstup U_Y, ktorý pôsobí na reguláciu letu v zostupnej rovine ako rušenie. Aby sme úplne potlačili konštantné rušenie spôsobené vetrom, zavádzame reguláciu zmeny odchýlky od zostupnej roviny $\dot{\varepsilon_{GS}}$. Vychádzame pritom z podobnej úvahy, ako v prípade regulácie výšky a nastavenia regulátora vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$ - viz kapitola 6.4.

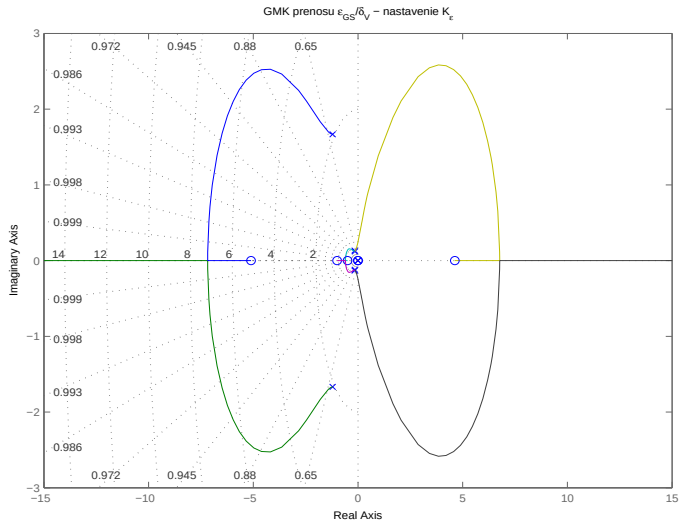
Regulátor $K_{\dot{\varepsilon_{GS}}}$ na schéme 24 je doplnený o proporcionálne integračný blok "Presnosť", ktorý odstraňuje statickú chybu v regulácii $\dot{\varepsilon_{GS}}$.

Výsledné GMK a prechodovú charakteristiku regulácie $\dot{\varepsilon_{GS}}$ zobrazujú grafy na obrázku 27.



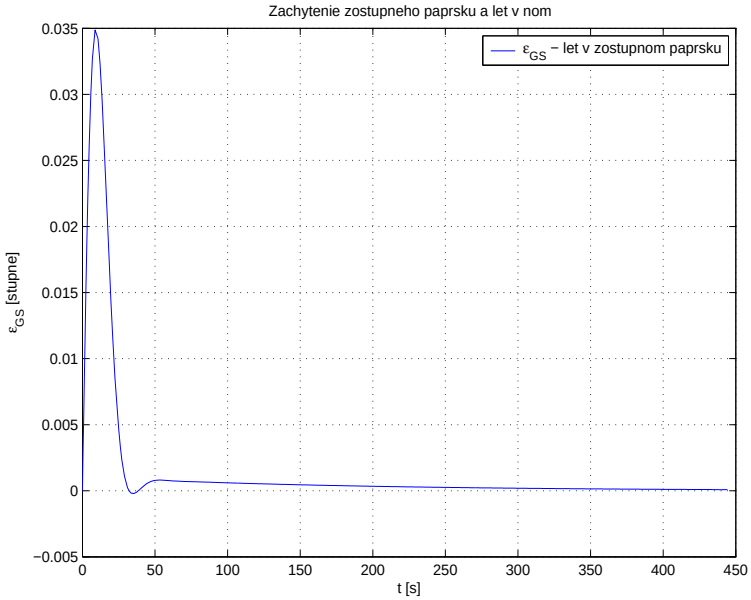
Obr. 27: Výsledné GMK a prechodová charakteristika systému regulácie $\dot{\varepsilon_{GS}}$

Systém regulácie odchylky od zostupnej roviny tvorí spätná väzba popísaná prenosom $\varepsilon_{GS}(s)/\varepsilon_{GS1}(s)$. Chceme, aby lietadlo letelo v zostupnom paprsku a tak nastavujeme výchylku $\varepsilon_{GS1}(s)$ na nulovú hodnotu. Výsledné GMK systému regulácie odchýlky od zostupnej roviny môžeme pozorovať na obrázoku 28.



Obr. 28: GMK prenosu $\varepsilon_{GS}(s)/\varepsilon_{GS1}(s)$ regulácie odchýlky od zostupnej roviny

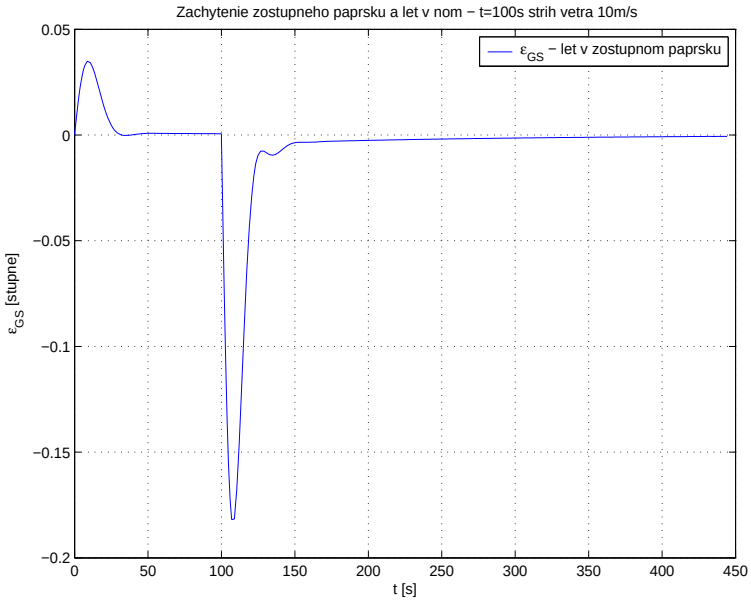
Obrázok 29 zobrazuje vývin odchýlky ε_{GS} od momentu vletu do paprsku zostupného majáku až po dosiahnutie výšky rozhodnutia. Vidíme prvotný rast odchýlky až na maximálnu hodnotu 0,035° po vlete do paprsku a jej postupné potlačenie. Od 50. sekundy regulácie je odchýlka od zostupnej roviny menšia ako 10^{-3}°, takže môžeme považovať prechodový dej za zastabilizovaný.



Obr. 29: Vývoj odchýlky ε_{GS} od momentu vletu do paprsku zostupného majáku až po dosiahnutie výšky rozhodnutia

7.4.1 Odolnosť voči vertikálnemu poryvu vetra

Schopnosť potlačiť rušenie spôsobené konštatným vertikálnym vetrom je jedným zo základných predpokladov úspešného fungovania systému stabilizácie letu v zostupnej rovine. Obrázok 30 zobrazuje odpoveď vyššie popísaného systému na tento druh poruchy. Vidíme, že strih vetra veľkosti 10 m/s v čase 100s spôsobil maximálnu výchylku -0,18°, ktorá bola autopilotom úplne potlačená. Maximálna výchylka veľkosti -0,18° je akceptovateľná, pretože stále zostávame v lineárnom pásme signálu zostupného paprsku (GLIDESLOPE).



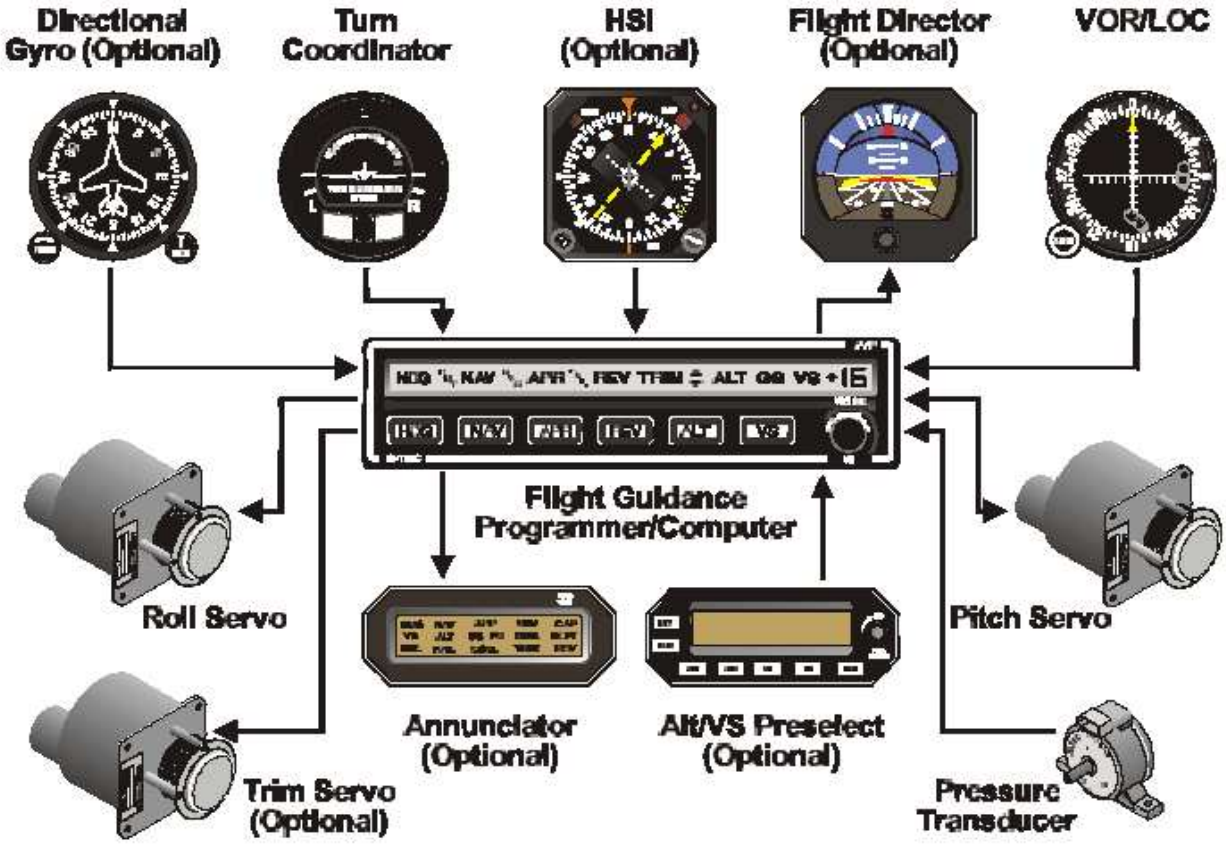
Obr. 30: Vývoj odchýlky ε_{GS} pri lete v zostupnej rovine - v čase t=100s, strih vetra veľkosti 10 m/s

Časť II
Úsporný autopilot

Ako sme videli v predchádzajúcej kapitole, klasické systémy automatického riadenia sú založené na meraniach gyroskopickými prístrojmi. Kedže na prístrojové vybavenie má vplyv okrem funkčnosti aj hmotnosť inštalovaných riadiacich a informačných systémov, môže byť váha u malých lietadiel, nevybavených inerciálnym referenčným systémov a aerometrickou ústredňou, faktorom rozhodujúcim o vybavenosti lietadla automatickými systémami riadenia.

Kedže nemožno ušetriť na hmotnosti servomechanizmov autopilota, vzhľadom na prenášaný výkon na pohon kormidiel, hľadajú sa úsporné prístrojové zabezpečenia, ktoré majú za následok zmenu štruktúri autopilota voči štandardnému usporiadaniu.

Jednou z možností v pozdĺžnom riadení je vypustenie pomerne ťažkej a nákladnej gyrovertikály a jej nahradenie príslušným akcelerometrom lineárneho zrýchlenia. V tomto prípade nebude základným módom činosti autopilota stabilizácia pozdĺžneho sklonu, ale stabilizácia vertikálnej rýchlosti, ktorú získame elektrickou cestou z údaja barometrického výškomeru, ktorým môže byť linearizovaný merací prístroj tlaku vzduchu a ktorý náleží do štandardného vybavenia lietadla. Táto úprava regulačného reťazca znamená pomerne značnú redukciu hmotnosti autopilota so zachovaním skromných nákladov.



Obr. 31: Schéma prístrojového vybavenia autopilotu S-TEC System 55 - obrázok prevzatý z knihy [3]

8 Prístrojové vybavenie úsporného autopilota: systém S-TEC S55

Autopilot System 55 od americkej spoločnosti S-TEC je jedným z predstaviteľov úsporných autopilotov, s ktorým počíta aj Aero Vodochody vo svojom prototype malého obchodného lietadla AE-270. Jeho rozšírenie je jedným z dôvodov, prečo sa stal modelom, alebo vzorom, pre štruktúru študovaného systému automatického riadenia.

8.1 Prístrojové vybavenie

Autopilot S-TEC S55 umožňuje riadenie lietadla v pozdĺžnej aj stranovej rovine. Obrázok 31 ukazuje schému meracích a akčných členov autopilota S55.

O riadenie v pozdĺžnej rovine sa stará *pitch computer*, ktorý spracováva signál z nasledovných senzorov a ovládacích prvkov:

1. Základných
   - Barometrický výškomer (*presure transducer*) - meranie H, $\dot{H}$
   - Akcelerometer (*accelerometer*) - meranie a_n
   - Ukazovateľ odchýlky od zostupného parsku ε_{GS} (*Glideslope Deviation Indicator*)
   - Nastavovanie hodnoty vertikálnej rýchlosti (*Vertical Speed Modifier Control*)
2. Voliteľných
   - Prepínač výšky (*Altitude Selector/Alerter*)
   - Prepínač módov nastavenia výšky/vertikálnej rýchlosti (*Altitude/Vertical Speed Selector*)

Výstupný signál z počítača pozdĺžneho pohybu ovláda servomechanizmus klopenia (*pitch servo*), ktorý nastavuje výchylku výškovky δ_v.

Stranový pohyb ovláda počítač stranového pohybu (*roll computer*), ktorý spracováva signály z nasledovných senzorov a ovládacích prvkov:

1. Základných
   - Smerový zotrvačník (*directional gyro*) - meranie ψ
   - Systém rádiovej navigácie VOR (*VOR/LOC*) - meranie ε_T
   - Koordinátor zatáčky (*turn coordinator*) - meranie ω_y v kordinácii s ω_x
2. Voliteľných
   - Ukazateľ horizontálnej situácie (*H.S.I.*)
   - Prijímač GPS (*GPS deviation indicator*)
   - iné systémy rádiovej navigácie: napr. LORAN

Počítač ovláda servomechanizmus klonenia (*roll servo*), ktorý nastavuje výchylku krídelok δ_k.

8.2 Módy činnosti

V pozdĺžnej rovine umožňuje autopilot S55 nasledovné činnosti:

- Stabilizácia vertikálnej rýchlosti (*mód VS*)
- Stabilizácia výšky (*altitude hold - mód ALT*)
- Zachytenie zostupného paprsku (*glideslope intercept*)
- Let v zostupnej rovine (*glideslope tracking*)

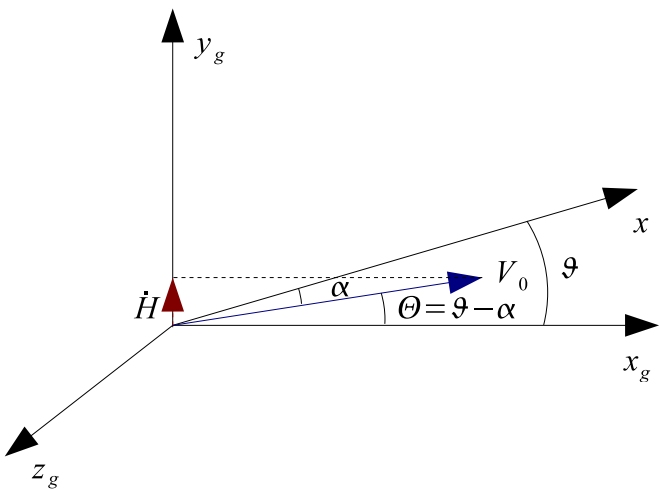
Regulácia stranového pohybu zabezpečuje nasledovné funkcie:

- Stabilizácia lietadla
- Riadená zatáčka
- Zachytenie paprsku (*radio intercept*)
- Let v paprsku rádiomajáku (*radio tracking - módy NAV, APR*)

9 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$ - mód VS

Stabilizácia vertikálnej rýchlosti je pre úsporný autopilot základným režimom činnosti. K ovládaniu lietadla sa využíva signál vertikálnej rýchlosti, ktorý získavame elektrickou cestou z barometrického výškomeru, a signál lineárneho akcelerometru, ktorý meria zrýchlenie pôsobiace na lietadlo v zvislom smere. Pre prvé priblíženie možnej konfigurácie autopilota budeme musieť doplniť existujúci matematický model lietadla o kinematické rovnice vertikálnej rýchlosti a normálového zrýchlenia.

9.1 Rovnica vertikálnej rýchlosti



Obr. 32: Kinematická rovnica vertikálnej rýchlosti

Z obrázku 32 vidíme, že vertikálna rýchlosť $\dot{H}$ je popísaná rovnicou: $\dot{H} = V_0 \sin(\Theta)$. Keďže sa nachádzame v oblasti malých výchyliek, môžeme túto rovnicu linearizovať s použitím vzťahu $\sin(x) = x$ pre $x = \pm 5°$. Pre $\dot{H}$ môžeme teda písať:

$$\dot{H} = V_0 \Theta = V_0(\vartheta - \alpha) \tag{15}$$

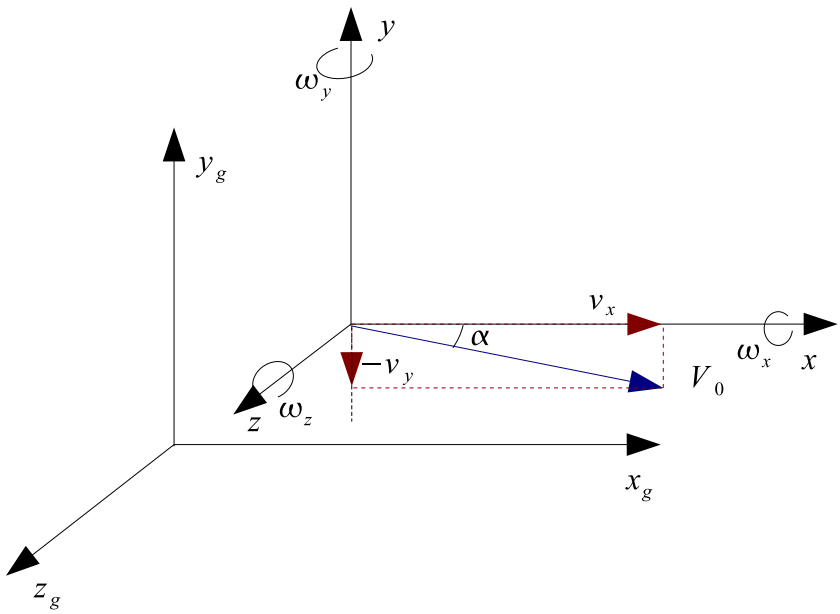
9.2 Kinematická rovnica normálového zrýchlenia

9.2.1 Základná rovnica

Výsledné zrýchlenie súradnicovej sústavy (lietadlo), ktorá sa pohybuje v inej sústave (zemská súradnicová sústava), definujeme vzťahom:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{\omega} \times \vec{v} \tag{16}$$

kde $\vec{\omega}$ definuje rotačný pohyb lietadla v zemskej sústave a $\vec{v}$ rýchlosť posuvnú.



Obr. 33: Základná definícia vektorov sústavy pohybujúcej sa v inej sústave

9.2.2 Linearizácia

Rozpísaním jednotlivých vektorov z kapitoly 9.2.1 na zložky dostávame:

$$\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k} \tag{17}$$

$$\vec{\omega} = \omega_x\vec{i} + \omega_y\vec{j} + \omega_z\vec{k} \tag{18}$$

Realizovaním vektorového súčinu dostáveme pre normálové zrýchlenie a_n nasledujúci vzťah:

$$a_n = a_{y_g} = \dot{v_y} + \omega_z v_x - \omega_x v_z \tag{19}$$

Uvažovaním malých odchyliek od ustáleného vzťahu môžeme jednotlivé prvky rovnice 19 nahradiť nasledovnými linearizovanými vzťahmi[6]:

$$\begin{gathered} v_x = V_0 \\ v_y = -V_0\alpha \\ v_z = V_0\beta \\ \dot{v_y} = -V_0\dot{\alpha} \\ \omega_x = \dot{\gamma} \\ \omega_y = \dot{\psi} \\ \omega_z = \dot{\vartheta} \end{gathered}$$

Tým sa nám rovnica 19 zjednoduší na tvar:

$$a_n = -V_0\dot{\alpha} + V_0\dot{\vartheta} - V_0\beta\dot{\gamma} \tag{20}$$

Uvažovaním nezávislosti stranového a pozdĺžneho pohybu môžeme posledný člen $V_0\beta\dot{\gamma}$ v rovnici 20 zanedbať, čím dostaneme výsledný linearizovaný tvar rovnice normálového zrýchlenia:

$$a_n = V_0(\dot{\vartheta} - \dot{\alpha}) \tag{21}$$

Tento istý tvar by sme dostali aj v prípade, keď by sme vyšli z linearizovaného vzťahu 15 vertikálnej rýchlosti a definovali normálové zrýchlenie a_n ako $\ddot{H}$.

[6]pre malé výchylky uhlov: $x = \pm 5\ ^\circ$ uvažujeme $\sin x = x$ a $\cos x = 1$

9.2.3 Výsledný tvar rovnice normálového zrýchlenia

Rovnicu 21 môžeme ďalej zjednodušiť ak použijeme druhú dynamickú rovnicu lietadla: $\dot{\alpha} = -a_{21}v - a_{22}\alpha + \dot{\vartheta} + c_{22}\delta_V$. Potom môžeme definovať a_n vzťahom: $a_n = V_0(a_{21}v + a_{22}\alpha - c_{22}\delta_V)$. Kedže uvažujeme nulovú zmenu rýchlosti a zanedbávame vplyv výškovky, pretože koeficient c_{22} je o rád menší ako a_{22}, môžeme normálové zrýchlenie definovať kinematickou rovnicou:

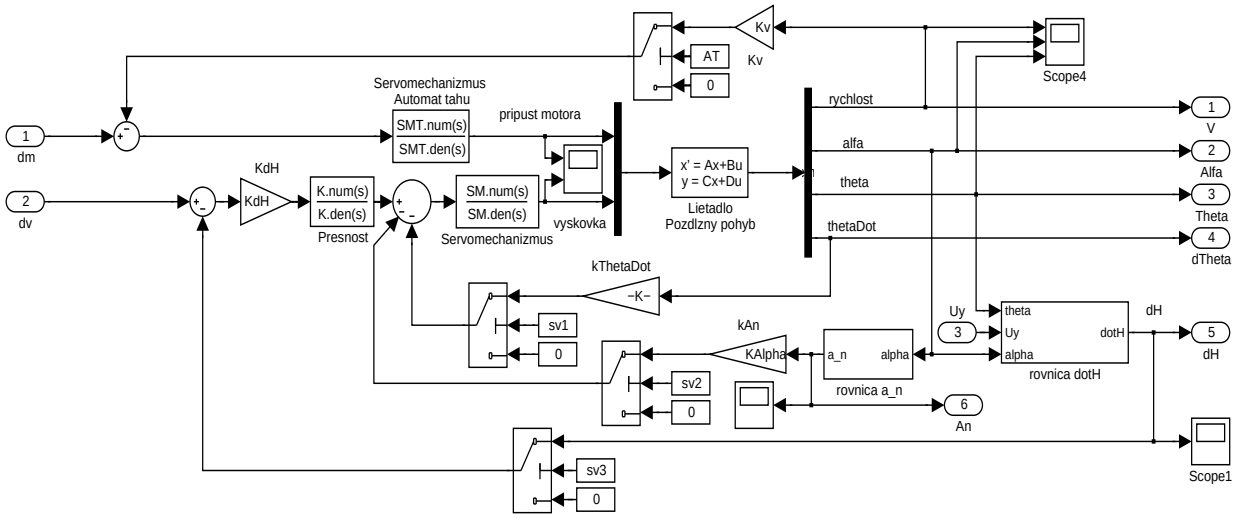
$$a_n = V_0 \cdot a_{22} \cdot \alpha \tag{22}$$

9.3 Štruktúra autopilota

Štruktúra možného autopilota je na obrázku 34. Blok ROVNICA DOTH realizuje rovnicu 15 a je doplnený o signál bočný poryv U_y, výsledný simulovaný vzťah je teda:

$$\dot{H} = V_0(\vartheta - \alpha) + U_y \tag{23}$$

Blok ROVNICA A_N obsahuje linearizovaný vzťah normálového zrýchlenia z rovnice 22.

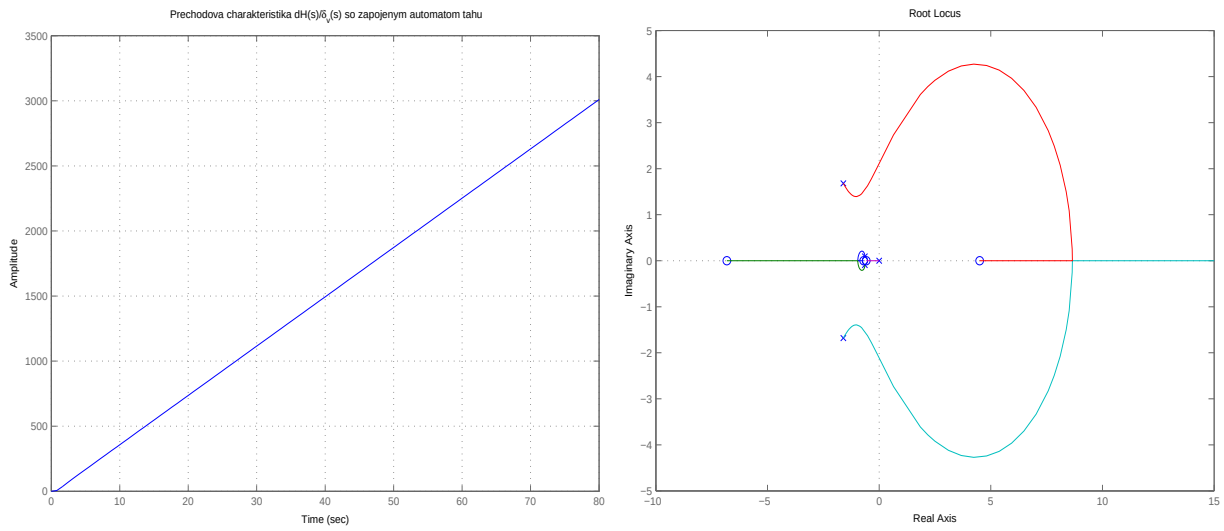


Obr. 34: Schéma úsporného autopilota stabilizácie vertikálnej rýchlosti

Schéma autopilota obsahuje tiež spätnú väzbu od vzdušnej rýchlosti, tzv. automat ťahu, ktorá zabezpečí nemenosť rýchlosti V_0 počas stabilizácie vertikálnej rýchlosti. Automat ťahu je realizovaný prenosovým koeficientom $K_V = 1$ a prenosom servomechanizmu $F_{SMT} = \frac{3{,}087s+1}{s}$, ktorý vykázal najlepšie charakteristiky pre stabilizáciu vzdušnej rýchlosti. Servomechanizmus výškovky je simulovaný P - servomechanizmom s prenosom $F_{SM} = 1$.

V nasledovnom pokuse uvažujeme lietadlo v ustálenom priamočiarom lete rýchlosťou $V_0 = 70m/s$. Snažíme sa riadiť vertikálnu rýchlosť $\dot{H}$, teda nasimulovať základný mód autopilota STEC S-55 - stabilizácia vertikálnej rýchlosti.

Prechodová charakteristika otvorenej sľučky prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ systému s automatom ťahu je nestabilná s astatizmom prvého rádu, čo môžeme pozorovať na obrázku 35. Na grafe GMK vidíme jeden koreň v počiatku komplexnej roviny, ktorý tento astatizmus spôsobuje. Tento koreň je vnesený do systému automatom ťahu, respektíve jeho servomechanizmom typu PI. Ako uvidíme ďalej, tento astatizmus má priaznivý vplyv na presnosť regulácie.



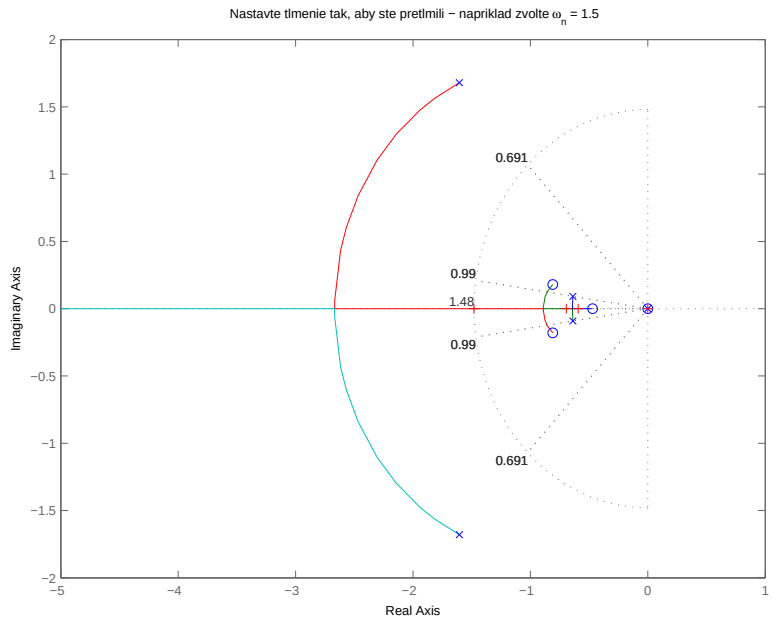
Obr. 35: Prechodová charakteristika a GMK otvorenej sľučky $\dot{H}/\delta_V(s)$

9.4 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti bez spracovania signálu normálového zrýchlenia a_n

Štruktúra takéhoto autopilota zodpovedá schéme 34 s odpojenou spätnou väzbou normálového zrýchlenia, tzn. $sv2 = 0$.

9.4.1 Nastavenie tlmiča

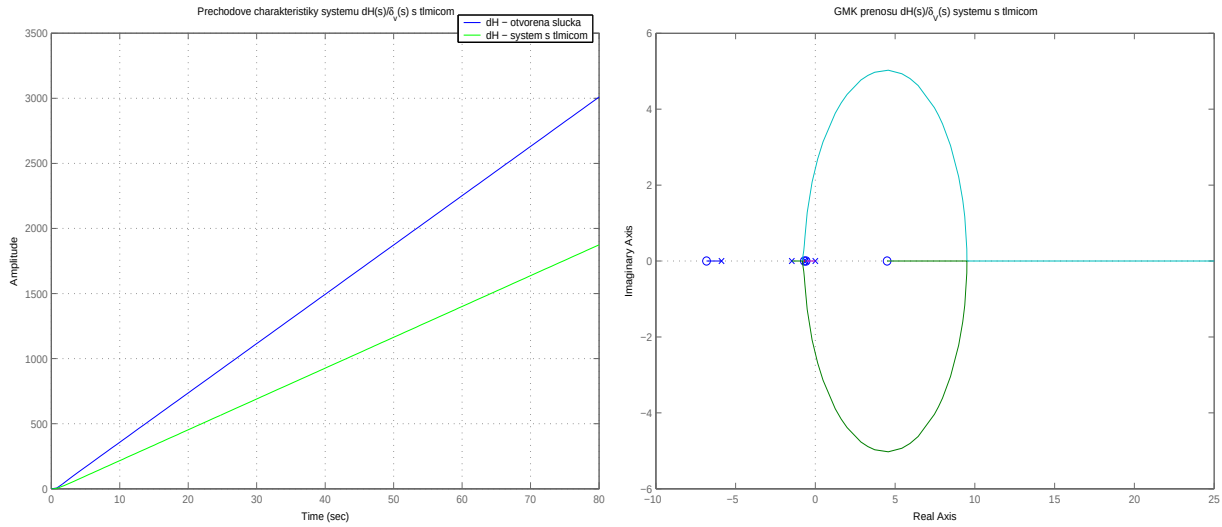
Tlmič nastavujeme v systéme $\dot{\vartheta}(s)/\delta_V(s)$ a realizujeme ho zapojením spätnej väzby 1 z výstupu $\dot{\vartheta}(s)$.



Obr. 36: GMK prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\delta_V(s)$ a nastavenie regulácie

Na grafe 36 vidíme GMK tohto prenosu. Pri regulácii nastavujeme koeficient $K_{\dot{\vartheta}}$ tak, aby sme pretlmili, v tomto prípade tak, aby vlastná frekvencia pólov rýchleho pohybu bola $\omega_n = 1,48$

rad/s. Nové nastavenie je na grafe naznačené krížmi. Vidíme, že pól spôsobujúci astatizmus zostal zachovaný. Pre toto nastavenie je koeficient $K_{\dot{\vartheta}} = 1,1077$.



Obr. 37: Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s tlmičom rýchleho pohybu

Obrázok 37 zobrazuje výslednú prechodovú charakteristiku prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s tlmičom rýchlych kmitov a jeho porovnanie s otvorenou sľučkou. Vidíme, že tlmič spomalil prechodový dej, ale zachoval astatický charakter odpovede, čo potvrdzuje astatický pól na grafe geometrického miesta koreňov.

9.4.2 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti

Stabilizátor vertikálnej rýchlosti realizujeme zavedením spätnej väzby v prenose $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$. Pri nastavení koeficientu spätnej väzby vychádzame z požiadaviek na výslednú prechodovú charakteristiku, ktoré som si zadal nasledovne:

- Čo najkratší čas odpovede $t_r = minimum$
- Maximálny presah $\leq 5\%$

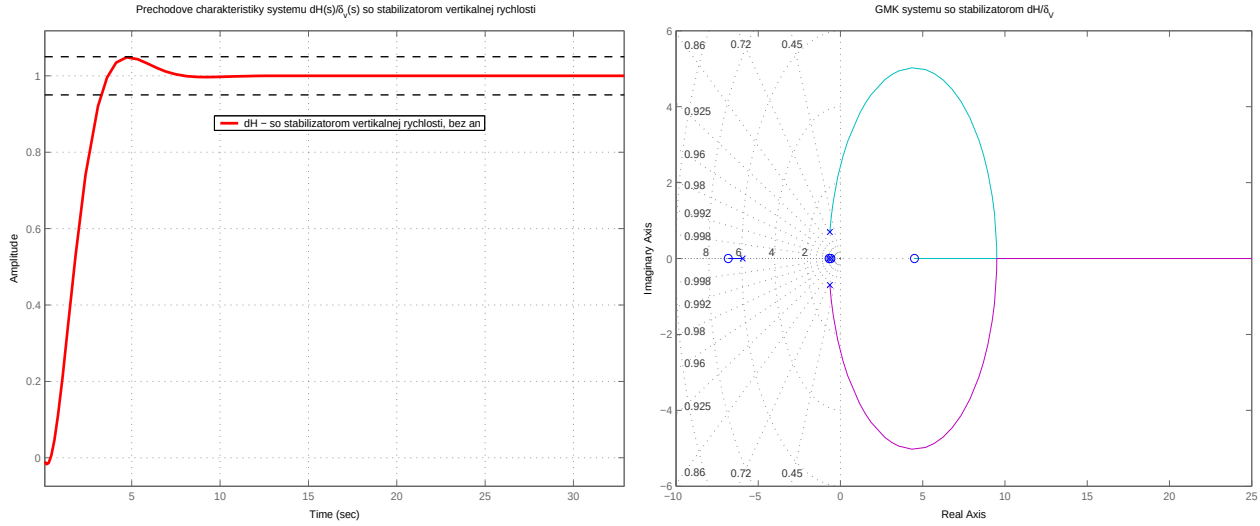
Na GMK z obrázku 37 vidíme, že systém $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ je podmienečne stabilný, čo vnáša ďalšie obmedzenie do voľby prenosového koeficientu $K_{\dot{H}}$, ktorý nemôže byť príliš veľký, aby sme sa nedostali do nestabilnej oblasti.

Nastavenie koeficientu $K_{\dot{H}}$ realizujeme prostredníctvom nástroja *RLTOOL* v prostredí *Matlab*, ktorý nám umožňuje interaktívne nastavenie prenosového koeficientu a kontrolu jeho vplyvu na stabilitu systému a výslednú prechodovú charakteristiku.

Obrázok 38 zobrazuje výsledný prechodový dej a geometrické miesto koreňov s koeficientom spätnej väzby $K_{\dot{H}} = 0,0245$.

Na prechodovej charakteristike pozorujeme stabilnú odozvu bez statickej chyby. Presah odpovede je menší ako 5% (4,9%) a čas odozvy je $t_r = 3,3$ s.

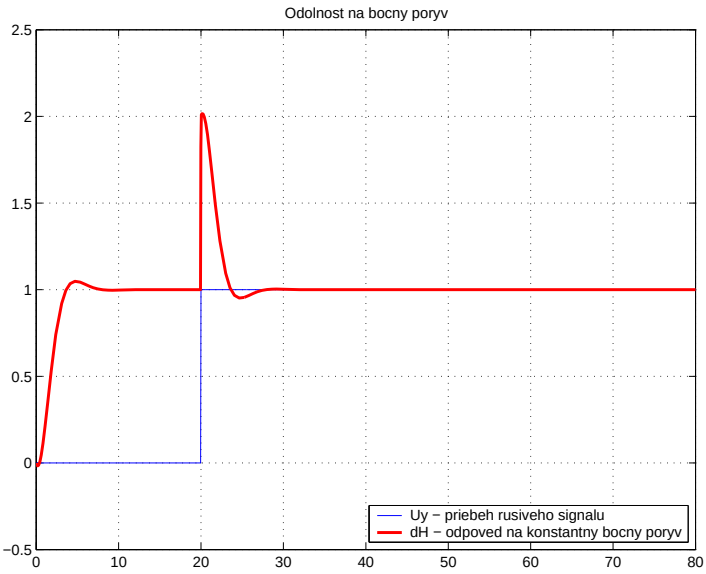
GMK potvrdzuje stabilný charakter odpovede, keďže vidíme, že skoro všetky póly a nuly systému ležia v stabilnej oblasti. Do stabilných, záporných hodnôt sme presunuli hlavne astatický pól, ktorý sme pozorovali na predchádzajúcich grafoch.



Obr. 38: Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ so stabilizátorom $\dot{H}$

9.4.3 Odolnosť systému voči konštantnému signálu vertikálneho poryvu vetra U_Y

Vertikálny poryv vetra U_Y simulujeme signálom na výstupe $\dot{H}$ systému stabilizácie vertikálnej rýchlosti. Po ustálení prechodového deja, v 20. sekunde, zavedieme konštatný jednotkový signál U_Y, ktorý zodpovedá nemennému vertikálnemu poryvu a pozorujeme chovanie systému, respektíve jeho schopnosť toto rušenie potlačiť.



Obr. 39: Odpoveď systému stabilizácie vertikálnej rýchlosti na rušivý signál vertikálneho poryvu vetra U_Y

Na obrázku 39 pozorujeme priebeh rušivého signálu, jeho náhly nárast v 20. sekunde. Vidíme, že navrhnutý stabilizátor potláča tento rušivý signál spoľahlivo za čas $t_r = 3,3$ s minimálnym prekývnutím a bez statickej chyby.

9.5 Stabilizácia $\dot{H}$ s uvažovaním signálu normálového zrýchlenia a_n - porovnanie výsledkov

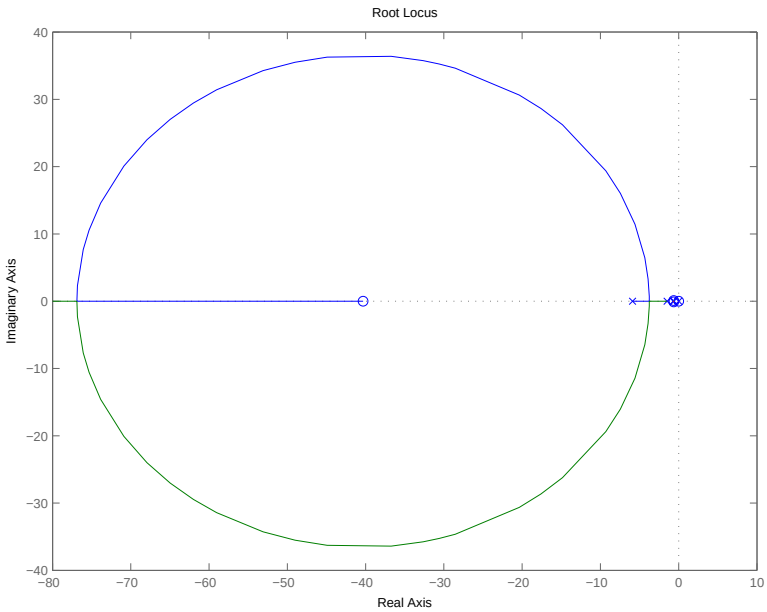
V tomto pokuse zistíme hlavne vplyv spätnej väzby, ktorej vytvorenie nám umožní analýza signálu z akcelerometra normálového zrýchlenia a_n ($sv_2 = 1$). Teda v postupnom návrhu budeme zapájať všetky spätné väzby na schéme 34 zo strany 38.

9.5.1 Nastavenie tlmiča

Tlmič nastavíme úplne rovnako ako v kapitole 9.4.1 - nastavenie tlmiča v systéme bez regulácie normálového zrýchlenia. Nastavený koeficient $K_{\dot{\vartheta}}$ je teda: $K_{\dot{\vartheta}} = 1,077$.

9.5.2 Nastavenie regulátora normálového zrýchlenia

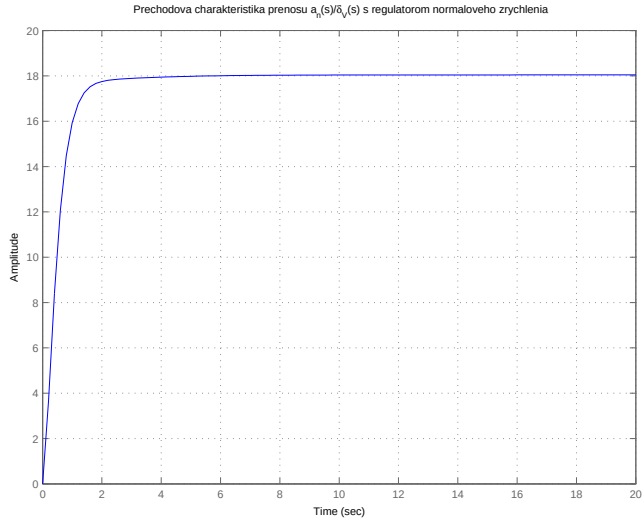
Pri nastavení regulátora normálového zrýchlenia vychádzame zo systému s tlmičom, presnejšie z jeho prenosu $\frac{a_n(s)}{\delta_V(s)}$. Normálové zrýchlenie dostaneme doplnením klasického modelu pozdĺžneho pohybu lietadla o kinematickú rovnicu a_n definovanú vzťahom 22 na strane 38.



Obr. 40: GMK prenosu $a_n(s)/\delta_V(s)$

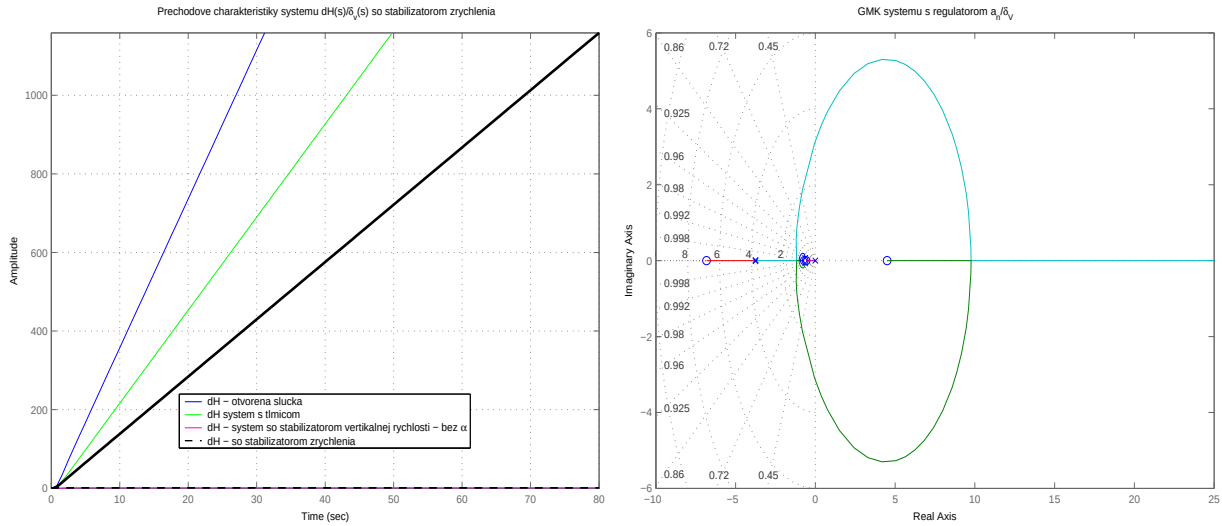
Na obrázku 40 vidíme GMK prenosu $\frac{a_n(s)}{\delta_V(s)}$. Pozorujeme astatický pól a výraznú dvojicu rýchlych pólov. Koeficient K_{a_n} volíme tak, aby sme rýchle póly systému dostali na medzu aperiodicity. Výsledný koeficient vychádza $K_{a_n} = 0,0213$.

S takto nastavenou spätnou väzbou dostaneme prechodovú charakteristiku prenosu $\frac{a_n(s)}{\delta_V(s)}$ zobrazenú na grafe 41. Vidíme, že táto je stabilná, ale z výraznou statickou chybou - ustálená hodnota je 18 jednotiek. Tento fakt by bol nepríjemný v prípade, keď by sme sa snažili o stabilizátor normálového zrýchelnia, kedy by sme museli voliť iné nastavenie spätnej väzby. Pri nastavení na mez aperiodicity sa zrýchelnie dostáva na ustálenú hodnotu v priebehu 2 sekúnd, na jednotkovú hodnotu dokonca za čas $t = 0,05$ s. Ako uvidíme ďalej, toto nastavenie, respektíve rýchlosť odpovede, má priaznivý vplyv na reguláciu vertikálnej rýchlosti.



Obr. 41: Prechodová charakteristika $\frac{a_n(s)}{\delta_V(s)}$ systému s regulárotom a_n

Grafy na obrázku 42 zobrazujú prechodovú charakteristiku a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s regulátorom normálového zrýchlenia a_n.



Obr. 42: Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s regulátorom a_n

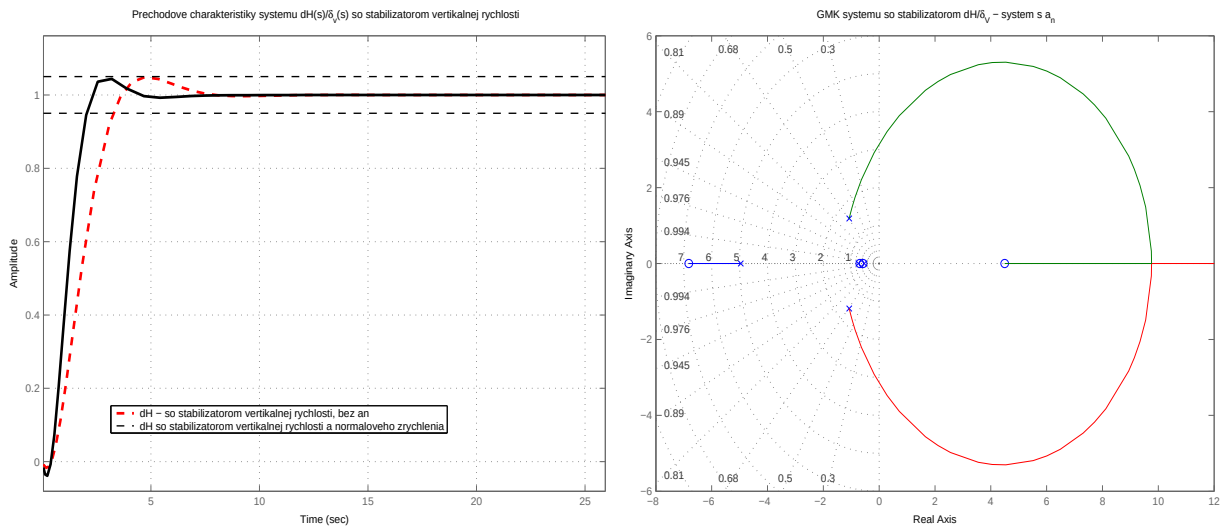
Vidíme, že prechodová charakteristika je nestabilná s astatizmom prvého rádu. Oproti otvorenej sľučke, alebo systému s tlmičom, došlo znovu k spomaleniu odozvy.

Astatizmus odpovede potvrdzuje aj graf GMK, na ktorom pozorujeme pól v počiatku komplexnej roviny.

9.5.3 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti - porovnanie so systémom bez regulácie a_n

Pre nastavenie regulátora vertikálnej rýchlosti vychádzame z rovnakých požiadaviek ako v kapitole 9.4.2. Snažíme sa dosiahnuť čo najkratší čas odpovede a prekmit menší ako 5%.

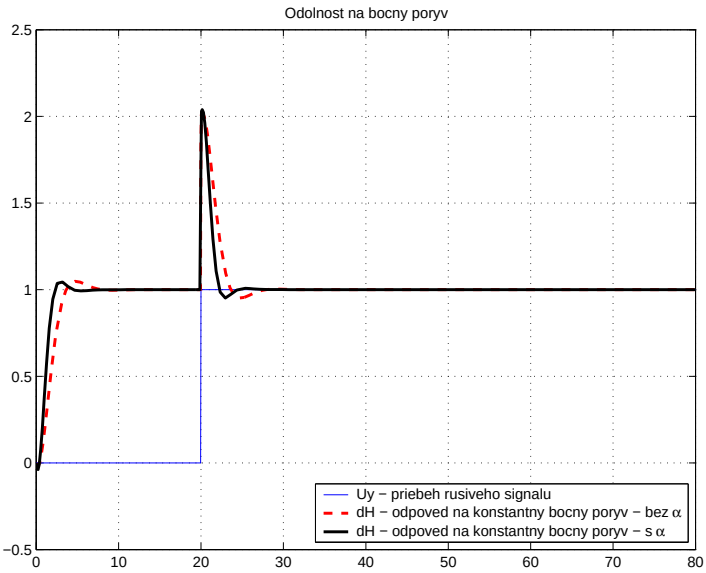
Návrh prebehol pomocou utility RLTOOL v prostredí Matlab.



Obr. 43: Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ so stabilizátorom $\dot{H}$ a a_n

Na obrázku 43 pozorujeme GMK výsledného nastavenia stabilizátora vertikálnej rýchlosti s koeficientom spätnej väzby $K_{\dot{H}} = 0,059$. Prechodové charakteristiky nám umožňujú porovnať jednotlivé konfigurácie automatických systémov stabilizácie vertikálnej rýchlosti. Vidíme, že konfigurácia s tlmičom normálového zrýchlenia umožnila dosiahnuť rýchlejší čas stabilizácie $t_r = 2s$[7]. Prekmit je rovnaký ako pri stabilizácii vertikálnej rýchlosti bez tlmiča normálového zrýchlenia, 4,9%.

9.5.4 Odolnosť systému voči konštantnému signálu vertikálneho poryvu vetra U_Y



Obr. 44: Odpoveď systému stabilizácie vertikálnej rýchlosti na rušivý signál vertikálneho poryvu vetra U_Y - systém s regulátorom a_n

Obrázok 44 ukazuje schopnosť stabilizátora potlačiť poruchu spôsobenú konštantným verti-

[7] čas, za ktorý sa natrvalo dostane prechodová charakteristika do zóny: ustálená hodnota ±5%.

kálnym poryvom vetra. Autopilot spoľahlivo potlačil rušenie. Musíme skonštatovať, že rovnako ako pri nastavení rýchlosti dokáže autopilot s tlmičom K_{a_n} potlačiť poruchu rýchlejšie než stabilizátor bez tejto spätnej väzby.

9.6 Zhrnutie

V predchádzajúcich pokusoch sme videli, že spätná väzba od normálového zrýchlenia sa chová ako prídavný tlmič, ktorý nám umožní citlivejšie a jemnejšie nastavenie autopilota, a tým pádom skracuje čas stabilizácie.

Nastavenie	Autopilot bez tlmiča a_n	Autopilot s tlmičom a_n
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1077	1,1077
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	-	0,0213
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,0245	0,059
prekmit [%]	4,9	4,9
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	3,3	2

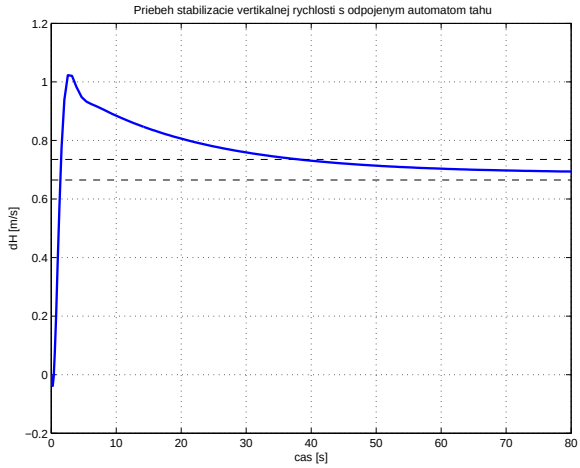
Tabuľka 6: Porovnanie nastavenia a výsledkov stabilizátorov vertikálnej rýchlosti

Vzhľadom na pozitívny vplyv tlmiča normálového zrýchlenia K_{a_n} budeme v nasledujúcich pokusoch uvažovať použitie stabilizátora vertikálnej rýchlosti so zapojenou spätnou väzbou a_n.

9.7 Vplyv automatu ťahu

Nastavenia spomenuté vyššie boli realizované so zapojeným automatom ťahu. Tento môže mať na dynamické charakteristiky stabilizácie veľký vplyv. Kedže modelový autopilot od spoločnosti S-TEC automatom ťahu nedisponuje, pozrime sa, ako by sa muselo zmeniť nastavenie alebo štruktúra autopilota, aby dokázal naplniť zadané požiadavky automatickej stabilizácie vertikálnej rýchlosti.

9.7.1 Odpojenie automatu ťahu



Obr. 45: Prechodová charakteristika $\dot{H}/\delta_V$ so stabilizatorom VS a odpojeným automatom ťahu

Na obrázku číslo 45 vidíme prechodovú charakteristiku autopilota s tlmičom normálového zrýchlenia navrhnutého v kapitole 9.5. Pozorujeme výrazný vplyv automatu ťahu na presnosť stabilizácie. Po jeho odpojení je statická chyba systému približne 30%, doba ustálenia je cca 40 s. Tieto vlastnosti sú nevyhovujúce pre stabilizáciu vertikálnej rýchlosti.

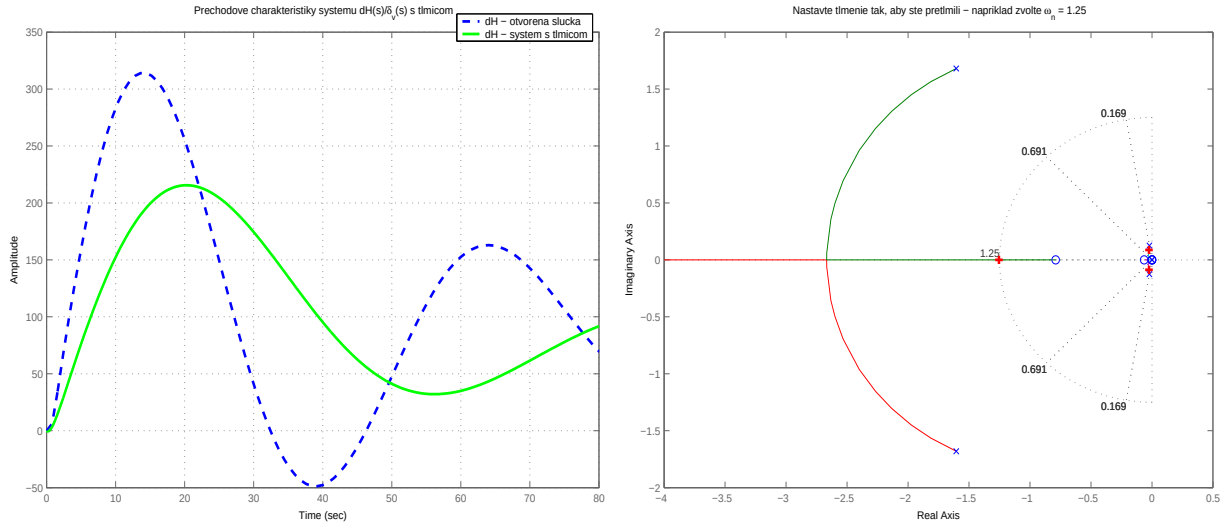
9.7.2 Návrh bez automatu ťahu

Štruktúra autopilota bez automatu ťahu je rovnaká ako je na schéme 34 zo strany 38. Jediným rozdielom je, že nebudeme zapájať spätnú väzbu od vzdušnej rýchlosti.

Pri návrhu postupujeme ako v predchádzajúcom prípade, začneme návrhom tlmiča rýchlych kmitov, pokračujeme stabilizáciou normálového zrýchlenia až k stabilizácii vertikálnej rýchlosti $\dot{H}$.

Nastavenie tlmiča rýchlych kmitov $K_{\dot{\vartheta}}$

Tlmič rýchleho pohybu lietadla nastavujeme podobne ako vo vyššie spomínaných prípadoch. Systém sa snažíme pretlmiť, pre ďalšie použitie sa ukázalo ako najlepšie nastavenie s koeficientom spätnej väzby $K_{\dot{\vartheta}} = 1,73$, čo zodpovedá nastaveniu jedného z rýchlych koreňov na prirodzenú frekvenciu $\omega_n = 1,25$ rad/s.



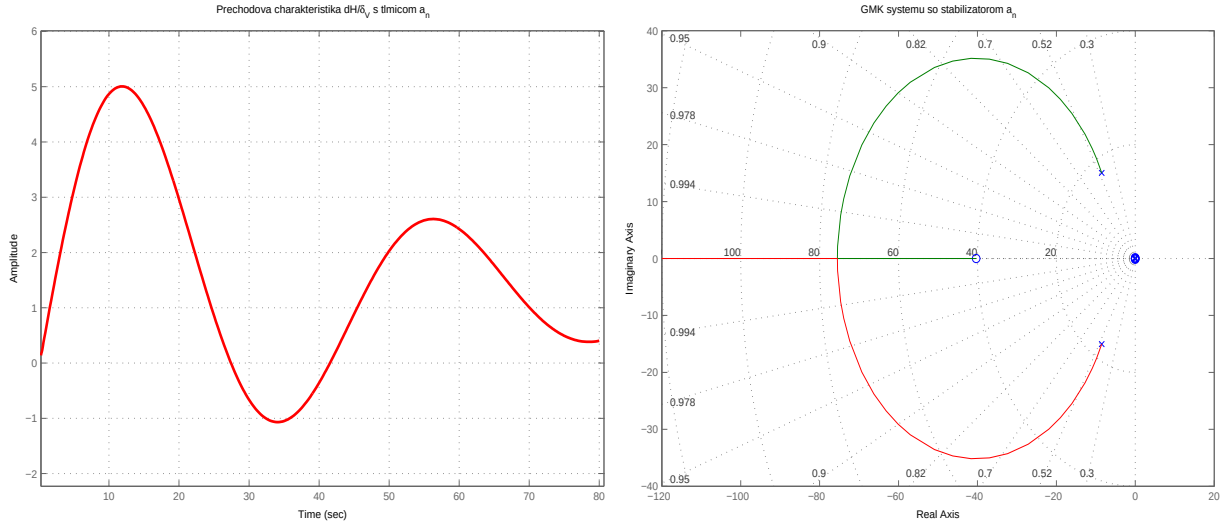
Obr. 46: GMK prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\delta_V(s)$ s vyznačeným nastavením pre $K_{\dot{\vartheta}} = 1,73$ a tomu zodpovedajúca prechodová charakteristika - návrh bez automatu ťahu

Toto nastavenie je na grafe GMK na obrázku 46 naznačené krížikmi. Vplyv takto nastaveného tlmiča vidíme na porovnaní prechodových charakteristík.

Nastavenie tlmiča normálového zrýchlenia K_{a_n}

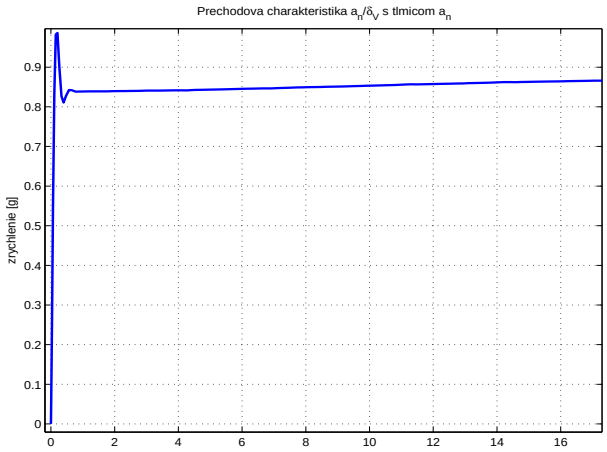
V kapitole 9.5 sme videli pozitívny účinok zavedenia spätnej väzby a_n na stabilizáciu vzdušnej rýchlosti, preto aj pre tento prípad zvolíme štruktúru autopilota s tlmičom normálového zrýchlenia. Ako najlepšie východisko pre nastavenie regulátora $\dot{H}$ sa ukázala hodnota koeficienta spätnej väzby $K_{a_n} = 1,15$. GMK tohto nastavenia a vplyv na prechodovú charakteristiku $\dot{H}/\delta_V$ vidíme na obrázku 47.

Porovnaním s prechodovou charakteristikou na obrázku 46 môžeme skonštatovať výrazné utlmenie amplitúdy kmitov, zníženie strednej hodnoty kmitov a mierne zvýšenie frekvencie kmitavého pohybu.



Obr. 47: GMK prenosu $a_n(s)/\delta_V(s)$ a zodpovedajúca prechodová charakteristika - návrh bez automatu ťahu

Prechodovú charakteristiku a_n zodpovedajúcu nastavenému tlmiču normálového zrýchlenia pozorujeme na obrázku 48. Čas stabilizácie prechodového deja regulácie normálového zrýchlenia je 0,3 s, ustálená hodnota je približne 0,85 g, čo zodpovedá statickej chybe 15%.



Obr. 48: Prechodová charakteristika uzavretého systému "tlmič normálového zrýchlenia - lietadlo" - prenos $a_n(s)/\delta_V$

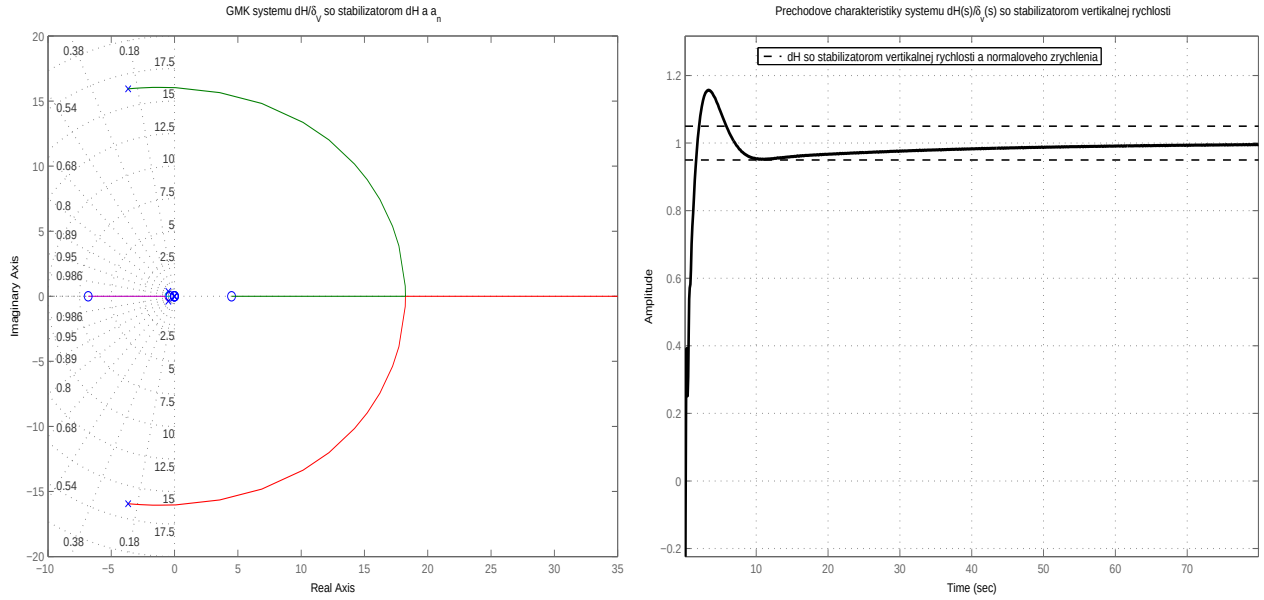
Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti - $K_{\dot{H}}$

Kľúčovým bodom pri návrhu stabilizátora vertikálnej rýchlosti je jej regulácia bez statickej chyby, ktorá sa v odpovedi vyskytla po odpojení automatu ťahu. Z tohto dôvodu zavádzame do priamej vetvy blok PRESNOSŤ, ktorý ma charakter proporcionálne integračného členu.

Požiadavky na reguláciu zostávajú rovnaké:

- minimálny čas regulácie
- čo najmenší prekmit

Na obrázku 49 vidíme GMK výsledného nastavenia. Ide o podmiene stabilný systém, preto zosilnenie nemôže byť veľmi veľké. Dodatočné zosilnenie dosiahneme posunom nuly PI členu

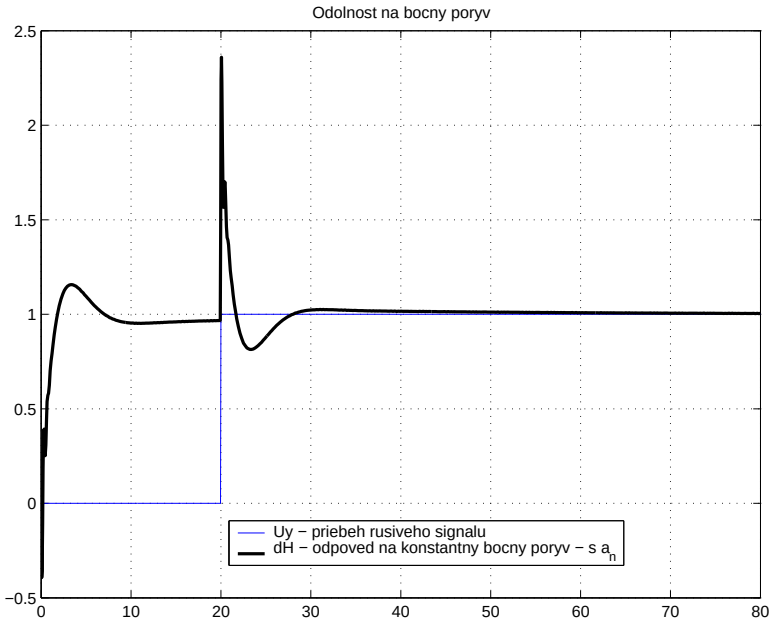


Obr. 49: GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ a prechodová charakteristika stabilizácie vertikálnej rýchlosti - návrh bez automatu ťahu

po reálnej ose komplexnej roviny smerom k jej počiatku. Výsledný prenos korekčného člena je: $0,45 \times \frac{2,8s+1}{s}$ a umožňuje nám zastabilizovať $\dot{H}$ v čase 6 sekúnd s prekmitom 18%.

Odolnosť voči vertikálnemu poryvu vetra U_Y

Ako vidíme na obrázku 50, automat navrhnutý vyššie odstraňuje poruchu spôsobenú konštantnou vertikálnou zložkou vetra bez statickej chyby.



Obr. 50: Odolnosť stabilizátora vertikálnej rýchlosti na vertikálny poryv vetra - návrh bez automatu ťahu

Porovnanie nastavení v závislosti na automate ťahu

Tabuľka 7 prináša prehľad vlastností autopilotov s a bez automatu ťahu. Vidíme, že zapojenie s automatom ťahu prináša lepšie dynamické charakteristiky, na druhej strane vyžaduje realizáciu jednej spätnej väzby naviac, čo predpokladá implementáciu ďalšieho senzora do prístrojového vybavenia lietadla.

Nastavenie	Autopilot s automatom ťahu	Autopilot bez AT
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1077	1,73
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	0,0213	1,15
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,059	$0,45 \times \frac{2,8s+1}{s}$
prekmit [%]	4,9	18
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	2	6

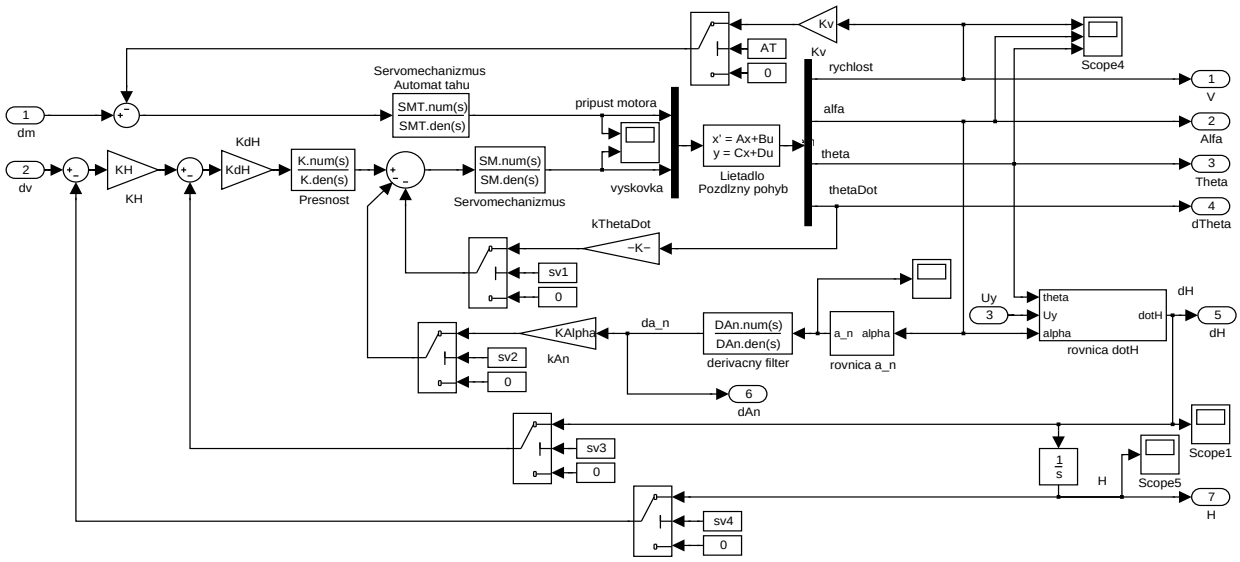
Tabuľka 7: Porovnanie nastavenia a výsledkov stabilizátorov vertikálnej rýchlosti v závislosti na zapojení automatu ťahu

9.8 Priblíženie druhé - návrh s derivátorom normálového zrýchlenia

Štúdium dokumentácie autopilota System 55 od spoločnosti S-TEC ukázalo, že signál z akcelerometra je spracovávaný sústavou filtrov s výsledným prenosom:

$$F_F(s) = \frac{9,128s}{s^2 + 173,08s + 1,63} = \frac{9,128s}{(s + 0,0095)(s + 173,07)} \tag{24}$$

Zo vzťahu 24 vidíme, že v zapojení získavame elektrickou cestou deriváciu zrýchlenia. Filter okrem toho prináša do systému dva póly s jednotkovým tlmením a prirodzenými frekvenciami $\omega_{n1} = 173,07$ rad/s a $\omega_{n2} = 9,5 \cdot 10^{-3}$ rad/s. Prvá z prirodzených frekvencií dynamické charakteristiky veľmi neovplyvní, pretože je približne 20krát vyššia ako najvyšia frekvencia ostatných pólov a núl. Oveľa väčší vplyv na stabilizáciu vertikálnej rýchlosti bude mať druhý z pólov.



Obr. 51: Schéma stabilizácie vertikálnej rýchlosti s výpočtom derivácie normálového zrýchlenia

Na obrázku 51 vidíme, ako sa zmenilo zapojenie stabilizácie vertikálnej rýchlosti. Pribudol derivačný člen, ktorý zo signálu akcelerometra vypočítava jeho deriváciu podľa rovnice 24.

9.8.1 Nastavenie tlmiča derivácie zrýchlenia - $K_{\dot{a_n}}$ a ostatných spätných väzieb

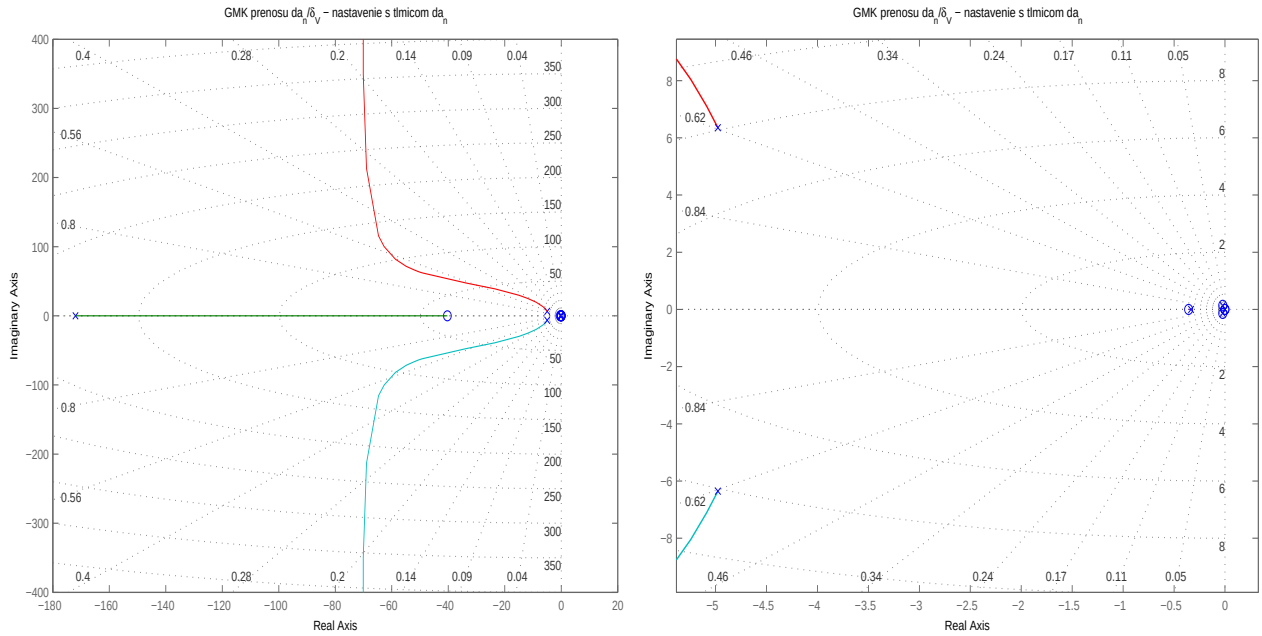
Pri pokusoch s rôznymi konfiguráciami autopilota sa ukázalo ako najlepšie použitie PI servomechanizmu s prenosom $F_{SM} = \frac{2{,}8s+1}{s}$.

Tabuľka 8 ukazuje súhrn nastavenia jednotlivých spätných väzieb a výsledné charakteristiky stabilizácie vertikálnej rýchlosti.

Prvok	Nastavenie
Prenos servomechanizmu δ_V	$\frac{2{,}8s+1}{s}$
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	0,5654
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	1,5
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,04 \times \frac{4s+1}{s}$
prekmit [%]	11,5
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	4,35
statická chyba [m/s]	0

Tabuľka 8: Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor vertikálnej rýchlosti s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia

Tlmič rýchlych kmitov je znovu nastavený tak, aby bol uzavretý systém tlmič-lietadlo pretlmený.

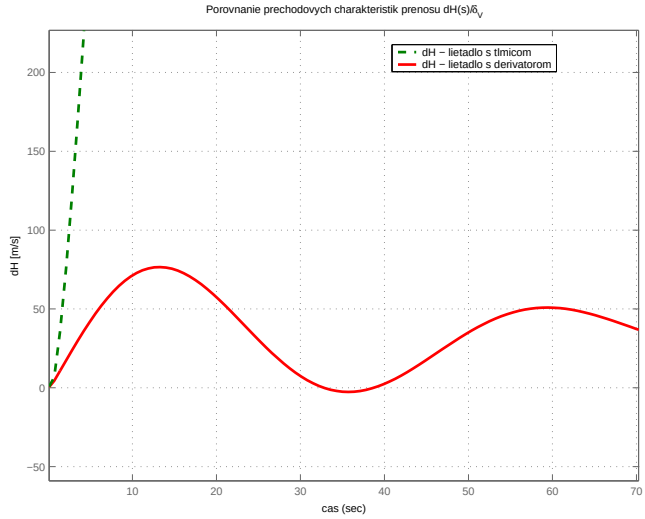


Obr. 52: GMK prenosu $\dot{a_n}(s)/\delta_V(s)$ - celkový pohľad a detail

Na obrázku 52 vidíme GMK prenosu $\dot{a_n}(s)/\delta_V(s)$ zodpovedajúci zapojeniu so spätnou väzbou $K_{\dot{a_n}} = 1,5$. Pozorujem pól s frekvenciou $\omega_n = 173,07$, ktorý nemá prakticky žiadny význam pri regulácii. Rozhodujúce je nastavenie dvojice komplexne združených pólov $-4,997 \pm 6,355\jmath$, s vlastnou frekvenciou $\omega_{n1,2} = 8,07$ rad/s a tlmením $a_{1,2} = 0,617$ - viď detail GMK.

Vplyv takto nastaveného tlmiča na prechodovú charakteristiku $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ môžeme pozorovať na obrázku 53.

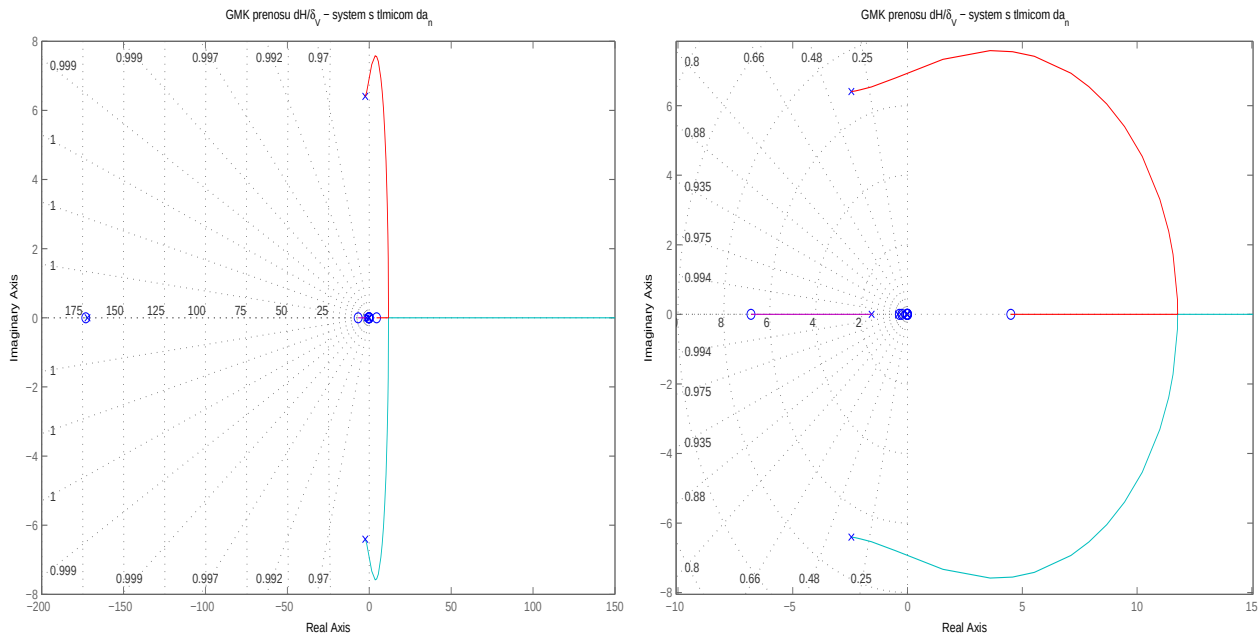
Vidíme, že použitím PI servomechanizmu sa stala prechodová charakteristika s tlmičom



Obr. 53: Prechodové charakteristiky prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s tlmičom rýchlych kmitov a tlmičom derivácie normálového zrýchlenia

rýchlych kmitov nestabilná. Zapojenie spätnej väzby od derivácie zrýchlenia nám umožní zastabilizovať odozvu i keď s výraznými, pomalými kmitmi.

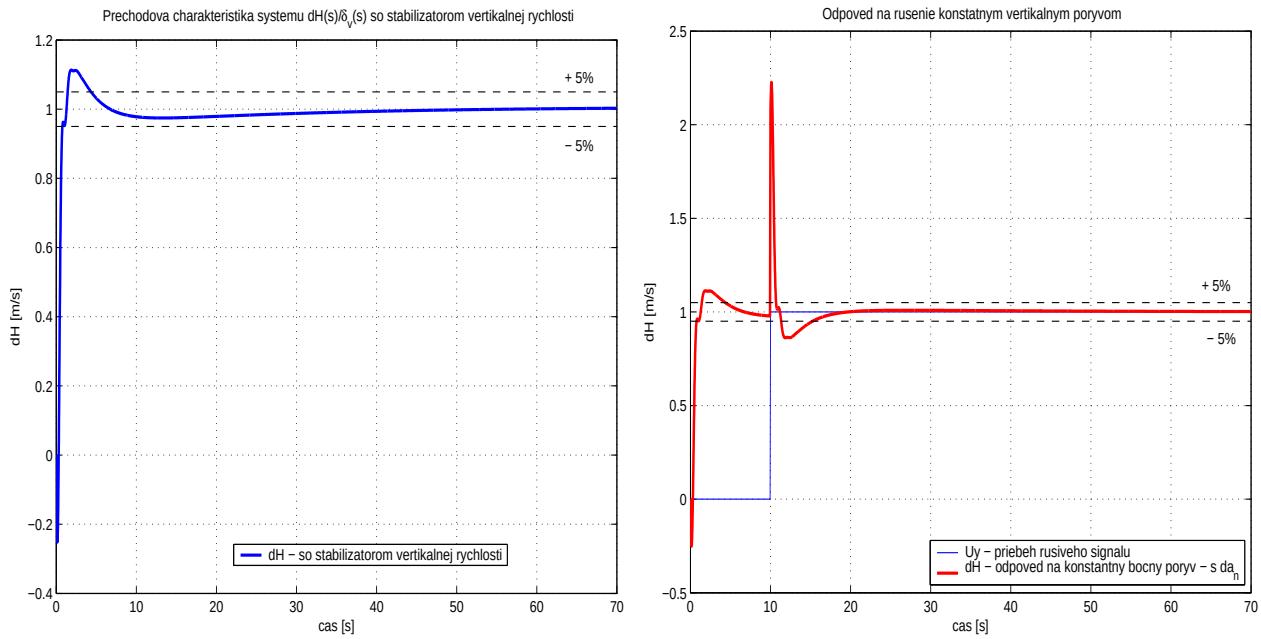
Nastavenie stabilizácie vertikálnej rýchlosti už sleduje rovnakú logiku a požiadavky, ako sme videli v predchádzajúcich kapitolách. Kedže má stabilizácia $\dot{H}$ vplyv na vlastnosti stabilizácie výšky, ktorou naviažeme na uvádzané nastavenia v kapitole 10, snažíme sa o čo najmenší prekmit, minimálny čas stabilizácie a v neposlednom rade o nulovú statickú chybu.



Obr. 54: GMK prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ - celkový pohľad a detail

Výsledné GMK so zapojeným regulátorom typu PI s prenosom $F_R(s) = 0,04 \times \frac{4s+1}{s}$ vidíme na obrázku 54. Dominantnými pólmi pre reguláciu je znovu dvojica komplexne združených pólov, ktorú sme pozorovali aj pri nastavení a_n.

9.8.2 Výsledná prechodová charakteristika a potlačenie vertikálneho poryvu vetra U_Y

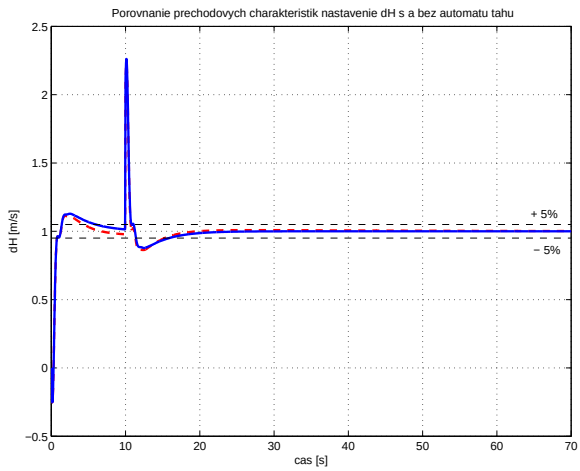


Obr. 55: Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe

Na obrázku 55 vidíme výslednú prechodovú charakteristiku. Hodnoty zodpovedajú údajom uvedeným v tabuľke 8. K potlačeniu rušenia spôsobeného konštatným vertikálnym vetrom dochádza v priebehu 5s, rýchlosť sa znovu dostane na pôvodnú hodnotu v priebehu 50 sekúnd.

9.8.3 Návrh s automatom ťahu

V predchádzajúcich príkladoch sme videli, že automat ťahu má priaznivý vplyv na stabilizáciu vertikálnej rýchlosti, respektíve umožňuje navrhnúť stabilizátor vertikálnej rýchlosti len s užitím proporčných a teda jednoduchších spätných väzieb.



Obr. 56: Vplyv automatu ťahu na stabilizáciu vertikálnej rýchlosti

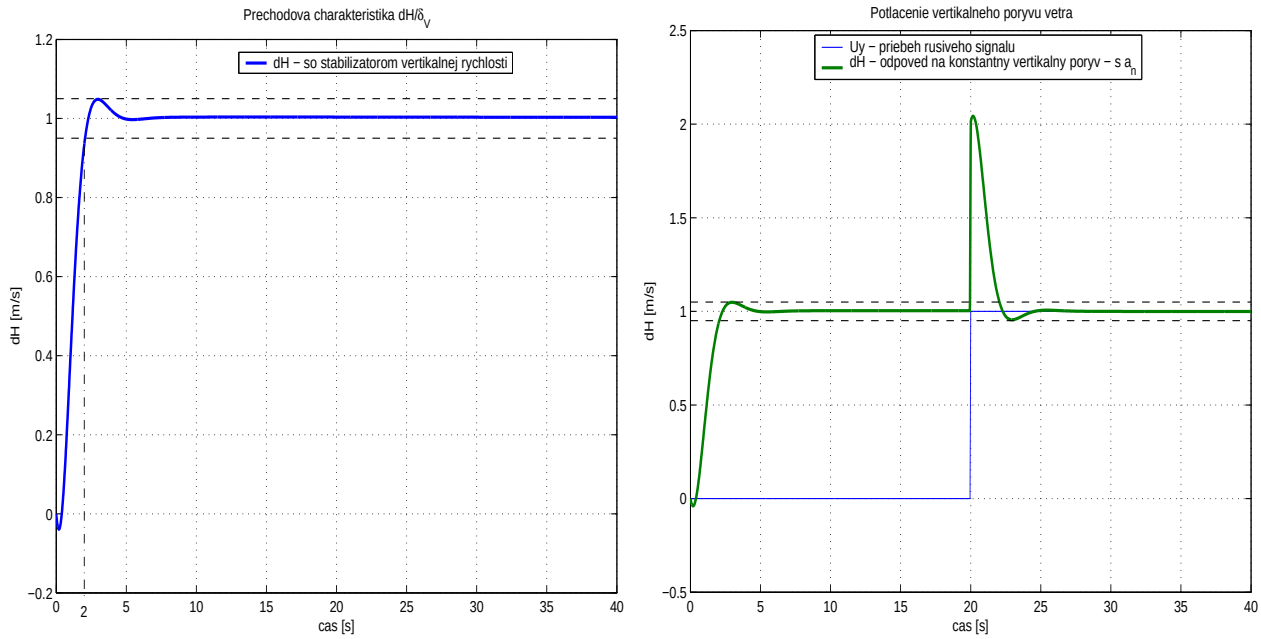
Obrázok 56 dokumentuje stav, keď sme k autopilotu navrhnutému v kapitole 9.8 pridali automat ťahu. Vidíme, že jeho vplyv nie je veľký. Zvýšilo sa prevýšenie o 2% na 13% a spomalil sa čas stabilizácie na $t_{r\pm5\%} = 6s$. Na druhej strane dochádza k rýchlejšiemu nastaveniu na pôvodnú hodnotu pri pôsobení poryvu vetra a to v priebehu 18 sekúnd po začiatku pôsobenia poruchy oproti 50 sekundám v zapojení bez automatu ťahu.

Automat ťahu s prenosom $F_{AT} = 1 \times \frac{3{,}087s+1}{s}$ prináša so sebou astatický koreň, ktorý by mohol nahradiť PI servomechanizmus a PI regulátor, ktoré sme potrebovali na reguláciu $\dot{H}$ v návrhu z kapitoly 9.8. Jedným z príkladov je nastavenie v tabuľke 9.

Prvok	Nastavenie
Prenos servomechanizmu δ_V	1
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1117
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	0,4
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,058
prekmit [%]	4,9
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	2
statická chyba [m/s]	0

Tabuľka 9: Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s automatom ťahu

Číselné údaje i prechodové charakteristiky na obrázku 57 dokazujú priaznivý vplyv automatu ťahu. Čas stabilizácie je o málo vačší ako 2 sekundy, prekmit je menší ako 5% a nastavenú hodnotu dosahuje $\dot{H}$ v čase 15 sekúnd.

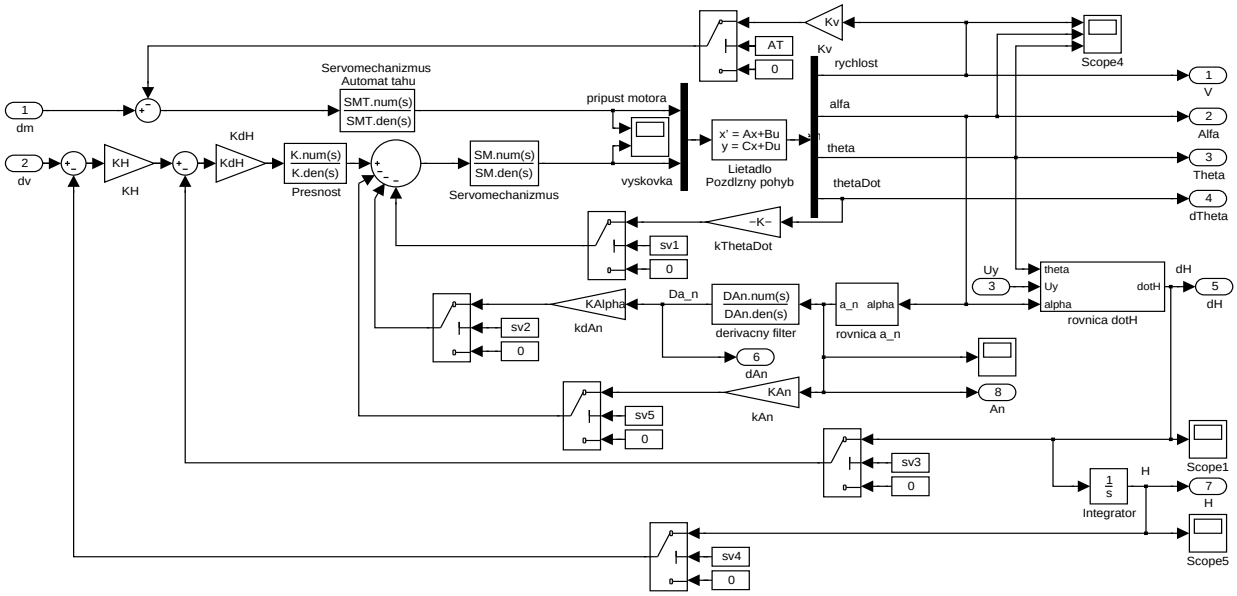


Obr. 57: Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe - nastavenie s automatom ťahu

K potlačeniu rušenia dochádza tiež v priebehu 2 sekúnd, 6 sekúnd po začiatku rušenia je vertikálna rýchlosť na svojej pôvodnej hodnote.

9.9 Priblíženie tretie - návrh s derivátorom a tlmičom normálového zrýchlenia

Relatívne náročné nastavenie regulačných väzieb v predchádzajúcom prípade (nutnosť použiť dva mechanizmy typu PI pri zapojení bez automatu ťahu) ma donútili naštudovať ešte možnosť zapojenia maxima spätných väzieb, ktoré nám analýza signálov z barometrického výškomera a lienárneho akcelerometra dovolí. To znamená zapojenie s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia, s tlmičom normálového zrýchlenia samotného a nakoniec so stabilizátorom vertikálnej rýchlosti - viď schéma 58.



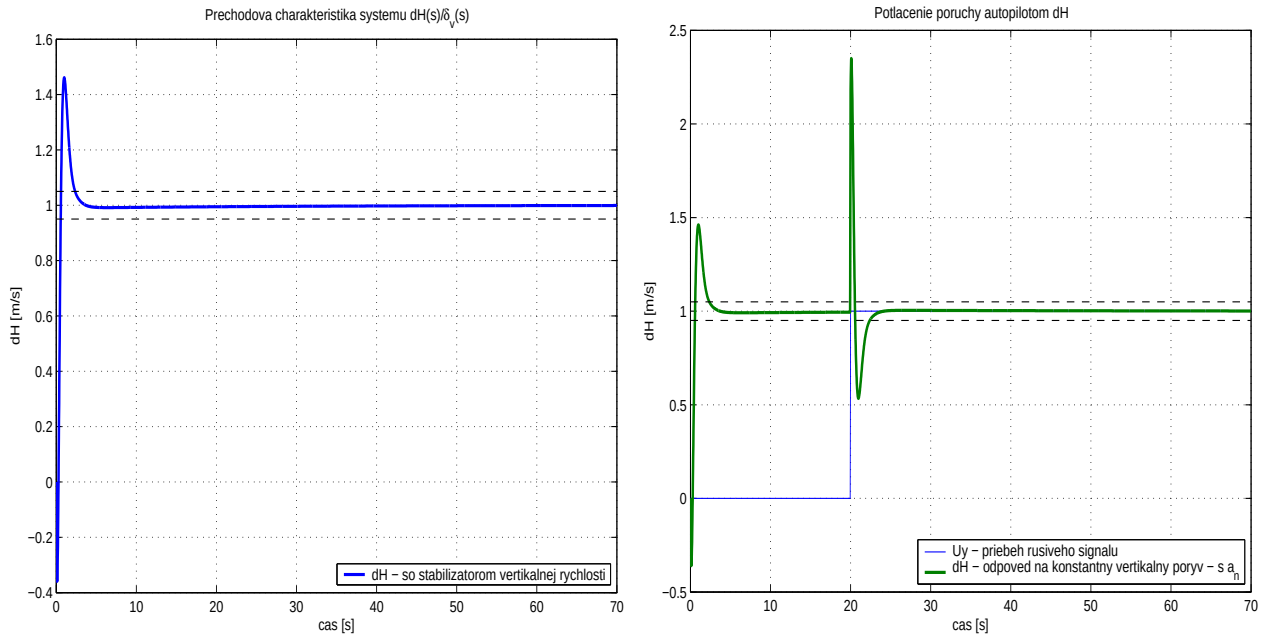
Obr. 58: Schéma stabilizácie vertikálnej rýchlosti so spätnou väzbou od normálového zrýchlenia a jeho derivácie

9.9.1 Nastavenie a výsledky

Pokusy s týmto zapojením však nepriniesli očakávaný efekt. Ako najsľubnejšie z hľadiska nasledovnej stabilizácie výšky sa ukázalo nastavenie v tabuľke 10, ktoré však vykazuje skoro 50% prekmit.

Prvok	Nastavenie
Prenos servomechanizmu δ_V	1
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	4,29
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	0,3
Tlmič K_{a_n}	0,3
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,75 \times \frac{1{,}3s+1}{s}$
prekmit [%]	46
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	2,35
statická chyba [m/s]	0

Tabuľka 10: Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s tlmičom normálového zrýchlenia a jeho derivácie



Obr. 59: Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe

Zodpovedajúcu prechodovú charakteristiku a charakteristiku potlačenia rušenia spôsobeného vertikálnym poryvom vetra vidíme na obrázku 59. Rýchlosť dosiahne nastavenú hodnotu (statická chyba = 0 m/s) v priebehu 45 sekúnd. Pozorujeme však aj významný prekmit veľkosti 46%.

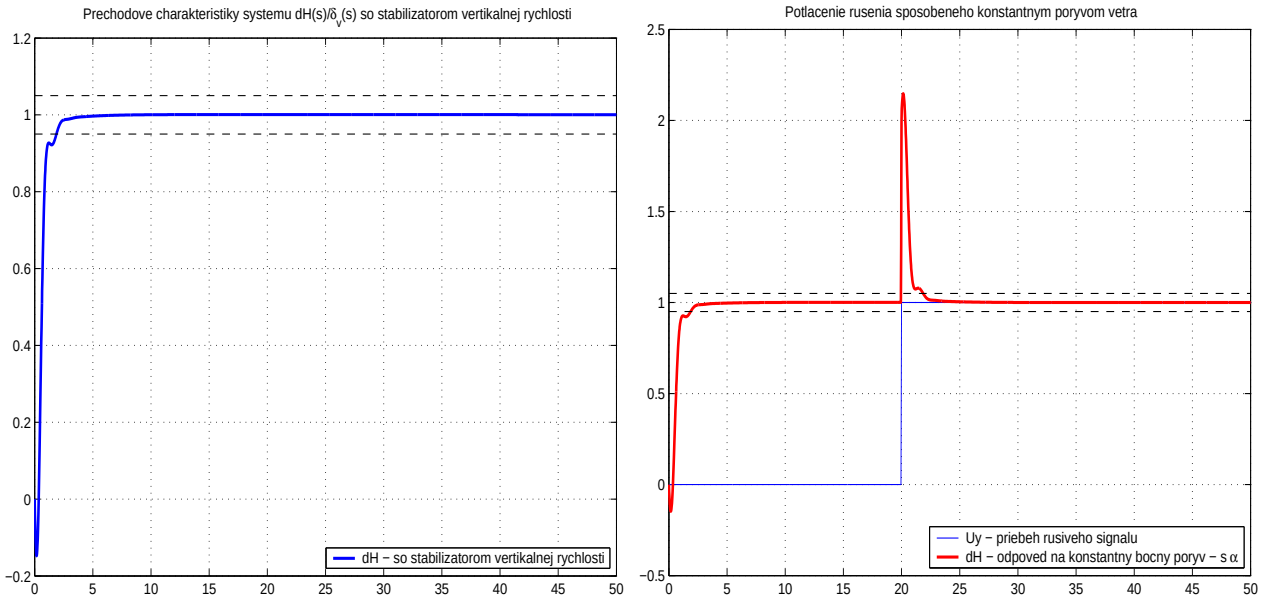
K potlačeniu poruchy dôjde za 2,5 sekundy, rýchlosť sa vráti na svoju nastavenú hodnotu za 50 sekúnd, čo zodpovedá nastaveniu iba so spätnou väzbou z výstupu $\dot{a_n}$.

9.9.2 Návrh s automatom ťahu

Prvok	Nastavenie
Prenos servomechanizmu δ_V	1
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1117
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	0,348
Tlmič K_{a_n}	0,1
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,238
prekmit [%]	0
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	1,8
statická chyba [m/s]	0

Tabuľka 11: Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s tlmičom normálového zrýchlenia a jeho derivácie - návrh s automatom ťahu

Nastavenie s automatom ťahu popísané v tabuľke 11 prinieslo nasledovné charakteristiky - viz. obr. 60. Dodatočná spätná väzba umožnila skrátiť čas stabilizácie na 1,8 sekundy. K potlačeniu rušenia dochádza tiež za 1,8 sekundy, $\dot{H}$ sa vracia na nastavenú hodnotu za 7 sekúnd.



Obr. 60: Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe - nastavenie s automatom ťahu

9.10 Porovnanie jednotlivých riešení

9.10.1 Porovnanie pre nastavenia bez automatu ťahu

Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
Prenos servomechanizmu δ_V	1	$\frac{2,8s+1}{s}$	1
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,73	0,5654	4,29
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	-	1,5	0,3
Tlmič K_{a_n}	1,15	-	0,3
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,45 \times \frac{2,8s+1}{s}$	$0,04 \times \frac{4s+1}{s}$	$0,75 \times \frac{1.3s+1}{s}$
prekmit [%]	18	11,5	46
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	6	4,35	2,35
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	80	70	45

Tabuľka 12: Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii vzdušnej rýchlosti $\dot{H}$ - návrhy bez automatu ťahu

Potlačenie rušenia vyvolaného vertikálnym poryvom vetra U_Y			
Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
úvodná odchýlka [%]	140	125	140
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	6	5	2,5
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	50	50	50

Tabuľka 13: Porovnanie charakteristík pri potlačení konštantného rušenia na výstupe - návrhy bez automatu ťahu

9.10.2 Porovnanie konfigurácií s automatom ťahu

Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
Prenos servomechanizmu δ_V	1	1	1
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1077	1,1117	1,1117
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	-	0,4	0,348
Tlmič K_{a_n}	0,0213	-	0,1
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,059	0,058	0,238
prekmit [%]	4,9	4,9	0
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	2	2	1,8
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	8	8	7
Potlačenie rušenia vyvolaného vertikálnym poryvom vetra U_Y			
úvodná odchýlka [%]	105	105	120
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	2	2	1,8
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	8	8	7

Tabuľka 14: Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii vzdušnej rýchlosti $\dot{H}$ - návrhy s automatom ťahu

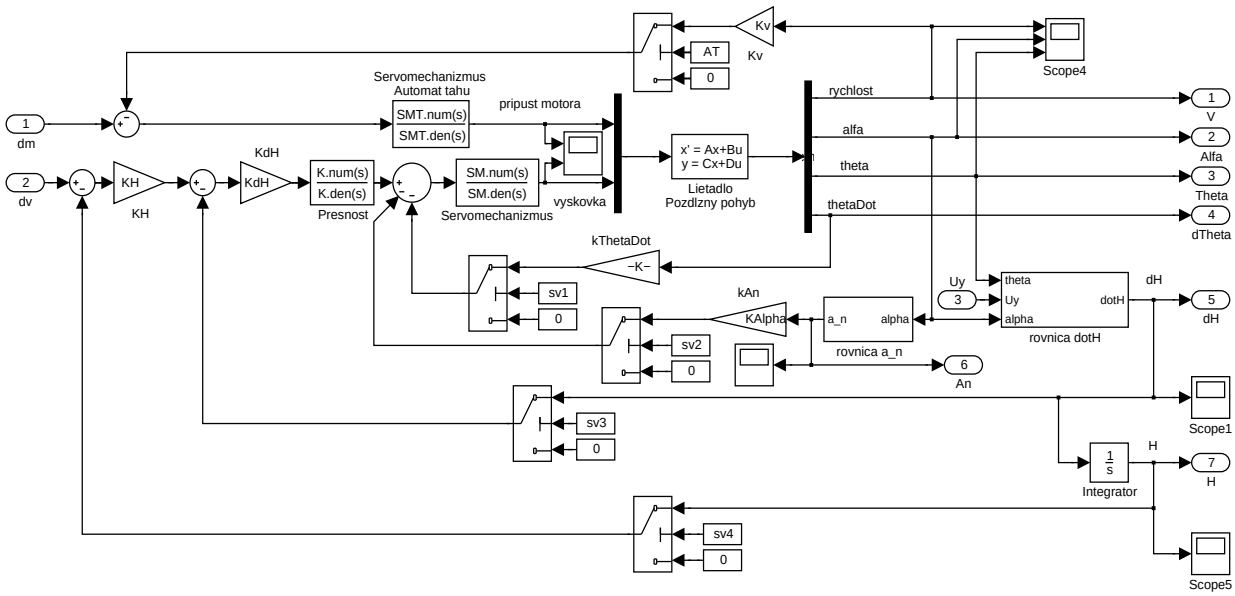
9.10.3 Zhrnutie

Porovnaním hodnôt v tabuľkách 12, 13 a 14 môžeme skonštatovať, že automat ťahu výrazne zlepšuje charakteristiky autopilotov. Hondoty z tabuľky 14 dokonca ukazujú, že viac menej maže rozdiely v konfigurácii jednotlivých autopilotov pre stabilizáciu vertikálnej rýchlosti. Konfigurácie s tlmičom normálového zrýchlenia a s tlmičom derivácie zrýchlenia ponúkajú rovnaké charakteristiky. Dodatočná spätná väzba v štruktúre, ktorá kombinuje obidva tlmiče, umožnila jemnejšie nastavenie autopilota, ktorý stabilizuje za kratšiu dobu a bez prekmitu. Daňou za toto nastavenie je vyššia úvodná výchylka spôsobená vertikálnym poryvom vetra.

Pri porovnávaní výsledkov automatických systémov bez stabilizácie vzdušnej rýchlosti vidíme oveľa väčší vplyv konfigurácie autopilota na kvalitu riadenia. Najrýchlejšiu stabilizáciu sme dosiahli so systémom s tlmičmi $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}. Na druhej strane je prekmit 46% veľmi veľký. Najlepšie preto vychádza autopilot s tlmičom $K_{\dot{a_n}}$, s ktorým sme dosiahli druhý najlepší čas stabilizácie a najmenší prekmit.

10 Stabilizácia barometrickej výšky H - mód ALT

Štruktúra automatického systému riadenia výšky vychádza zo stabilizácie vertikálnej rýchlosti. Stačí doplniť jestvujúcu schému stabilizácie $\dot{H}$ (napríklad na obrázku 34) o nadradenú spätnú väzbu stabilizácie výšky.



Obr. 61: Schéma úsporného autopilota stabilizácie výšky

Obrázok 61 ukazuje štruktúru takéhoto autopilota zodpovedajúcu prvému priblíženiu a popísateľnú rovnicou:

- $-\delta_V = K_H H + K_{\dot{H}} \dot{H} + K_{a_n} a_n + K_{\dot{\vartheta}} \dot{\vartheta}$,
- respektíve $-\delta_V = K_{\dot{H}} (\dot{H} + K_H H) + K_{a_n} a_n + K_{\dot{\vartheta}} \dot{\vartheta}$,

čo vlastne zodpovedá realizácii regulátora typu PD pre stablizáciu výšky.

Štruktúry pre druhé a tretie priblíženie, teda pre autopiloty s rovnicami:

- $-\delta_V = K_H H + K_{\dot{H}} \dot{H} + K_{\dot{a_n}} \dot{a_n} + K_{\dot{\vartheta}} \dot{\vartheta}$
- a $-\delta_V = K_H H + K_{\dot{H}} \dot{H} + K_{a_n} a_n + K_{\dot{a_n}} \dot{a_n} + K_{\dot{\vartheta}} \dot{\vartheta}$

sú na schémach 51 a 58, na ktorých je regulačná väzba výšky už vyznačená.

Pri popise klasického autopilota v kapitole 6.4 sme si ukázali, že stabilizácia vertikálnej rýchlosti má priaznivý vplyv na nastavenie regulátora výšky, hlavne pri potlačení konštantného rušenia spôsobeného vertikálnym vetrom. Naviac hodnoty oboch veličín je možné získať z jedného senzora, ktorým môže byť linearizovaný barometrický výškomer, takže realizácia páru spätných väzieb H a $\dot{H}$ nevyžaduje zabudovanie prídavného senzora.

Pozrime sa preto, aké možnosti pre stabilizáciu letu v letovej hladine ponúkajú automatické systémy riadenia vertikálnej rýchlosti navrhnuté v kapitole 9. Úlohou bude zistiť, aké charakteristiky pre riadenie výšky môžno dosiahnuť s už navrhnutými stabilizátormi vertikálnej výšky, prípadne ako musíme zmeniť nastavenie jednotlivých spätných väzieb, aby sa dynamické vlastnosti uzavretého systému autopilot-lietadlo zlepšili.

10.1 Nastavenie bez automatu ťahu

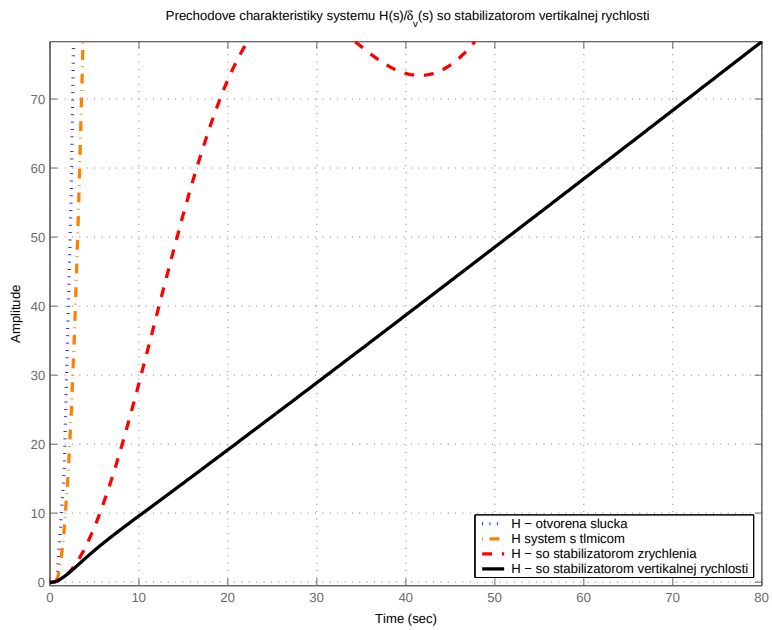
Modelový autopilot S-TEC S55 automatom ťahu nedisponuje a naviac porovnanie jednotlivých riešení stabilizátorov vertikálnej rýchlosti v kapitole 9.10 ukázalo, že v zapojeniach bez automatu ťahu má štruktúra autopilota väčší vplyv na výsledné charakteristiky ako v prípadoch, keď bol automat zapojený.

10.1.1 Priblíženie prvé - stabilizácia s tlmičom normálového zrýchlenia

Vplyv stabilizátora vertikálnej rýchlosti s koeficientami podľa tabuľky 15 na riadenie výšky dokumentuje prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ na obrázku 62.

Nastavenie	Autopilot s K_{a_n} bez AT
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,73
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	1,15
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,45 \times \frac{2,8s+1}{s}$

Tabuľka 15: Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia

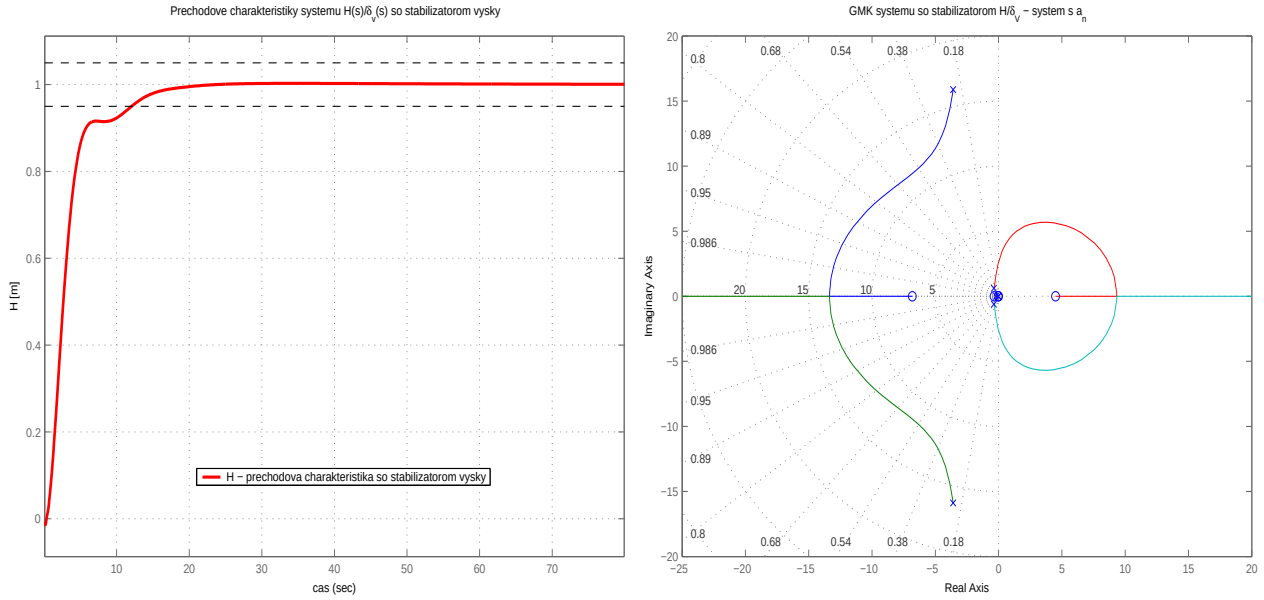


Obr. 62: Vplyv stabilizácie vertikálnej rýchlosti na stabilizáciu výšky

Na obrázku 62 môžeme pozorovať aj vplyv ostatných spätných väzieb, všetky postupne utlmujú prechodovú charakteristiky výšky. Vidíme, že stabilizátor vertikálnej rýchlosti má najvačší vplyv - odstránil z prechodovej charakteristiky pomalé kmity.

Nad týmto systémom realizujeme spätnú väzbu riadenia výšky. Nastavenie a výslednú prechodovú charakteristiku pre väzbu s koeficientom $K_H = 0,3$ zobrazujú charakteristiky na obrázku 63.

Výška sa stabilizuje za $t_{r5\%} = 12$ sekúnd bez prekmitu, k presnému nastaveniu výšky s nulovou toleranciou dochádza po 70 sekundách. Z GMK môžeme usudzovať, že zvýšením spätnoväzbového koeficienta by došlo k zrýchleniu odpovede, ale s výrazným prekmitom. Pri ďalšom zvyšovaní zosilnenia by sme sa dostali do nestabilnej oblasti.



Obr. 63: Prechodová charakteristika a GMK prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ - nastavenie bez automatu ťahu

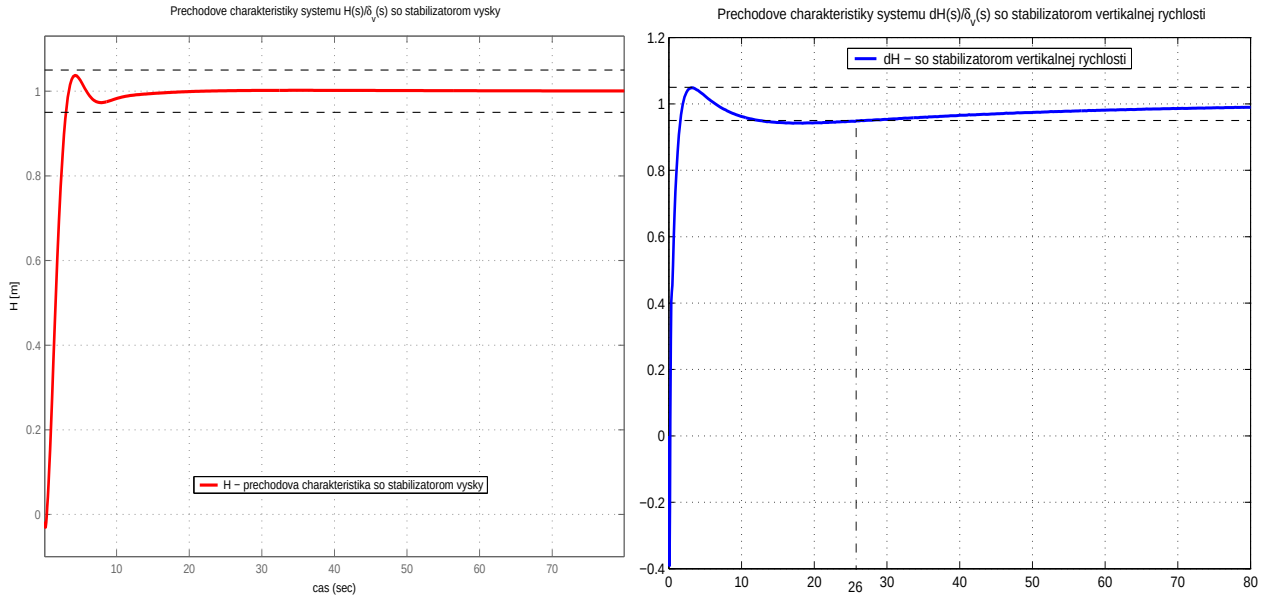
Ako uvidíme ďalej, toto nastavenie je veľmi citlivé na poruchu spôsobenú konštantným vertikálnym vetrom a potláča ju počas dlhej doby, preto som sa rozhodol vyskúšať alternatívne nastavenie s koeficientami z tabuľky 16.

Nastavenie	Autopilot s K_{a_n} bez AT
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	4,29
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	1
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,22 \times \frac{7s+1}{s}$
Stabilizátor barometrickej výšky K_H	0,6

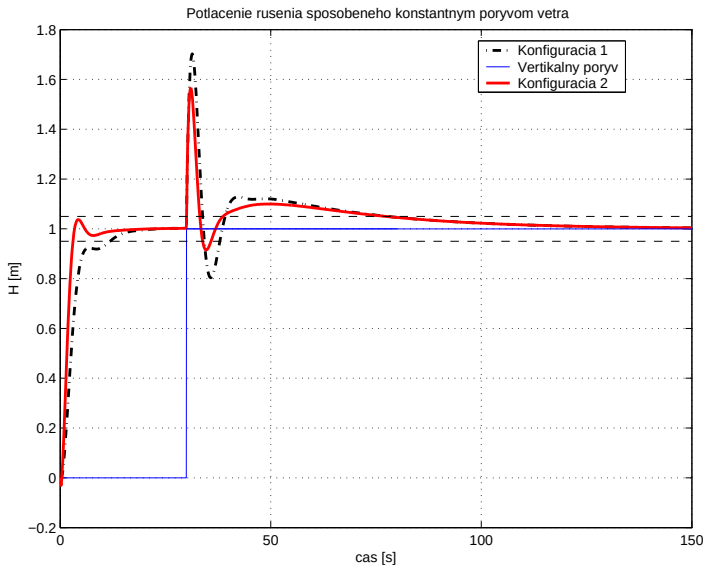
Tabuľka 16: Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia - konfigurácia číslo 2

Vplyv tohto nastavenia pozorujeme na obrázku 64. Došlo síce k spomaleniu nastavenia vertikálnej rýchlosti - čas stabilizácie sa predĺžil na 26 sekúnd, prekmit je približne 6%. Na druhej strane sa výrazne zmenila charakteristika stabilizácie výšky. Čas stabilizácie je len $t_{r5\%} = 3,03$ sekundy, úvodný prekmit má veľkosť 3% nastavenej hodnoty.

Schopnosť oboch vyššie popísaných autopilotov potlačiť rušenie spôsobené vertikálnym poryvom vetra je zobrazená na grafe číslo 65. Táto schopnosť je dôležitá pri lete v nastavenej letovej hladine. Vidíme, že druhá konfigurácia autopilota je menej citlivá, rovnaký poryv spôsobí úvodné vychýlenie veľkosti 55% nastavenej hodnoty oproti 70% pri prvej konfigurácii. Tiež ďalšie výchylky prechodovej charakteristiky od nastavenej hodnoty sú menšie ako pri použití stabilizátora z počiatku kapitoly. Obidva autopiloty však dostanú lietadlo do pásma ±5% za rovnaký čas, 57 sekúnd po začiatku pôsobenia poruchy. V tomto pásme majú už charakteristiky obidvoch autopilotov zhodný priebeh. V čase $t = 150s$ je odchýlka oboch charakteristík od nastavenej hodnoty $4 \cdot 10^{-3}$m.



Obr. 64: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$



Obr. 65: Schopnosť potlačiť vertikálny poryv vetra pri rôznych konfiguráciách autopilota

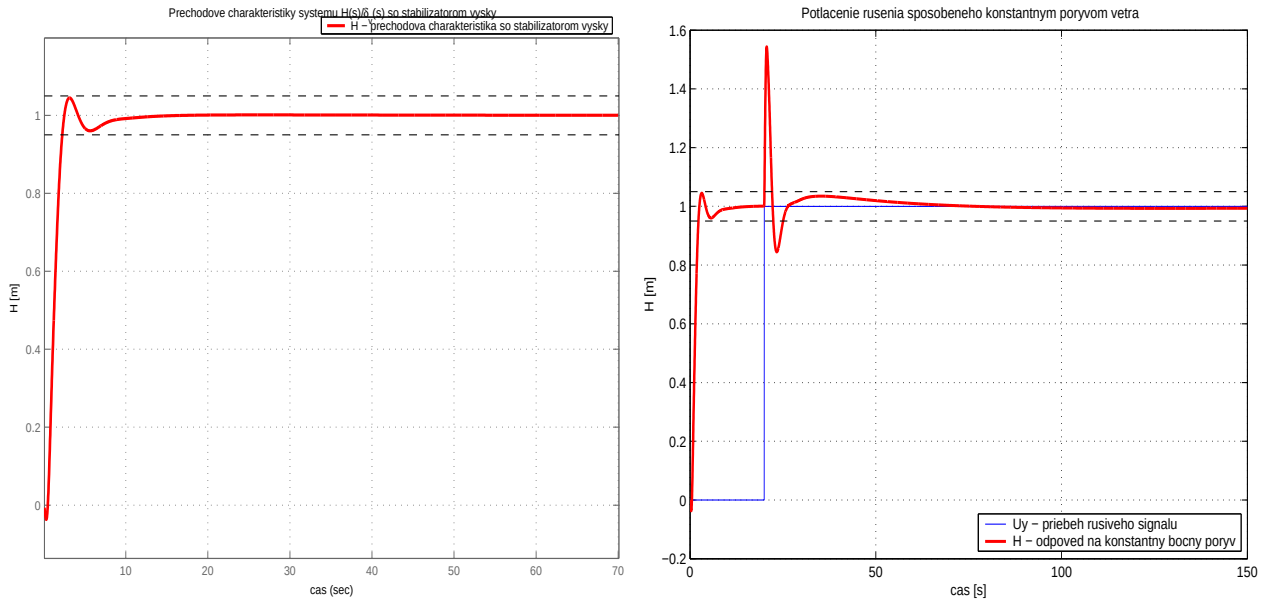
10.1.2 Priblíženie druhé - stabilizácia s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia

Tento automatický systém riadenia realizujeme podľa schémy na obrázku 51. Nastavenie výšky realizujem znovu ako nadstavbu k jestvujúcej regulácii vertikálnej rýchlosti zavedením spätnej väzby s prenosovým koeficientom $K_H = 0,71$. Súhrn hodnôt koeficientov je v tabuľke 17.

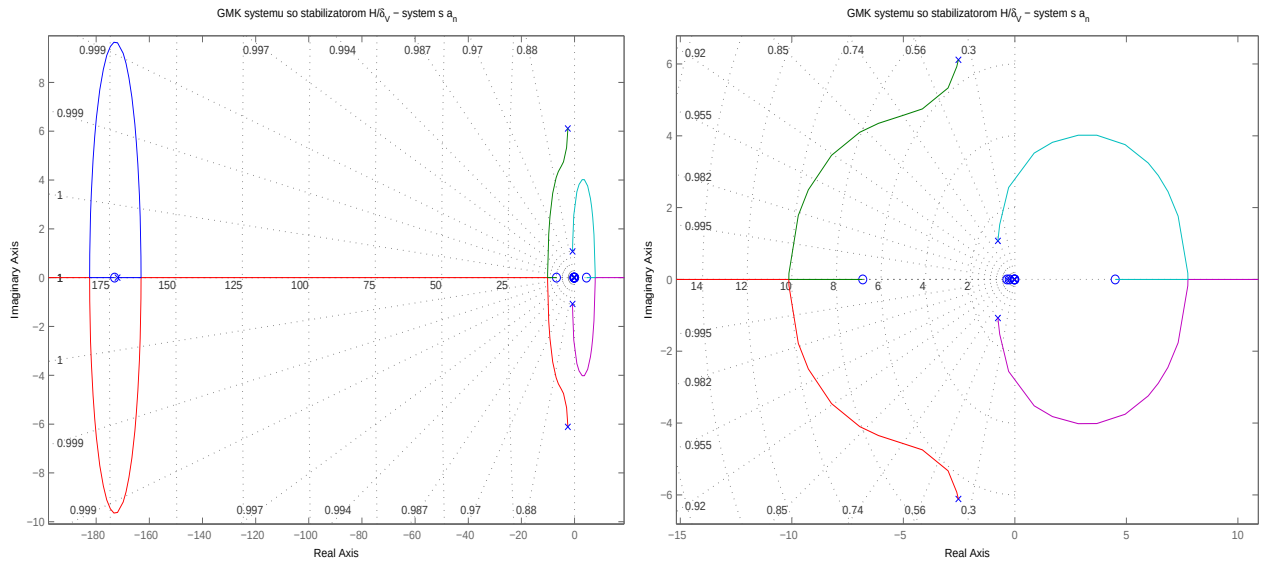
Na prechodovej charakteristike vidíme, že dochádza k stabilizácii výšky v čase $t_{r5\%} = 2,26$ sekundy s prekmitom 4,5%. K nastaveniu hodnoty dochádza za 40 sekúnd. Vertikálny poryv vetra spôsobil vychýlenie nastavenej hodnoty o 50%, výška sa vracia na svoju hodnotu 5 sekúnd po začiatku pôsobenia rušenia, potom sa už výška drží v rozmedzí ±5%. 50 sekúnd po začiatku pôsobenia rušenia je vychýlka menšia ako $7 \cdot 10^{-3}$m.

Nastavenie	Autopilot s $K_{\dot{a_n}}$ bez AT
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	0,5654
Tlmič zrýchlenia $K_{\dot{a_n}}$	1,5
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,04 \times \frac{4s+1}{s}$
Stabilizátor barometrickej výšky K_H	0,71

Tabuľka 17: Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia



Obr. 66: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra



Obr. 67: GMK prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ celkové a detailné zobrazenie

Grafy GMK ukazujú podmiene stabilný charakter odpovede spôsobený nestabilnou nulou pochádzajúcou z rozdielu $(\vartheta - \alpha)$ v kinematickej rovnici výšky.

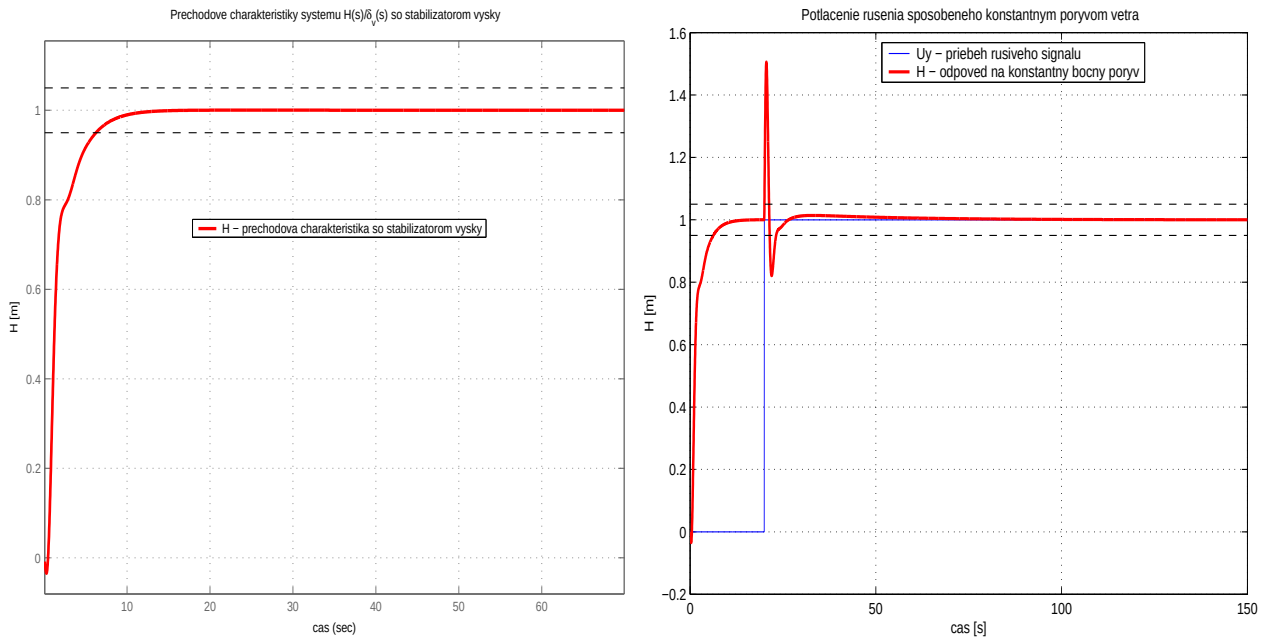
10.1.3 Priblíženie tretie - stabilizácia s tlmičmi $\dot{a_n}$ a a_n

Tretím študovaným nastavením bola konfigurácia so spätnou väzbou od normálového zrýchlenia a jeho derivácie zároveň. Schéma stabilizácie výšky je na obrázku 58 na strane 54. Hodnoty jednotlivých koeficientov sú v tabuľke 18.

Nastavenie	Autopilot s $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n} bez AT
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	4,29
Tlmič derivácie $K_{\dot{a_n}}$	0,3
Tlmič zrýchlenia $K_{\dot{a_n}}$	0,3
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,75 \times \frac{1,3s+1}{s}$
Stabilizátor barometrickej výšky K_H	0,5

Tabuľka 18: Nastavenie systému automatickej stabilizácie výšky

Prechodovú charakteristiku a odpoveď na rušivý signál môžeme študovať na obrázku 68.



Obr. 68: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra

K stabilizácii prechodovej charakteristiky dochádza za 6,3 sekundy prakticky bez prekmitu. K nastaveniu hodnoty dochádza v čase 16 sekúnd.

Vertikálny poryv vetra vyvolá vychýlenie veľkosti 0,5 m, k stabilizácii výšky v pásme $\pm 5\%$ nastavenej hodnoty dochádza v priebehu 3 sekúnd od počiatku rušenia. 100 sekúnd od počiatku poruchy zodpovedá výška lietadla pôvodnej nastavenej hodnote.

Analýza geometrického miesta koreňov nie je uvedená, jej štúdium ukázalo rovnako ako v predchádzajúcich prípadoch, že ide o podmiene stabilný systém s jednou nestabilnou nulou.

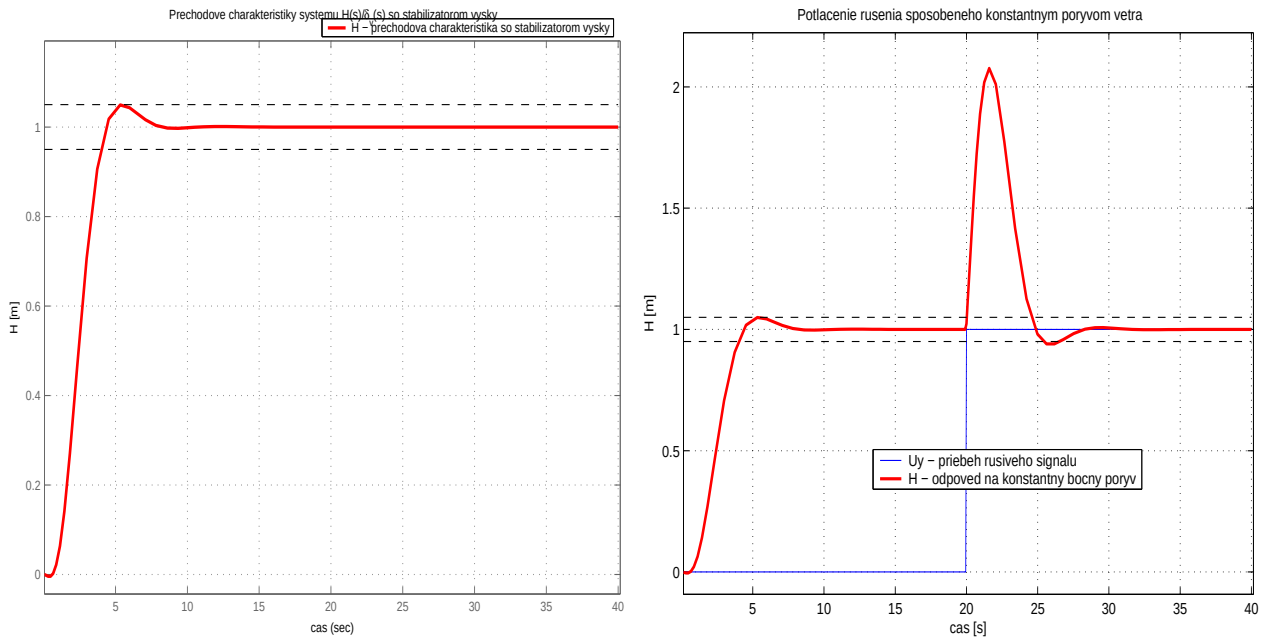
10.2 Nastavenie s automatom ťahu

V kapitole o stabilizácii vertikálnej rýchlosti sme videli, že všetky zapojenia s automatom ťahu dosiahli prakticky identické výsledky. Naviac návrh autopilota s automatom ťahu sleduje rovnakú logiku ako pri zapojení bez neho, preto len v krátkosti uvediem hodnoty koeficientov a zodpovedajúce prechodové charakteristiky.

10.2.1 Priblíženie prvé - stabilizácia s tlmičom normálového zrýchlenia

Nastavenie	Autopilot s tlmičom a_n
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1077
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	0,0213
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,059
Stabilizátor výšky K_H	0,425

Tabuľka 19: Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia



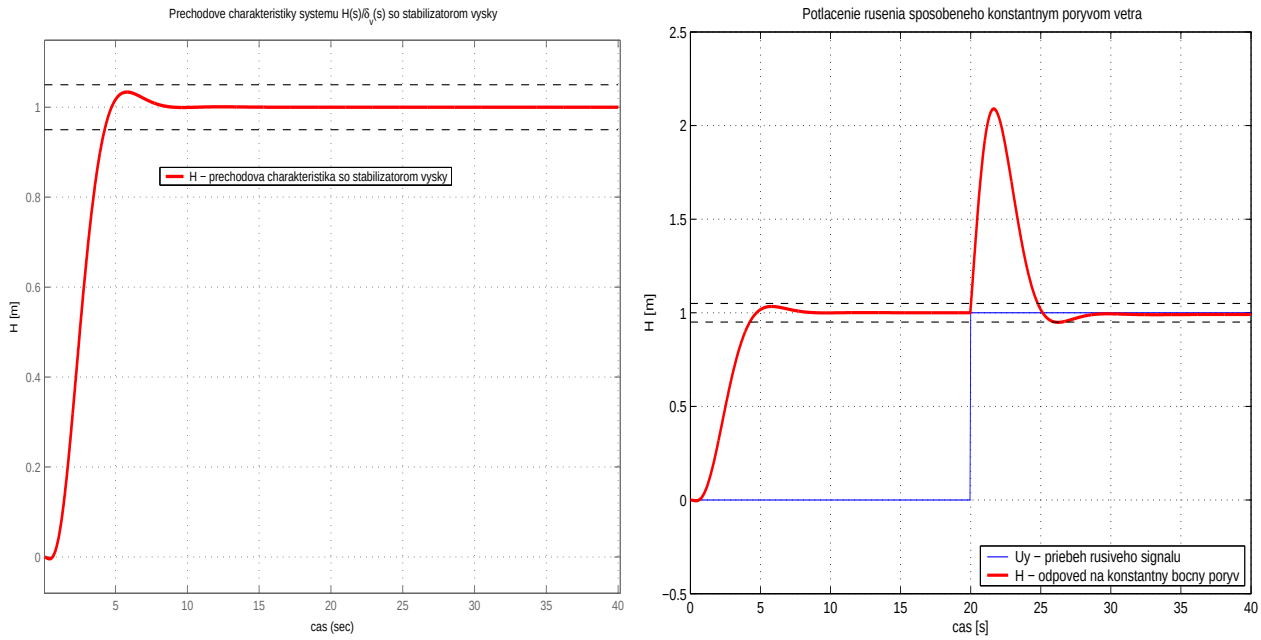
Obr. 69: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra

Nastavenie popísané v tabuľke 19 umožnilo dosiahnuť čas stabilizácie $t_{r5\%} = 4,18$ sekundy z prekmitom 4,9%. Vertikálny poryv spôsobuje úvodné vychýlenie veľkosti 108% nastavenej hodnoty, respektíve 1,08 metra. Výška sa znovu zastabilizuje za 4,5 sekundy a 13 sekúnd po začiatku pôsobenia rušenia je prakticky na pôvodnej hodnote - viz charakteristiky na obrázku 69.

10.2.2 Priblíženie druhé - stabilizácia s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia

Nastavenie	Autopilot s tlmičom $\dot{a_n}$
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1117
Tlmič derivácie zrýchlenia $K_{\dot{a_n}}$	0,4
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,058
Stabilizátor výšky K_H	0,4

Tabuľka 20: Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia



Obr. 70: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra

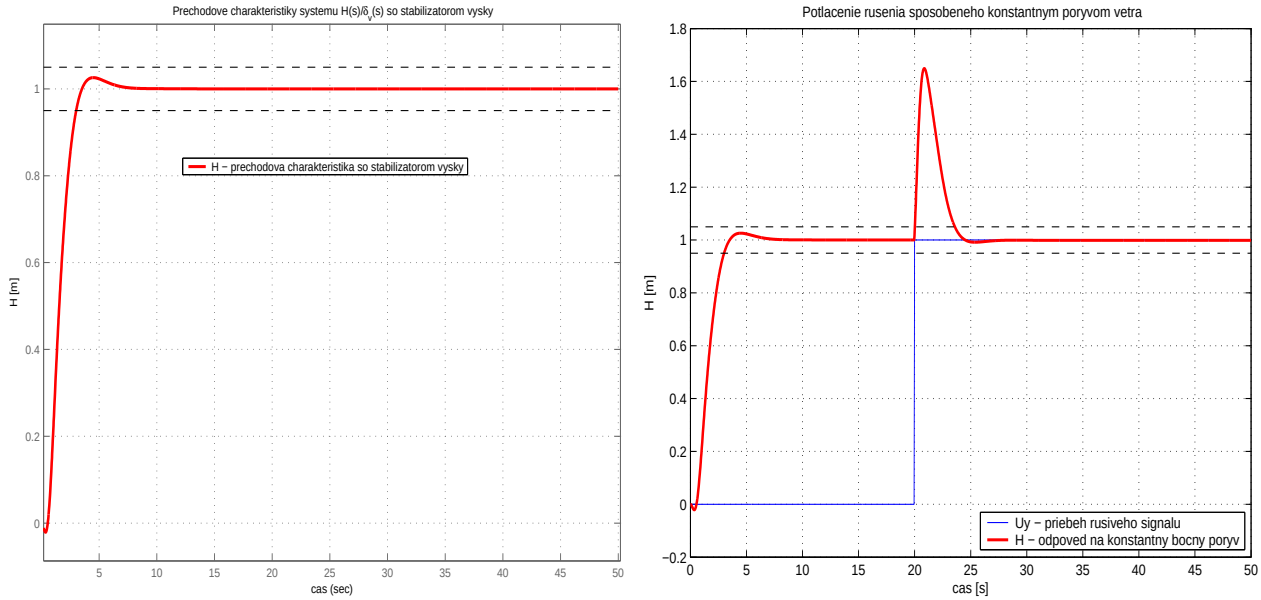
Nastavenie popísané v tabuľke 20 umožnilo dosiahnuť čas stabilizácie $t_{r5\%} = 4,24$ sekundy z prekmitom 3,5%. Vertikálny poryv spôsobuje úvodné vychýlenie veľkosti 110% nastavenej hodnoty, respektíve 1,1 metra. Výška sa znovu zastabilizuje za 4,7 sekundy a 10 sekúnd po začiatku pôsobenia rušenia je prakticky na svojej pôvodnej hodnote - viz charakteristiky na obrázku 70.

10.2.3 Priblíženie tretie - stabilizácia s tlmičmi $\dot{a_n}$ a a_n

Nastavenie popísané v tabuľke 21 umožnilo dosiahnuť čas stabilizácie $t_{r5\%} = 3$ sekundy z prekmitom 2,58% - viz charakteristika na obrázku 71. Vertikálny poryv spôsobuje úvodné vychýlenie veľkosti 65% nastavenej hodnoty, respektíve 0,65 metra. Výška sa znovu zastabilizuje za 3,6 sekundy a potom sa pomaly blíži zo spodnej strany k svojej pôvodnej hodnote: maximálna hodnota odchýlky v tejto fázi je jedno promile alebo $1 \cdot 10^{-3}$m, výška teda dosiahla prakticky svoju pôvodnú hodnotu.

Nastavenie	Autopilot s tlmičom a_n a $\dot{a_n}$
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1117
Tlmič derivácie zrýchlenia $K_{\dot{a_n}}$	0,348
Tlmič zrýchlenia K_{a_n}	0,1
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,238
Stabilizátor výšky K_H	0,624

Tabuľka 21: Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia a tlmičom normálového zrýchlenia



Obr. 71: Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra

10.3 Porovnanie jednotlivých riešení

10.3.1 Porovnanie výsledkov pre konfigurácie bez automatu ťahu

Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	4,29	0,5654	4,29
Tlmič $\dot{a_n}/a_n$ $K_{\dot{a_n}}/K_{a_n}$	-/1	1,5/-	0,3/0,3
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	$0,22 \times \frac{7s+1}{s}$	$0,04 \times \frac{4s+1}{s}$	$0,75 \times \frac{1.3s+1}{s}$
Stabilizátor výšky K_H	0,6	0,71	0,5
prekmit [%]	3	4,5	0
$t_{r\pm5\%}$ [s]	3,03	2,26	6,3

Tabuľka 22: Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii výšky H - návrhy bez automatu ťahu

Potlačenie rušenia vyvolaného vertikálnym poryvom vetra U_Y			
Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
úvodná odchýlka [%]	55	50	50
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	57	5	3
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	viac ako 150	150	100

Tabuľka 23: Porovnanie charakteristík pri potlačení konštantného rušenia spôsobeného vertikálnym poryvom vetra - návrhy bez automatu ťahu

Poznámka: Zapojenie s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia $K_{\dot{a_n}}$ využíva PI servomechanizmus s prenosom $F_{SM} = \frac{2{,}8s+1}{s}$, ostatné zapojenia majú štandardný P servomechanizmus s jednotkovým prenosom.

10.3.2 Porovnanie výsledkov pre konfigurácie s automatom ťahu

Autopilot	S tlmičom K_{a_n}	S tlmičom $K_{\dot{a_n}}$	S $K_{\dot{a_n}}$ a K_{a_n}
Tlmič $K_{\dot{\vartheta}}$	1,1077	1,1117	1,1117
Tlmič $\dot{a_n}$ - $K_{\dot{a_n}}$	-	0,4	0,348
Tlmič a_n - K_{a_n}	0,0213	-	0,1
Stabilizátor vertikálnej rýchlosti $K_{\dot{H}}$	0,059	0,058	0,238
Stabilizátor výšky K_H	0,425	0,4	0,624
prekmit [%]	4,9	3,5	2,58
$t_{r\pm5\%}$ [s]	4,18	4,24	3
Potlačenie rušenia vyvolaného vertikálnym poryvom vetra U_Y			
úvodná odchýlka [%]	108	110	65
čas stabilizácie $t_{r\pm5\%}$ [s]	4,5	4,7	3,6
statická chyba [m/s]	0	0	0
čas nastavenia $t_{r0\%}$ [s]	13	10	8

Tabuľka 24: Porovnanie charakteristík rôznych konfigurácií stabilizátora barometrickej výšky - návrhy s automatom ťahu

10.3.3 Zhrnutie

Porovnaním jednotlivých hodnôt vidíme, že pri stabilizácii výšky už neexistuje taký rozdiel medzi autopilotmi s automatom ťahu (AT) a bez neho. Zapojenia so stabilizáciou vzdušnej rýchlosti umožňujú jednoznačne rýchlejšie znovunastavenie hodnoty pri poryve vetra. Na druhej

strane pre systémy bez automatu ťahu sa podarilo nájsť nastavenie, ktoré umožňuje zastabilizovať odpoveď do pásma $\pm 5\%$ za kratší čas pri zachovaní menšieho prekmitu. Príkladom môže byť stabilizátor s tlmičom normálového zrýchlenia K_{a_n}, ktorý v konfigurácii bez AT stabilizuje výšku za 3 sekundy s 3% prekmitom. Ten istý systém vybavený stabilizáciou rýchlosti stabilizuje za 4,18 sekundy s takmer 5% prekmitom.

Zároveň musíme skonštatovať, že systémy bez AT sú menej citlivé na poryv vetra, ich úvodná výchylka sa pohybuje okolo 50%, zatiaľčo automaty so stabilizáciou rýchlosti majú bežne odchýlku vyššiu ako 100%. Výnimku tvorí automatický systém s tlmičom normálového zrýchlenia a jeho derivácie. Úvodna výchylka 65% je porovnateľná s podobným zapojením bez automatu ťahu.

V konfigurácii bez automatu ťahu sme dosiahli najlepšie výsledky so štruktúrou podobnou modelovému autopilotu S-TEC System 55, teda s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia. Tento systém dosiahol najlepšie výsledky pre nastavenie výšky. Pri potlačení poruchového signálu sa však ako najlepší ukázal systém s dodatočnou spätnou väzbou spracovávajúcou signál zrýchlenia. Pre autopilota len s $K_{\dot{a}_n}$ však hovorí aj fakt, že tú istú konfiguráciu možno bez veľkej zmeny použiť aj na stabilizáciu vertikálnej rýchlosti. Prechod na mód stabilizácie výšky sa deje jednoduchým pripnutím zodpovedajúcej spätnej väzby, bez inak nevyhnutnej modifikácie koeficientov ostatných sľučiek.

Pri použití automatu ťahu sa ako jednoznačne najlepšie ukázalo nastavenie s tlmičmi $\dot{a}_n$ a a_n.

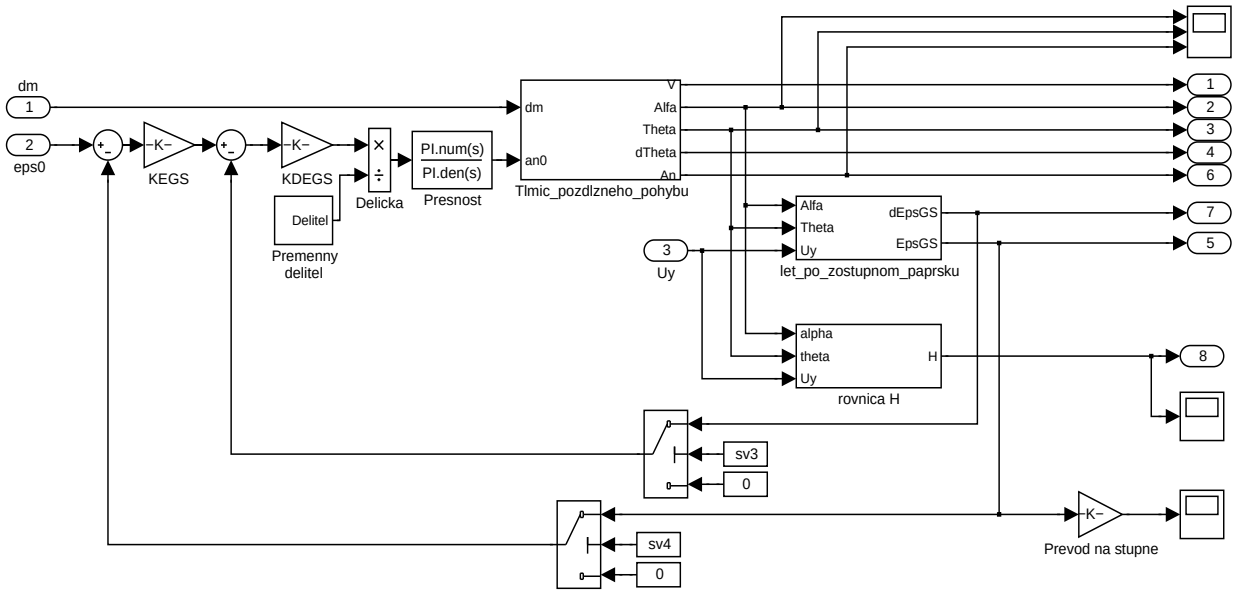
11 Let v zostupnom paprsku - mód Glideslope

Let v zostupnej rovine je ďalším z režimov, pre ktorý sme autopilot navrhovali a simulovali jeho správanie. Autopilot prechádza do stabilizácie letu v zostupnej rovine z módu nastavenia výšky. Systém riadenia sa stará o zachytenie zostupného paprsku a bezpečné vedenie lietadla v ňom až do výšky rozhodnutia, ktorá závisí na kategórii konkrétneho lietadla. Počas letu v zostupnej rovine musí autopilot potlačiť rušenie spôsobené vertikálnou zložkou vetra, pričom musí udržať lietadlo v oblasti lineárneho pásma paprsku. To znamená, že maximálna uhlová odchýlka od paprsku ε_{GS} nesmie prekročiť hodnoty $\pm 0,5°$.

Pri návrhu autopilota vychádzame zo známej kinematickej rovnice definovanej v kapitole 7.1:

$$\varepsilon_{GS} = \frac{V_0}{D_{GS0} - V_0 t} \cdot \int_0^t (\Theta - \Theta_{GS0}) d\tau \tag{25}$$

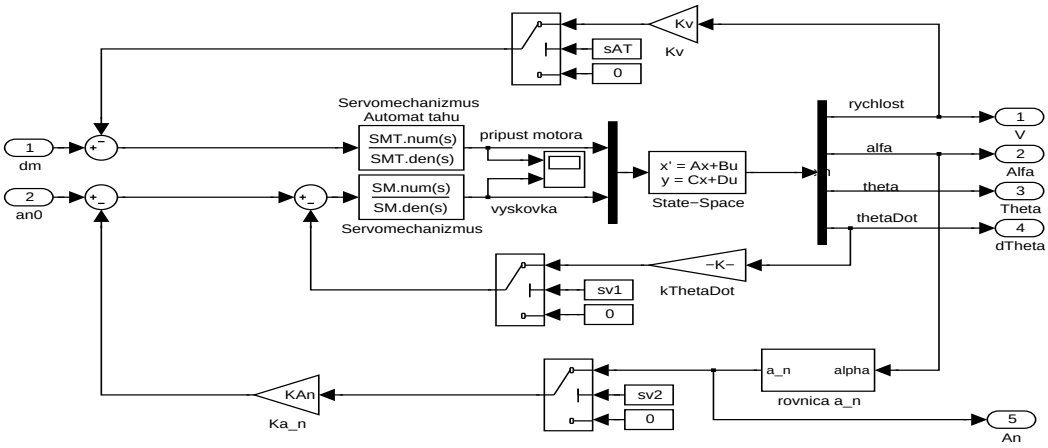
11.1 Štruktúra



Obr. 72: Schéma úsporného systému automatického riadenia letu v zostupnom paprsku

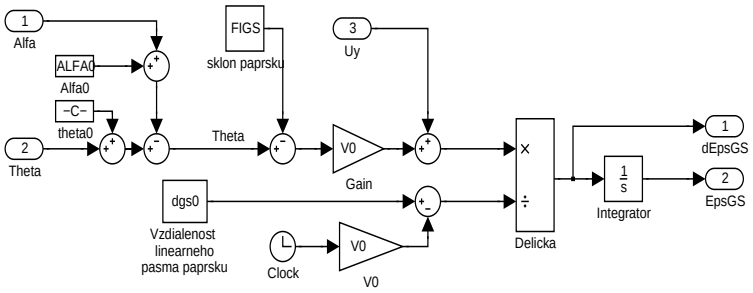
Schéma zobrazená na obrázku 72 zobrazuje blokovú štruktúru automatického riadenia letu v zostupnej rovine. Vidíme, že základom je lietadlo s tlmičom rýchlych kmitov a tlmičom normálového zrýchlenia. Blok LET PO ZOSTUPNOM PAPRSKU vypočítava uhlovú odchýlku ε_{GS} a jej deriváciu $\dot{\varepsilon}_{GS}$, pomocou ktorých ovládame lietadlo. Blok PRESNOSŤ v uzavretom obvode autopilot-lietadlo slúži, ako uvidíme neskôr, na potlačenie statickej chyby pri regulácii $\dot{\varepsilon}_{GS}$, ktorá je kľúčová pre potlačenie vertikálnej zložky vetra. Regulačná sľučka je doplnená premenným deliteľom, ktorý udržuje riadiaci systém v oblasti stabilných hodnôt. Pre ilustráciu je schéma doplnená blokom výpočtu výšky - jej zobrazenie umožní lepšiu predstavu o skutočnej trajektórii lietadla pri lete v zostupnom paprsku.

Obrázok 73 približuje usporiadanie systému lietadla s tlmičom rýchlych kmitov - spätná väzba $\dot{\vartheta}(s)/\dot{\vartheta}_1(s)$ a tlmičom normálového zrýchlenia - väzba $a_n(s)/a_{n1}(s)$. V tejto spätnej rovnici je blok "rovnica a_n", ktorý vypočítava normálové zrýchlenie na základe linearizovanej rovnice $a_n = V_0 \cdot a_{22} \cdot \alpha$ odvodenej v kapitole 9.2.3.



Obr. 73: Detail bloku lietadla s tlmičom rýchlych kmitov v systéme úsporného autopilota GLIDESLOPE

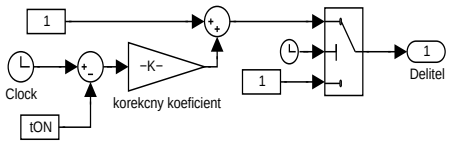
Na schéme pozorujeme aj spätnú sľučku tvoriaci automat ťahu. Tento je definovaný koeficientom spätnej väzby $K_V = 1$ a servomechanizmom typu PI s prenosom $F_{SMT}(s) = \frac{3{,}0871s+1}{s}$. Pri návrhu autopilota a naväzujúcich pokusoch bol však vypnutý.



Obr. 74: Detail bloku výpočtu kinematickej rovnice ε_{GS} - blok LET PO ZOSTUPNOM PAPRSKU

Schéma 74 zobrazuje blokovú realizáciu výpočtu kinematickej rovnice odchýlky od zostupnej roviny ε_{GS} definovanú vzťahom 25. Bloky *ALFA0* a *THETA0* zodpovedajú ustáleným hodnotám pri režime stabilizácie výšky. Hodnota *dgs0* udáva vzdialenosť lietadla od vysielača zostupného paprsku v momente pretnutia jeho lineárneho pásma.

Problémom stabilizácie lietadla v zostupnom paprsku je zväčšovanie časovo premenného koeficientu pri lete smerom k vysielaču GS. Jeho rast môže spôsobiť, že sa uzavretý regulačný systém autopilot-lietadlo dostane mimo oblasť stabilných hodnôt a lietadlo sa stane neovládateľným. Z tohto dôvodu dopĺňame regulačnú sľučku o deliteľ, ktorý buď jednorázovo alebo spojite znižuje zosilnenie v priamej vetve regulačného obvodu, a tým kompenzuje rast koeficientu.



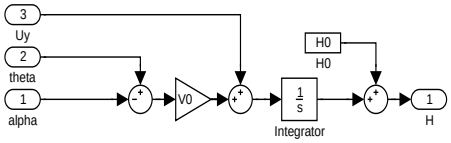
Obr. 75: Systém výpočtu premenného deliteľa

Systém na obrázku 75 prepína medzi rovnicami:

$$Delitel = 1 \; pre \; t < t_{ON} \tag{26}$$

$$Delitel = 1 + k(t - t_{ON}) \; pre \; t > t_{ON} \tag{27}$$

Deliteľ je premenný - spojite zvyšuje svoju hodnotu v priebehu času. Jeho zapnutie sa dá odložiť, na ktorýkoľvek moment v priebehu simulácie definovaný konštantou t_{ON}. Zapnutie zaručuje programovateľný prepínač.



Obr. 76: Rovnica výpočtu výšky

Pre lepšiu ilustráciu letu je systém doplnený o blok výpočtu výšky. Detail tohto výpočtu je zobrazený na schéme 76 a zodpovedá rovnici:

$$H = H_0 + \int_0^t V_0 \cdot (\vartheta - \alpha) + U_Y d\tau \tag{28}$$

kde H_0 je výška pretnutia paprsku GS.

11.2 Programu výpočtu autopilota, nastavenie a výsledky

Program výpočtu regulačného obvodu letu v zostupnom paprsku začína zadaním parametrov letu:

- Sklon zostupného paprsku Θ_{GS}.
- Približovacia rýchlosť V_0.[8]
- Výška pretnutia zostupného paprsku H_0.
- Výška rozhodnutia H_{END}, v ktorej simulácia končí.[9]

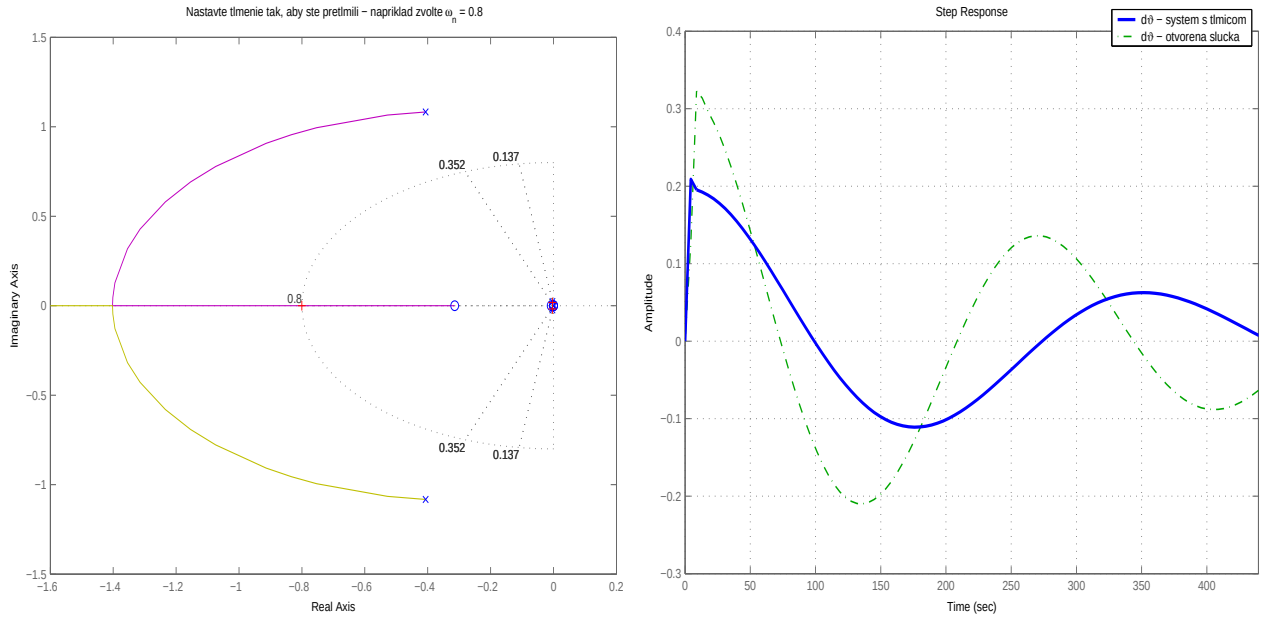
Po zadaní spomenutých parametrov program spočíta čas simulácie, ktorý zodpovedá času letu v režime konečného priblíženia na pristátie, a začne s realizáciou postupného návrhu automatického systému stabilizácie letu v zostupnom paprsku.

11.2.1 Nastavenie tlmiča rýchlych kmitov

Vlastný výpočet autopilota začína nastavením tlmiča rýchlych kmitov lietadla. Tlmič sa navrhuje v spätnoväzbovom obvode $\dot{\vartheta}(s)/\dot{\vartheta}_1(s)$. Koeficient zosilnenia sa nastaví tak, aby bol systém pretlmený.

[8]program umožňuje zadať len 40 m/s, v prípade inej rýchlosti počíta ďalej s rýchlosťou 40 m/s. Je to z dôvodu použitého matematického modelu lietadla, ktorý je linearizovaný práve pre túto rýchlosť.

[9]výška rozhodnutia pre lietadlá I. kategórie ICAO je 60 m, pre II. kategóriu 30 m, pre III.A 15 m, pre III.B 3 m a pre III.C 0 m.



Obr. 77: Nastavenie koeficientu $K_{\dot{\vartheta}}$ a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\dot{\vartheta}_{+}(s)$

Obrázok 77 ukazuje GMK nastavenia tlmiča rýchlych kmitov ako aj výslednú prechodovú charakteristiku $\dot{\vartheta}(s)/\dot{\vartheta}_1(s)$ a jej porovnanie s pôvodnou odozvou v otvorenej sľučke.

Rýchle póly sú pretlmené s vlastnou frekvenciou 0,8 respektíve 2,75 rad/s (viď tabuľka 26), na porovnaní prechodových charakteristík môžeme pozorovať vplyv nového nastavenia.

Z porovnania tabuliek 25 a 26 vidíme, že došlo aj k malému zvýšeniu tlmenia a zníženiu frekvencie pólov pomalého pohybu.

Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-3,2·10^{-3} + 2.32·$10^{-2}\jmath$	0,137	2,34·10^{-2}
-3,2·10^{-3} - 2.32·$10^{-2}\jmath$	0,137	2,34·10^{-2}
-0,407 + 1,08$\jmath$	0,352	1,16
-0,407 - 1,08$\jmath$	0,352	1,16

Tabuľka 25: Poloha pólov - pôvodný systém

Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-3,27·10^{-3} + 1,8·$10^{-2}\jmath$	0,179	1.83·10^{-2}
-3,27·10^{-3} - 1,8·$10^{-2}\jmath$	0,179	1.83·10^{-2}
-0,8	1,00	0,8
-2,75	1,00	2,75

Tabuľka 26: Poloha pólov - systém s tlmičom

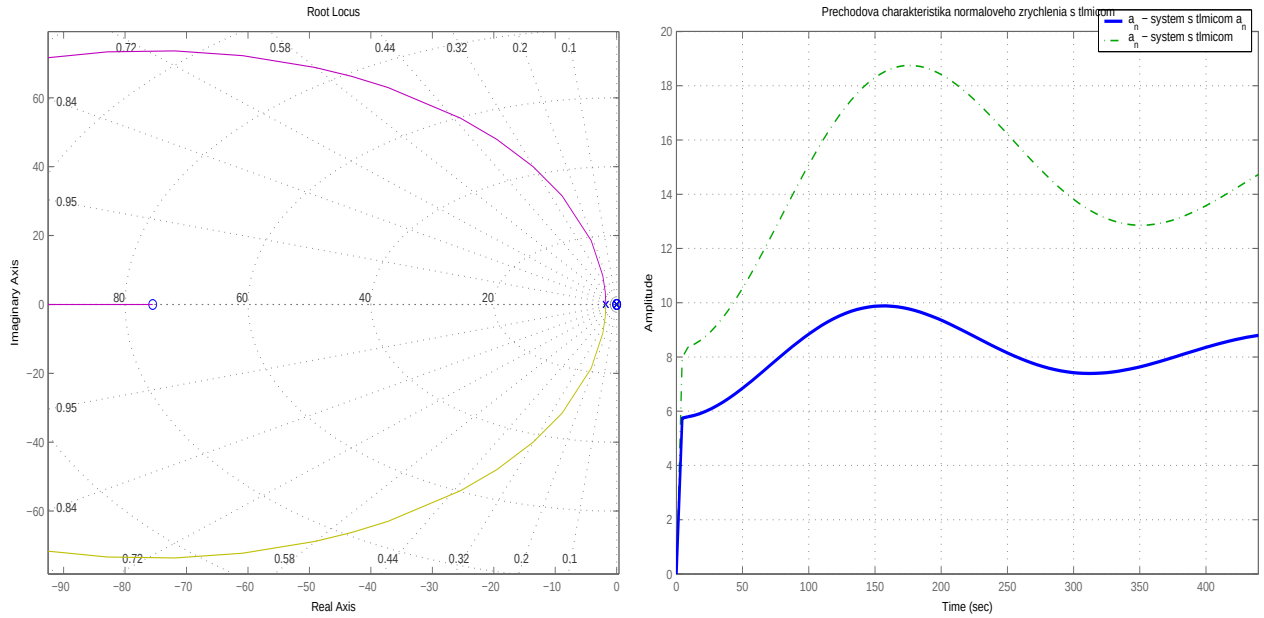
11.2.2 Nastavenie tlmiča normálového zrýchlenia a_n

Postupný návrh autopilota pokračuje nastavením tlmiča normálového zrýchlenia v spätnoväzbovom obvode $a_n(s)/a_{n1}(s)$. Spätnoväzbový koeficient zvolíme tak, aby sme dostali rýchle póly na medzu aperiodicity.

Poloha pólu	tlmenie	vlastná frekvencia $[rad/s]$
-3,23·10^{-3} + 2,01·$10^{-2}\jmath$	0,158	2.04·10^{-2}
-3,23·10^{-3} - 2,01·$10^{-2}\jmath$	0,158	2.04·10^{-2}
-1,78	1,00	1,78
-1,78	1,00	1,78

Tabuľka 27: Poloha pólov - systém s tlmičom normálového zrýchlenia

Tabuľka 27 ukazuje polohu pólov nového nastavenia. Vidíme, že rýchle póly sú na medzi aperiodicity a porovnanie s tabuľkou 26 ukazuje, že tlmič normálového zrýchlenia má len minimálny vplyv na póly fygoidálneho pohybu.



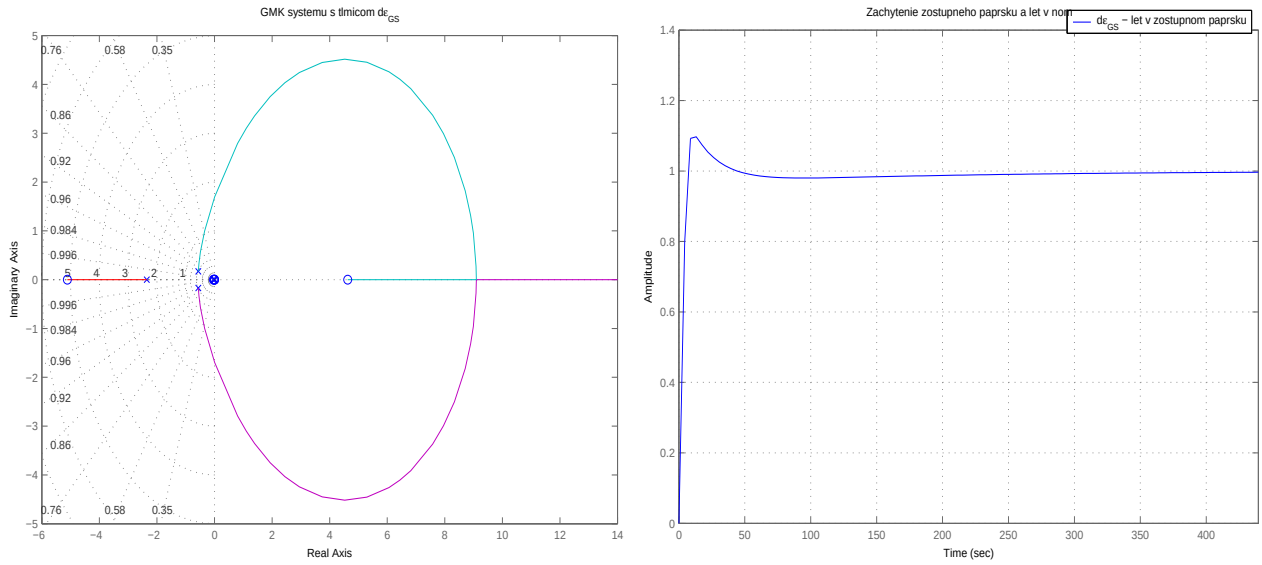
Obr. 78: Nastavenie koeficientu K_{a_n} a výsledná prechodová charakteristika prenosu $a_{n1}(s)/a_{n0}(s)$

GMK na obrázku 78 zobrazuje výsledné geometrické miesto koreňov, zatiaľčo prechodové charakteristiky nám ilustrujú vplyv nastavenia tlmiča normálového zrýchlenia. Potvrdzujú sa tabuľkové hodnoty, keďže pozorujeme utlmenie rýchlej zložky pohybu, zatiaľčo dynamika pomalých kmitov zostáva skoro nezmenená.

11.2.3 Nastavenie regulátora $\dot{\varepsilon}_{GS}$

Pri regulácii uhlovej odchýlky ε_{GS} od stredu zostupného paprsku je regulátor jej derivácie $\dot{\varepsilon}_{GS}$ rovnako dôležitý pre potlačenie rušenia vertikálnou zložkou vetra, ako je regulátor vertikálnej rýchlosti pri regulácii výšky. Zo schémy výpočtu odchýlky ε_{GS} (obrázok 74) vyplýva, že konštantná hodnota vertikálneho poryvu sa integráciou mení na signál rampa, ktorý nedokáže jednoduchý spätnoväzbový regulátor typu P potlačiť. Z toho dôvodu zavádzame spätnú väzbu od $\dot{\varepsilon}_{GS}$, ktorá potlačí konštantný signál vertikálneho poryvu vetra a náväzne regulátor ε_{GS} potlačí konštantnú hodnotu, ktorá vzniká integrovaním nenulových hodnôt prechodového deja v slučke $\dot{\varepsilon}_{GS}/\dot{\varepsilon}_{GS1}$ pri potláčaní rušenia U_Y.

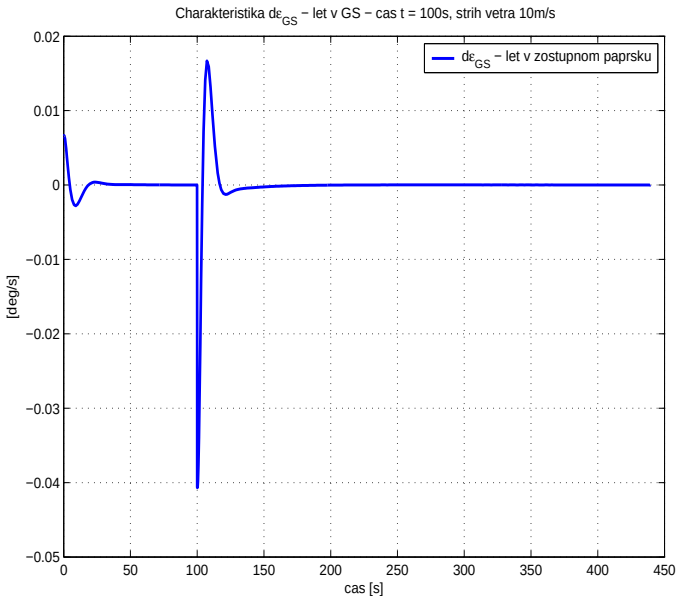
Pre správne fungovanie systému stabilizácie letu v paprsku GS je dôležitá aj presnosť regulácie, preto zavádzame do priamej vetvy blok *Presnosť*, ktorý má charakter PI mechanizmu a potláča statickú chybu na výstupe $\dot{\varepsilon}_{GS}$.



Obr. 79: GMK a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\dot{\varepsilon}_{GS1}(s)/\dot{\varepsilon}_{GS0}(s)$

Obrázok 79 zobrazuje výsledné GMK a zodpovedajúcu prechodovú charakteristiku takéhoto nastavenia. Vidíme, že systém je podmiene stabilný, čo znamená, že nemôžme voliť príliš veľké zosilnenie, aby sme sa nedostali mimo stabilnú oblasť.

Z prechodovej charakteristiky vidíme, že čas regulácie[10] je približne 50 sekúnd a že prechodový dej vykazuje prekmit 10% ustálenej hodnoty. Regulácia je presná, bez statickej chyby, charakteristika dosiahne nastavenú hodnotu za cca 300 sekúnd.



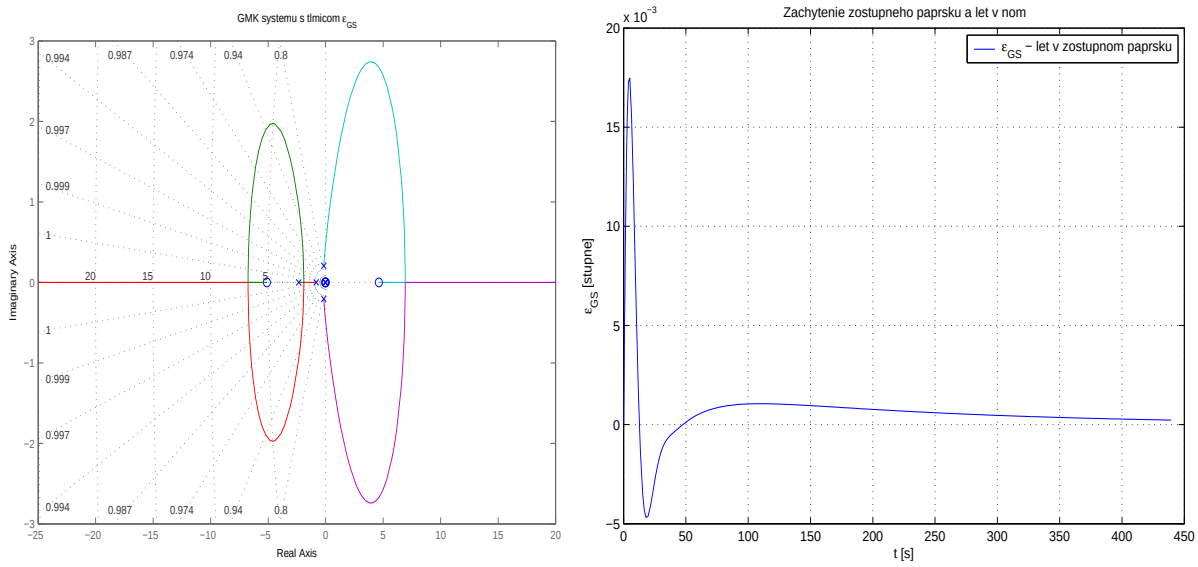
Obr. 80: $\dot{\varepsilon}_{GS}$ - let v zostupnom paprsku: v čase t = 100s, strih vetra veľkosti 10 m/s

[10]čas, kedy sa charakteristika dostane natrvalo do hodnôt: nastavená hodnota ±5%

Charakteristika na grafe 80 zobrazuje správanie $\dot{\varepsilon}_{GS}$ počas letu v zostupnom paprsku. Na začiatku pozorujeme prechodový dej zodpovedajúci zachyteniu paprsku, vidíme že k ustáleniu dochádza približne za 40 sekúnd. V čase t=100s vlietlo lietadlo do zóny s konštatným vertikálnym vetrom veľkosti 10m/s. Tomuto momentu zodpovedá výkyv na charakteristike s maximálnou hodnotou -0,04°/s. Po ďalších 50 sekundách dochádza k potlačeniu rušenia a tak sa charakteristika $\dot{\varepsilon}_{GS}$ vracia do nulových hodnôt.

Nastavenie regulátora letu v zostupnom paprsku ε_{GS}

Za samotný let v zostupnom paprsku zodpovedá vonkajšia spätná väzba, ktorá reguluje odchýlku ε_{GS}. Jej úlohou je udržiavať tento uhol nulový. Uspokojivé nastavenie regulácie $\dot{\varepsilon}_{GS}$, tzn. bez statickej chyby, nám umožňuje použiť na reguláciu odchýlky od zostupnej roviny jednoduchý P regulátor.

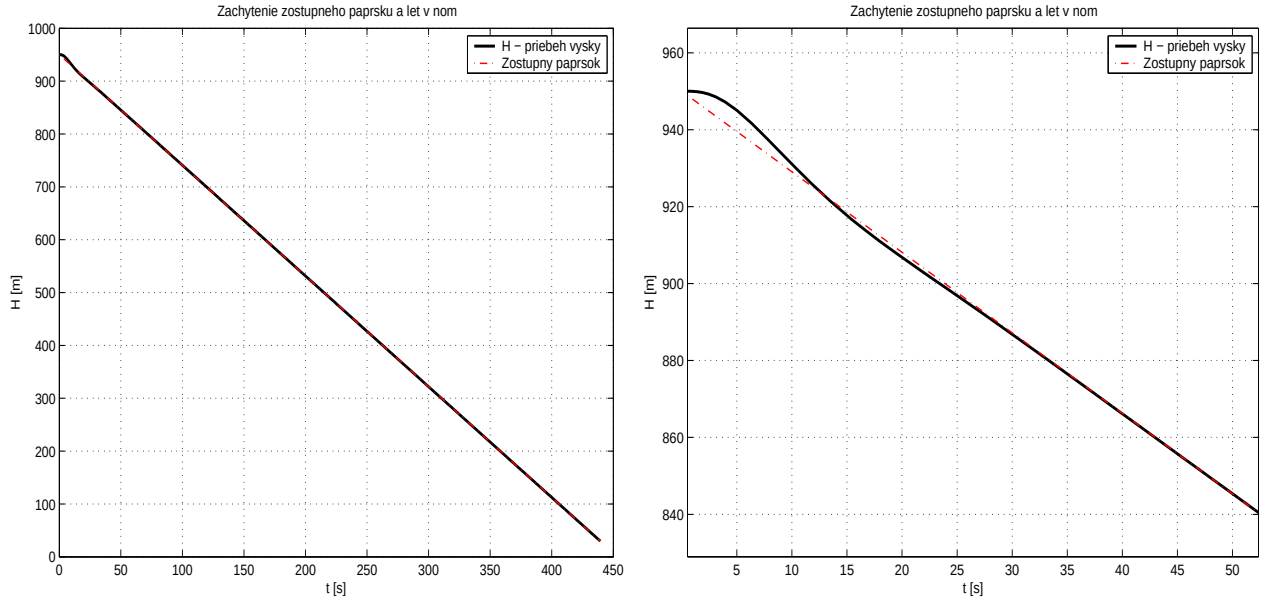


Obr. 81: GMK a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\varepsilon_{GS}(s)/\varepsilon_{GS1}(s)$

GMK na obrázku 81 ukazuje výsledné GMK automatického systému letu v zostupnej rovine. Vidíme, že systém je podmienene stabilný, čo spôsobuje nestabilná nula pochádzajúca z rozdielu $\vartheta - \alpha$. Rovnako ako pri voľbe $K_{\dot{\varepsilon}_{GS}}$ musíme teda pri nastavení $K_{\varepsilon_{GS}}$ dávať pozor, aby sme sa nedostali do nestabilných hodnôt. Koeficient zosilnenia volíme s ohľadom na vlastnosti prechodovej charakteristiky, ktoré chceme dosiahnuť.

Charakteristika na grafe 81 zobrazuje vývoj odchýlky ε_{GS} počas letu v zostupnom paprsku pri koeficiente $K_{\varepsilon_{GS}} = 0,13$. Na začiatku deja je zreteľná fáza zachytenia paprsku a priblíženia sa k nemu. Maximálna odchýlka od zostupného paprsku je 0,017°. Po zachytení paprsku sa s ním lietadlo pomaly zosúlaďuje. Vo výške rozhodnutia je odchýlka $\varepsilon_{GS} = 2 \cdot 10^{-4\circ}$, čo pri výške rozhodnutia 30 m a sklone zostupného paprsku 3° predstavuje absolútnu odchýlku približne 0,2 cm.

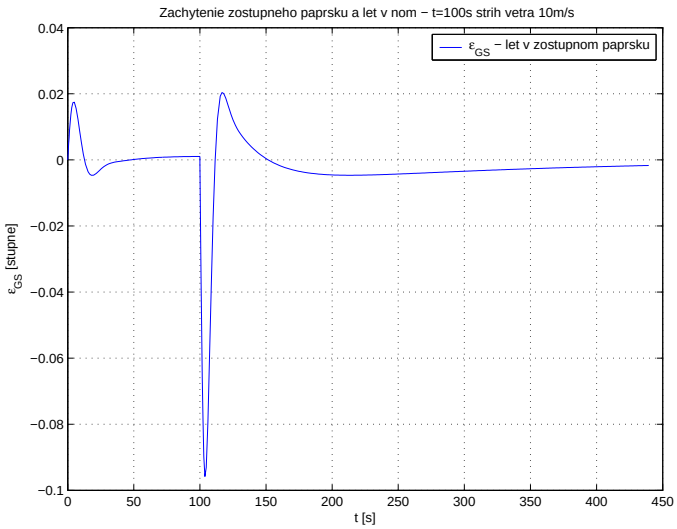
Grafy na obrázku 82 ilustrujú priebeh výšky lietadla počas letu v zostupnom paprsku. Na prvom z nich vidíme, že priebehy výšky lietadla a zostupného paprsku sú zosúladené. Zaujímavejší je detail zachytenia paprsku. Pozorujeme prekríženie trajektórie s paprskom GS (čas t=0s), reakciu systému a prvé priblíženie k paprsku (čas t=12s), mierne podletenie paprsku a pomalé prekrytie charakteristík (čas t=12-35s).



Obr. 82: Priebeh výšky a detail zachytenia paprsku počas letu v GS

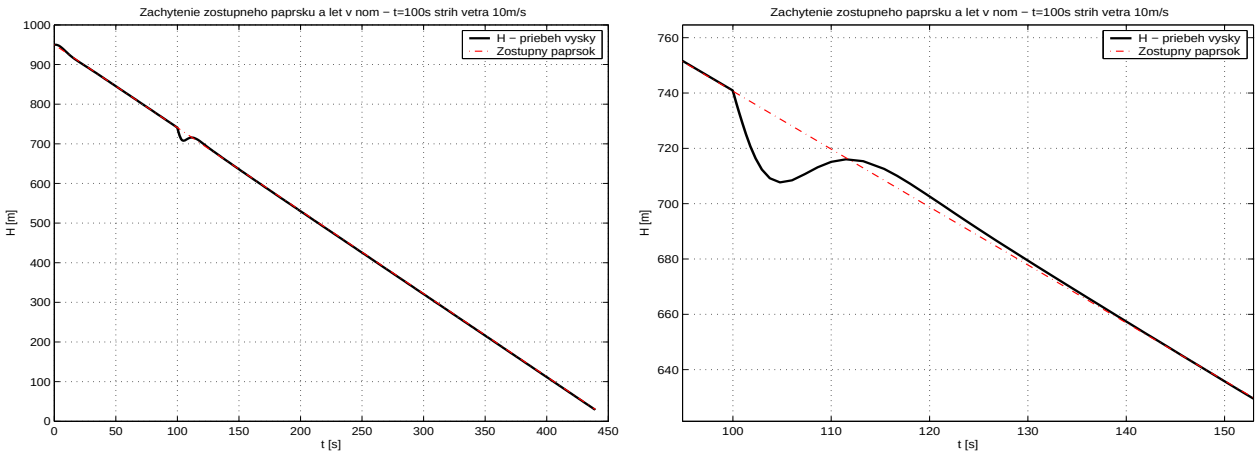
11.2.4 Vplyv vertikálnej zložky vetra U_Y

Potlačenie vertikálneho poryvu vetra je jedna z najdôležitejších úloh systému automatického letu v zostupnom paprsku. V prípade, že by autopilot nemal túto vlastnosť, mohlo by pristátie vyústiť veľmi ľahko do katastrofy.



Obr. 83: Vplyv poryvu vertikálneho vetra na let v zostupnom paprsku pomocou úsporného autopilota

Graf 83 zobrazuje charakteristiku ε_{GS} počas letu v GS s pôsobením konštantnej vertikálnej zložky vetra od času t=100 s. Vidíme, že vietor spôsobí vychýlenie na maximálnu hodnotu 0,1°, ktorú sa snaží autopilot hneď potlačiť. Táto hodnota stále leží v lineárnej oblasti paprsku GS. Po rýchlom prekmite do kladnej vychýlky sa lietadlo pomaly vracia k zostupnému paprsku. Vo výške rozhodnutia 30m je $\varepsilon_{GS} = 0,01°$, čo zodpovedá absolútnej výchylke 10 cm.

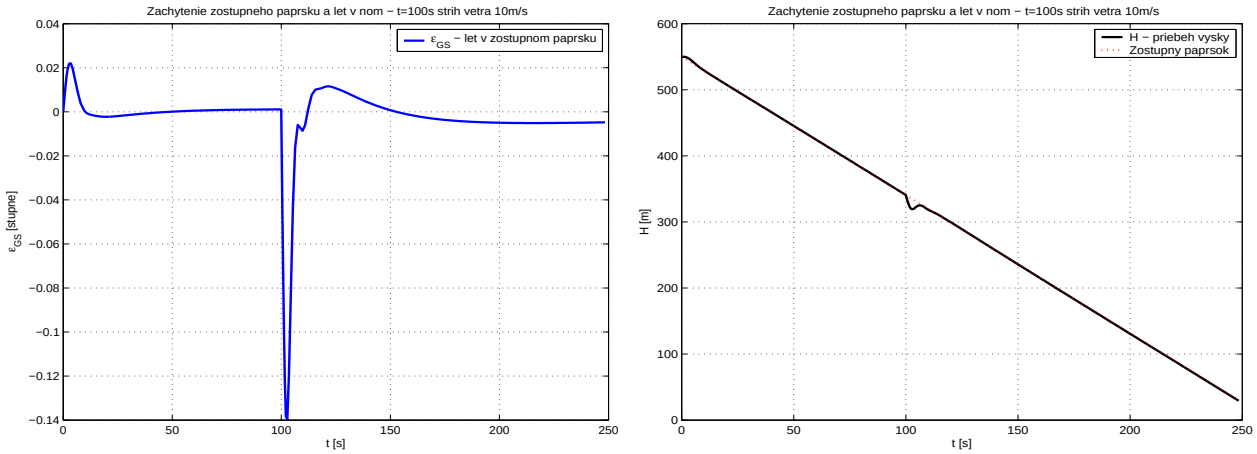


Obr. 84: Vplyv poryvu vetra na let v zostupnom paprsku - priebeh výšky

Priebeh výšky pri tomto lete môžeme pozorovať na obrázku 84. V čase t=100 sekúnd vidíme výrazný vplyv poryvu vetra. Na detaile pozorujeme, že výška klesla o 30m v priebehu 5 sekúnd, aby lietadlo miernym stúpaním znovu prekrížilo paprsok GS za ďalších približne 5 sekúnd. Lietadlo mierne nadletí a pomaly, v čase približne 30 sekúnd, zosúladí svoju trajektóriu so zostupným paprskom.

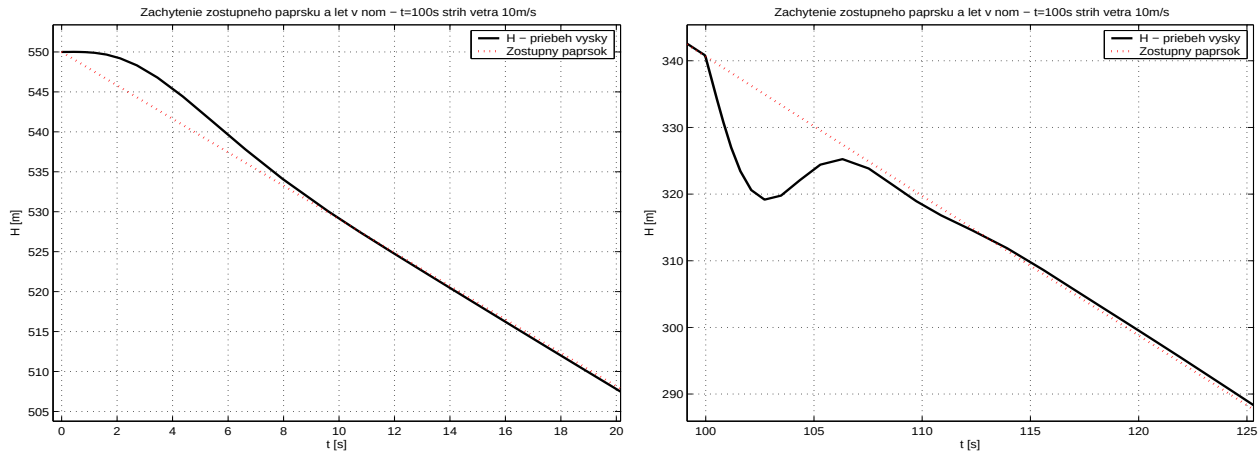
11.2.5 Pokus pre počiatočnú výšku h=550m

Výška 950 m používaná v predchádzajúcich pokusoch zodpovedá prakticky hranici dosahu lineárneho pásma zostupného paprsku. Ukážme si preto rovnaký pokus pre lietadlo s rovnako nastaveným autopilotom, ale pre výšku pretnutia paprsku 550m, ktorá zodpovedá viac realite leteckej prevádzky.



Obr. 85: Let v zostupnom paprsku - priebeh ε_{GS} a výšky H

Grafy na obrázku 85 zobrazujú priebeh ε_{GS} a tomu zodpovedajúci priebeh výšky. Vidíme, že sa mierne zvýšili maximálne výchylky, či už pri zachytení paprsku alebo vplyvom vetra, ale stále zostáva lietadlo v lineárnom pásme paprsku. Zvýšenie odchýliek je dôsledkom priblíženia sa k majáku, a tak sa absolútna odchýlka, ktorá je približne rovnaká ako v predchádzajúcom prípade, prejaví ako väčšia odchýlka uhlová.

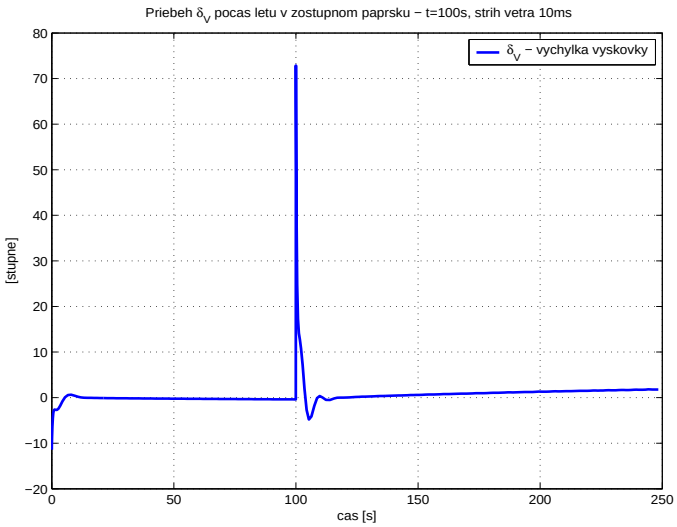


Obr. 86: Zachytenie zostupného paprsku a detail vplyvu poryvu vertikálneho vetra na let v zostupnom paprsku - priebeh výšky

Detaily priebehu výšky na obrázku 86 nám ukazujú, že už nedochádza k prekmitu cez ustálenú hodnotu. Lietadlo sa blíži k zostupnému paprsku zhora, respektíve zdola pri potlačení poruchy. Znížil sa aj čas potrebný na zachytenie paprsku (12 sekúnd oproti 25s) a potlačenie poruchy (25s oproti 40s). Tento jav je spôsobený menšou vzdialenosťou lietadla od majáku, čo zvyšuje citlivosť spätnoväzbového systému.

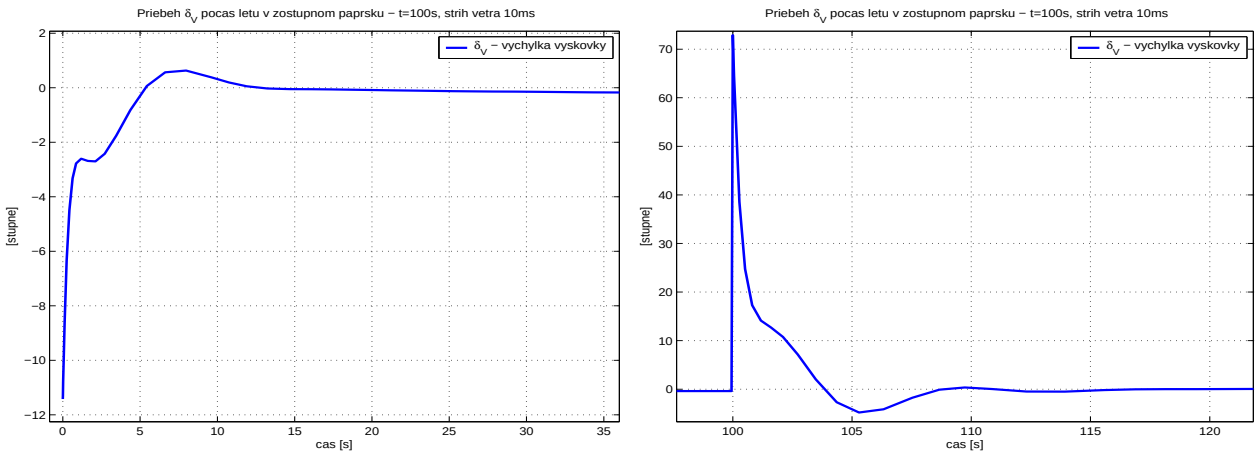
11.2.6 Výchylka výškovky - δ_V

Počas predchádzajúcich simulácii boli všetky dynamické deje na lietadle vyvolávané výchylkou výškovky δ_V. Z toho dôvodu sa pozrime na rozmedzie hodnôt, v ktorých pracuje.



Obr. 87: Priebeh výchylky výškovky počas letu v zostupnom paprsku

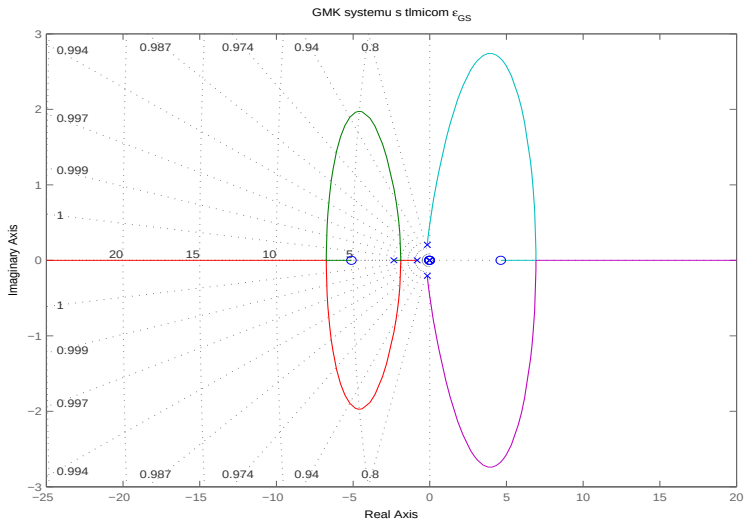
Na uvedených obrázkoch (87 a 88) vidíme, že výškovka sa počas predchádzajúcich pokusoch pohybovala v rozmedzí od -12°, pri zachytení paprsku, po 70° počas potláčania poruchy. Maximálna hodnota pri potlačení poryvu vetra je vysoká, v skutočnosti by výškovka nemusela byť schopná dosiahnuť takých vysokých hodnôt výkyvu a tak by jej vlastná dynamika, respektíve limity, mohli spomaliť potlačenie poruchy. Obmedzenie výkyvu výškovky sa dá simulovať



Obr. 88: Priebeh δ_V - detail momentu zachytenia paprsku, potlačenie vertikálneho poryvu vetra

pomocou bloku SATURATION na vstupe výškovky. Pre potreby tohto pokusu však neboli údaje o maximálnej možnej výchylke výškovky známe.

11.3 Vplyv premenného deliteľa



Obr. 89: GMK prenosu $\varepsilon_{GS1}(s)/\varepsilon_{GS0}(s)$

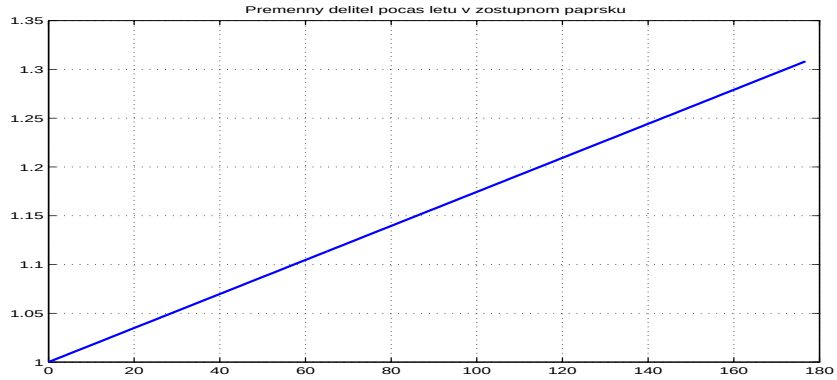
Na GMK spätnoväzbového zapojenia regulácie letu v zostupnom paprsku (obr. 89) vidíme, že ide o podmienečne stabilný systém. Koeficient zosilnenia nemôže byť preto veľmi veľký, aby sa lietadlo nedostalo do nestabilných hodnôt.

Lenže z kinematickej rovnice výpočtu odchýlky od zostupnej roviny:

$$\varepsilon_{GS} = \frac{V_0}{D_{GS0} - V_0 t} \cdot \int_0^t (\Theta - \Theta_{GS0}) d\tau \tag{29}$$

vyplýva, že s približovaním lietadla k majáku GS rastie časovo premenný koeficient - systém sa stáva citlivejším. Na grafe GMK (obr 89) zodpovedá tento fakt posunu pólov smerom k nestabilnej oblasti.

Aby sa zabránilo posunu koreňov až do nestabilnej oblasti, zavádza sa do regulačnej sľučky premenný deliteľ, ktorý v pravidelných intervaloch skokovo alebo priebežne znižuje zosilnenie regulačnej sľučky tak, aby kompenzoval vplyv časovo premenného koeficientu z rovnice 29.



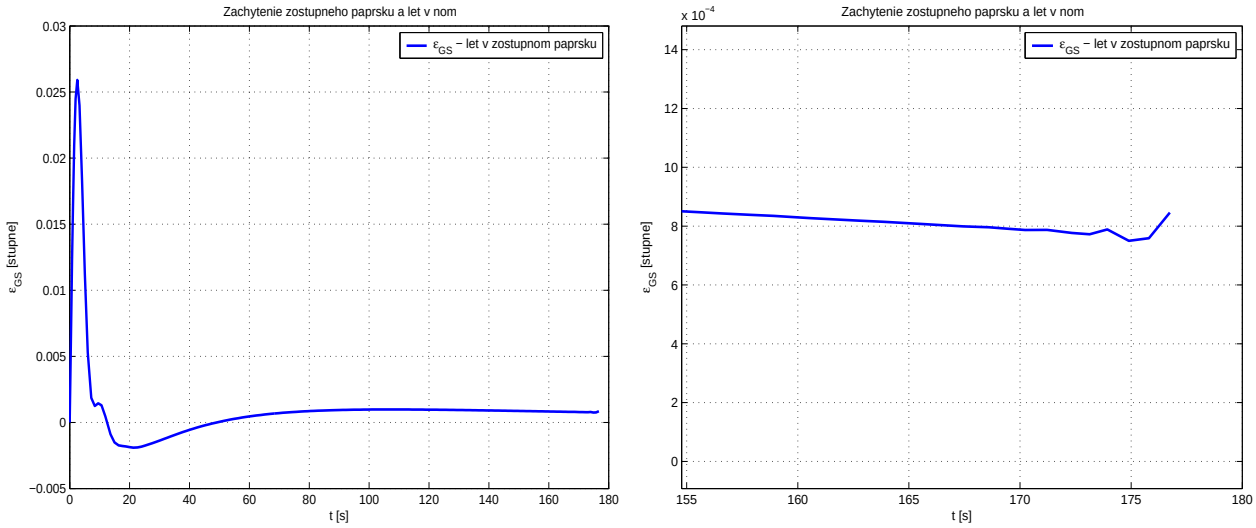
Obr. 90: Charakteristika premenného deliteľa

Ja som pri simulácii volil spojite premenný deliteľ, jeho charakteristiku môžeme pozorovať na zobrazení 90.

Nasledovné príklady ukazujú vplyv deliteľa na uzavretý systém autopilot-lietadlo s nastavením automatu popísaným vyššie.

11.3.1 Vplyv na lietadlá II. kategórie ICAO

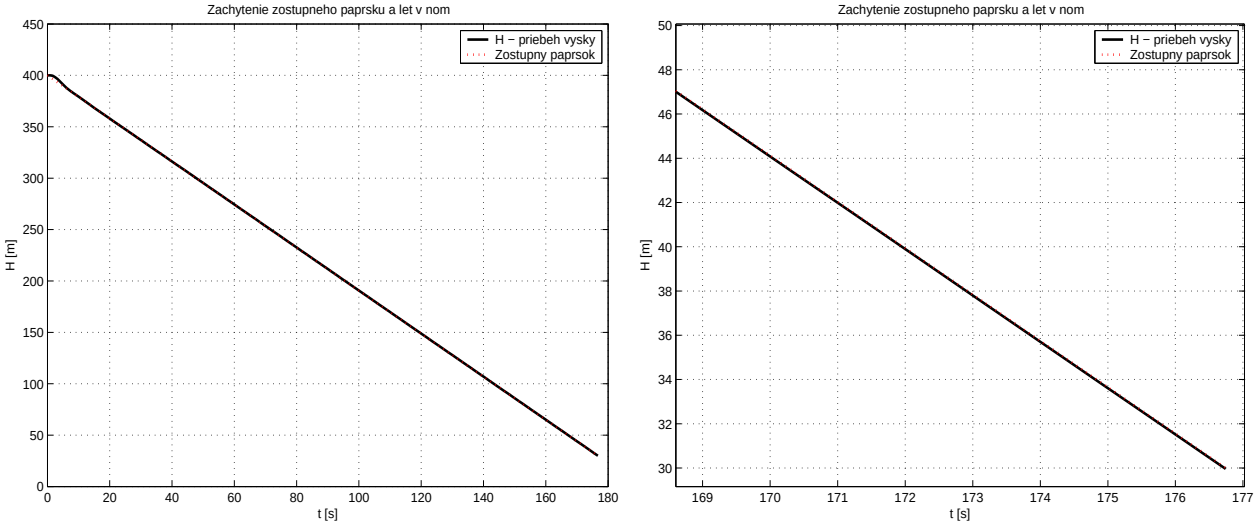
Autopilot bol navrhnutý s použitím linearizovaného modelu lietadla L-410, ktoré patrí do II. kategórie ICAO s výškou rozhodnutia 30m.



Obr. 91: Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na oblasť na medzi stability

Z obrázku 91 môžeme usudzovať, že autopilot popísaný vyššie vyhovuje lietadlám II. kategórie ICAO, ktoré sa počas letu v zostupnej rovine nedostanú do nestabilnej oblasti. Akurát detailné zobrazenie záveru charakteristiky ukazuje, že sa lietadlo dostáva vo výške rozhodnutia na medzu stability.

Ako však ukazujú grafy na obrázku 92, tento fakt nemá na priebeh výšky vplyv.

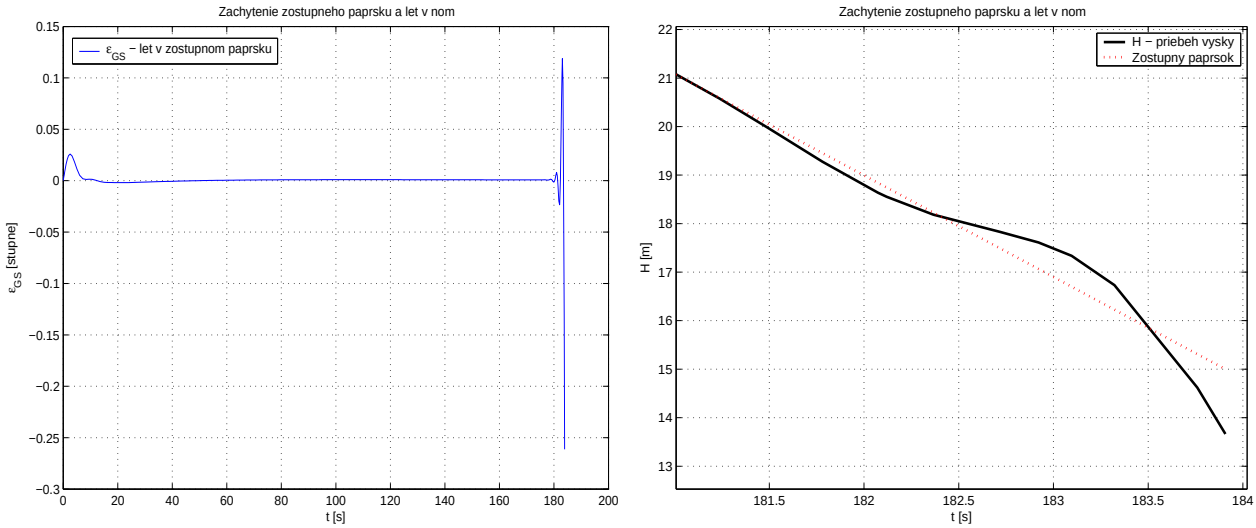


Obr. 92: Priebeh výšky - Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na let v blízkosti výšky rozhodnutia

11.3.2 Vplyv na lietadlá III.A kategórie ICAO

Predĺžením času letu, napríklad simuláciou pre lietadlo III.A kategórie s výškou rozhodnutia 15m, by sme si mohli ukázať, ako by sa vyvýjali charakteristiky, keby let v zostupnom paprsku nekončil vo výške 30 m.

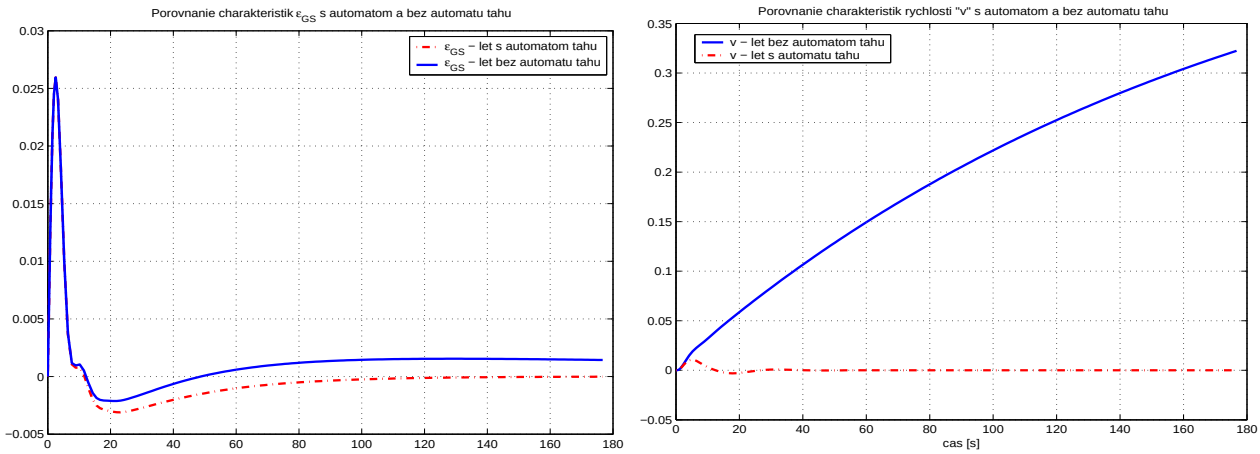
Na obrázku 93 pozorujeme jednak výrazné rozkmitanie prechodovej charakteristiky odchýlky ε_{GS}, ale aj vplyv tohto faktu na priebeh výšky. Vidíme, že od výšky 20 m sa začína lietadlo odkláňať od ideálneho priebehu a začína oscilovať okolo paprsku GS so zvyšujúcou sa amplitúdou.



Obr. 93: Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na let v blízkosti výšky rozhodnutia

11.4 Vplyv automatu ťahu

Predchádzajúce pokusy som uskutočnil bez zapojeného automatu ťahu, pretože autopilot S-TEC S55 týmto automatom nedisponuje. Na schéme 73 sme však videli, že implementácia automatu ťahu je relatívne jednoduchá a nezávislá na obvodoch regulácie letu v zostupnom paprsku.



Obr. 94: Vplyv automatu ťahu: regulácia odchýlky ε_{GS} a regulácia rýchlosti v

Obrázok 94 dokumentuje vplyv zapojenia automatu ťahu na let v zostupnom paprsku. Vidíme, že regulácia vzdušnej rýchlosti nezrýchlila dynamiku zachytenia paprsku, zvýšila však presnosť regulácie.

Pre ilustráciu uvádzam priebeh rýchlosti. Vplyv automatu ťahu je evidentný a očakávaný: pri jeho použití zostáva prírastok rýchlosti po úvodnom vychýlení na nulovej hodnote, pri jeho vypnutí rýchlosť pozvoľna rastie.

12 ZÁVER - Porovnanie výsledkov úsporného a klasického autopilota

Diplomová práca ponúka v prvej časti zoznámenie s klasickým autopilotom, so základným nastavením a fungovaním režimov stabilizácie pozdĺžneho pohybu, stabilizácie výšky a vertikálnej rýchlosti a konečného priblíženia na pristátie.

Druhá časť predkladá detailnejšiu štúdiu autopilota s úsporným prístrojovým vybavením v pozdĺžnej rovine pre módy stabilizácie vertikálnej rýchlosti, výšky a letu v zostupnom paprsku. Videli sme, že je možné úspešne riadiť lietadlo pomocou navrhovaného úsporného senzorového a prístrojového vybavenia (tlmič rýchlych kmitov, akcelerometer, barometrický výškomer) a to v celom spektre režimov charakteristických pre riadenie v pozdĺžnej rovine.

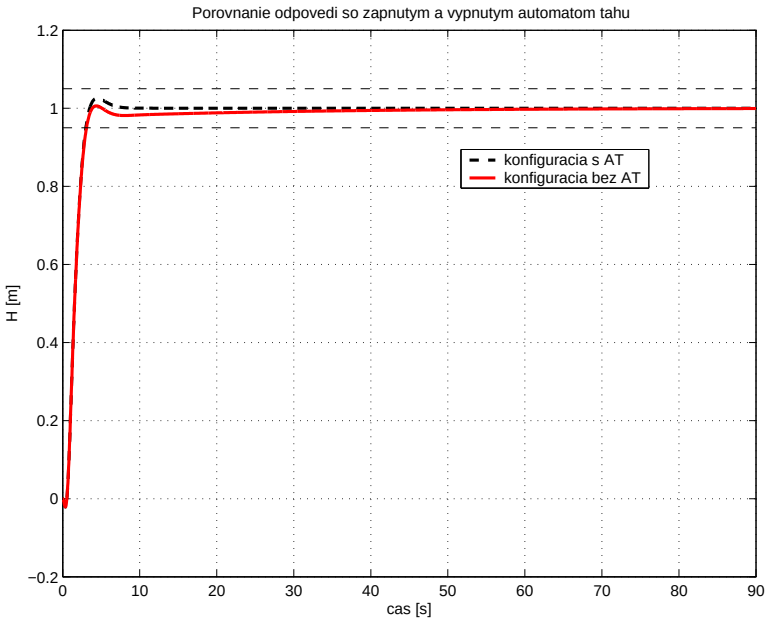
Porovnanie týchto dvoch typov autopilotov je možné len veľmi ťažko vzhľadom na rozdielnu hĺbku štúdia jednotlivých systémov riadenia lietadla. Pre niektoré režimy letu však môžeme porovnať základné parametre.

12.1 Stabilizácia výšky a vertikálnej rýchlosti

Pre stabilizáciu výšky sme s úsporným autopilotom v konfigurácii s automatom ťahu alebo bez neho dosiahli lepší čas stabilizácie ako pri použití klasického autopilota: 3, respektíve 2,26 sekundy pri použití ekonomického autopilota oproti 15 sekundám s klasickým usporiadaním.

Úsporný autopilot je aj menej citlivý na vertikálny poryv vetra, ktorý pri konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia, jeho derivácie a automatom ťahu spôsobí úvodnú výchylku veľkosti 0,65 m. Pripomeňme, že rovnaké rušenie spôsobilo v podobnej konfigurácii ale s klasickým autopilotom úvodnú výchylku veľkosti skoro 3,5 m. Obidva systémy spoľahlivo potlačia toto rušenie, systém úsporného autopilota v priebehu 4 sekúnd, klasické usporiadanie potrebuje 16 sekúnd.

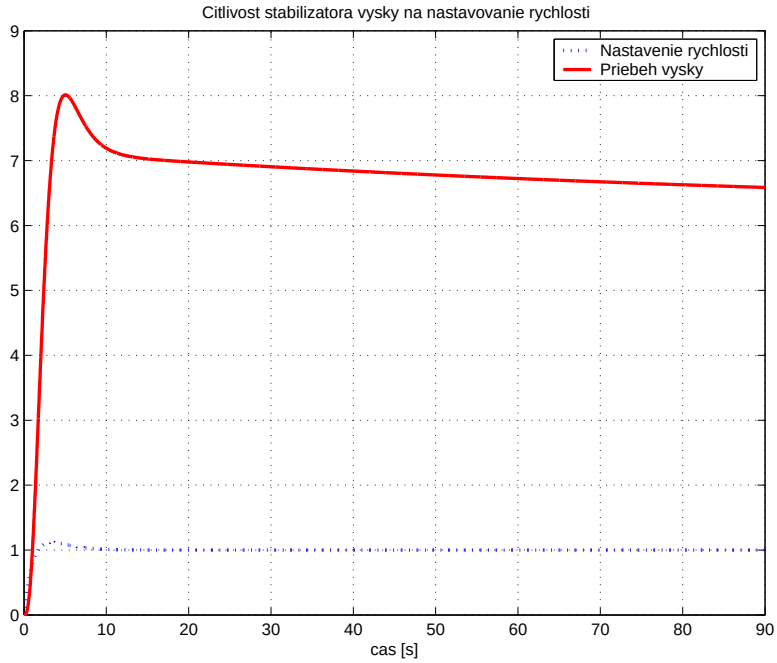
Rovnako ako pri klasickom autopilote nespôsobí odpojenie automatu ťahu v konfigurácií zo strany 66 výrazné spomalenie stabilizácie - viz obrázok 95.



Obr. 95: Porovnanie prechodovej charakteristiky pre nastavenie úsporného autopilota z kapitoly 10.2.3 so zapnutým automatom ťahu a bez neho

Vidíme, že pri odpojení automatu ťahu zostáva čas stabilizácie nemenný, zmenšil sa prekmit a k dosiahnutiu nastavenej hodnoty dochádza tiež pomalšie, ako v prípade so zapojenou stabilizáciou vzdušnej rýchlosti. Odpojením automatu ťahu dochádza však k výraznému zhoršeniu charakteristík autopilota pri potlačení rušenia spôsobeného vertikálnym poryvom vetra. V tomto prípade je lepšie použiť štruktúru navrhnutú bez automatu ťahu, napríklad autopilot z kapitoly 10.1.2.

Úsporný autopilot je tiež veľmi citlivý na nastavovanie rýchlosti. Graf 96 ukazuje priebeh výšky pri nastavení rýchlosti - na autopilote výšky bola nastavená nulová hodnota.



Obr. 96: Priebeh výšky uzavretého systému úsporný autopilot s AT - lietadlo pri nastavovaní rýchlosti

Vidíme, že systém reaguje veľmi citlivo na zmenu rýchlosti, výška narastá v krátkom čase na hodnotu 8m. Ďalej síce pozorujeme tendenciu vrátiť výšku na pôvodnú nulovú hodnotu, ale v porovnaní s klasickým autopilotom je tento dej veľmi pomalý. Pripomeňme, že v podobnom pokuse s klasickým autopilotom v kapitole 6.4.5 (strana 25) vzrástla výška síce na maximálnu hodnotu 35 metrov, ale po 50 sekundách sa vrátila do pôvodnej nulovej hodnoty.

12.2 Zachytenie a let v zostupnom paprsku

Klasický aj úsporný autopilot pre zachytenie a let v zostupnom paprsku boli skonštruované pre prácu s modelom lietadla linearizovaným pre rýchlosť $V_0 = 40$ m/s s odpojeným automatom ťahu.

Úsporný autopilot je citlivejší pri zachytení paprsku, úvodné vychýlenie je polovičné oproti použitiu s klasickým autopilotom (0,017° oproti 0,035°). Klasický autopilot potom približuje lietadlo k zostupnému paprsku rýchlejšie ako úsporný - od 50 sekundy je odchýlka trvalo menšia ako $1 \cdot 10^{-3\circ}$, zatiaľčo úsporný autopilot dosiahne túto hodnotu až v 100. sekunde[11].

Pri pôsobení vertikálneho poryvu vetra je úvodná výchylka systému s úsporným autopitom opäť polovičná oproti klasickému autopilotu, ktorý sa však potláča rušenie rýchlejšie.

[11] Hodnoty pre výšku pretnutia paprsku 950m

12.3 Možnosti ďalšieho štúdia úsporného autopilota

V diplomovej práci som rozobral prvky, ktoré sú v základnej výbave autopilota S-Tec System 55. Nepodarilo sa zatiaľ naštudovať let v zostupnom paprsku s filtrom normálového zrýchlenia s prenosom podľa vzorca 24. Táto štruktúra je zaujímavá, pretože tento derivátor by mohol priaznivo ovplyvniť dynamiku stabilizácie letu v zostupnom paprsku, ako sme pozorovali v prípade stabilizácie vertikálnej rýchlosti alebo výšky.

Rovnako možno pokračovať štúdiom a návrhom autopilota pre stranový pohyb lietadla - realizáciu koordinovanej zákruty, let v kurzovom majáku prostredníctvom výchylky krídelok δ_k.

A nakoniec je jedna verzia autopilota S-Tec System 55 schopná prijímať a pracovať so signálom družicového systému GPS. Zaujímavá by preto bola štúdia letu po zadanej trati s využitím tohto systému, ktorý udáva polohu v zemskej súradnicovej sústave.

Literatúra

[1] Pech, Z.; Věk, V.: *Systémy řízení letu.* České vysoké učení technické v Praze, Praha 2006, ISBN 8001033740.

[2] Žihla, Z.: *Automatické řízení letadel - Část 1 (Prozatimní učebnice).* Vojenská akademie Antonína Zápotockého, Brno 1987.

[3] *System 55 Autopilot, Pilot's operating handbook.* S-TEC Corporation, Mineral Wells Texas USA 1999.

[4] *S-TEC, System description.* S-TEC Corporation, Mineral Wells Texas USA.

[5] Stevens, B.,I.; Lewis, F.,L.: *Aircraft Control and Simulation.* John Wiley and Sons, Inc., N.Y. 1992, ISBN 0471613975.

[6] Rauw, M.: *FDC 1.2 - A Simulink Toolbox for Flight Dynamics and Control Analysis.* Holandsko, 2nd edition 10/05/2001.

Zoznam obrázkov

1 Základná štruktúra systému riadenia dynamiky lietadla 14
2 Bloková schéma autopilota pozdĺžneho pohybu 15
3 Geometrické miesto kořenov prenosu $F(s) = \frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$ 15
4 Porovnanie prechodových charakteristík pôvodného systému a lietadla s tlmičom 16
5 Geometrické miesto kořenov prenosu $F(s) = \frac{\alpha(s)}{\delta_V(s)}$ 17
6 Porovnanie prechodových charakteristík pôvodného systému a lietadla so stabilizátorom 17
7 Porovnanie prechodových charakteristík rôznych konfigurácií autopilota 18
8 Porovnanie prechodových charakteristík rôznych konfigurácií autopilota - detailné zobrazenie 19
9 Kinematická rovnica vertikálnej rýchlosti - norma GOST 20
10 Stabilizácia barometrickej výšky s klasickým autopilotom pozdĺžneho sklonu . . 21
11 GMK - Nastavenie tlmiča a autopilota pozdĺžneho sklonu pre stabilizáciu výšky 22
12 GMK stabilizácia vertikálnej rýchlosti 23
13 prechodová charakteristika $\dot{H}(s)/\dot{H}_1(s)$ 23
14 GMK stabilizácie barometrickej výšky a Prechodová charakteristika $H(s)/H_1(s)$ 24
15 Stabilizácia vertikálnej rýchlosti: $H(s)/U_Y(s)$ 24
16 $H(s)/H_1(s)$ a $V(s)/V_1(s)$ pri riadení rýchlosti 25
17 $H(s)/H_1$ pri odpojenom automate ťahu 25
18 Vplyv odpojenia automatu ťahu na priebeh stabilizácie rýchlosti 26
19 Let v zostupnej rovine - obrázok je prevzatý z knihy [1] 27
20 Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{v(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{v(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou 28
21 Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\alpha(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\alpha(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou 28
22 Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\vartheta(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\vartheta(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou 29

23 Porovnanie prechodových charakteristík $\frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_V(s)}$ a $\frac{\dot{\vartheta}(s)}{\delta_m(s)}$ lietadla pri lete cestovnou a približovacou rýchlosťou . . . 29
24 Schéma systému stabilizácie letu v zostupnom paprsku - klasický autopilot . . . 30
25 Detail bloku výpočtu kinematickej rovnice ε_{GS} - blok "let po zostupnom paprsku" 30
26 Nastavenie koeficientov $K_{\dot{\vartheta}}$ a K_{ϑ} autopilota pozdĺžneho sklonu pre let v zostupnom paprsku . . . 30
27 Výsledné GMK a prechodová charakteristika systému regulácie $\dot{\varepsilon_{GS}}$ . . . 31
28 GMK prenosu $\varepsilon_{GS}(s)/\varepsilon_{GS1}(s)$ regulácie odchýlky od zostupnej roviny . . . 31
29 Vývoj odchýlky ε_{GS} od momentu vletu do paprsku zostupného majáku až po dosiahnutie výšky rozhodnutia . . . 32
30 Vývoj odchýlky ε_{GS} pri lete v zostupnej rovine - v čase t=100s, strih vetra veľkosti 10 m/s . . . 32
31 Schéma prístrojového vybavenia autopilotu S-TEC System 55 - obrázok prevzatý z knihy [3] . . . 33
32 Kinematická rovnica vertikálnej rýchlosti . . . 36
33 Základná definícia vektorov sústavy pohybujúcej sa v inej sústave . . . 37
34 Schéma úsporného autopilota stabilizácie vertikálnej rýchlosti . . . 38
35 Prechodová charakteristika a GMK otvorenej sľučky $\dot{H}/\delta_V(s)$ . . . 39
36 GMK prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\delta_V(s)$ a nastavenie regulácie . . . 39
37 Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s tlmičom rýchleho pohybu 40
38 Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ so stabilizátorom $\dot{H}$ . . 41
39 Odpoveď systému stabilizácie vertikálnej rýchlosti na rušivý signál vertikálneho poryvu vetra U_Y . . . 41
40 GMK prenosu $a_n(s)/\delta_V(s)$ . . . 42
41 Prechodová charakteristika $\frac{a_n(s)}{\delta_V(s)}$ systému s regulátorom a_n . . . 43
42 Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s regulátorom a_n . . . 43
43 Prechodová charakteristika a GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ so stabilizátorom $\dot{H}$ a a_n 44
44 Odpoveď systému stabilizácie vertikálnej rýchlosti na rušivý signál vertikálneho poryvu vetra U_Y - systém s regulátorom a_n . . . 44
45 Prechodová charakteristika $\dot{H}/\delta_V$ so stabilizatorom VS a odpojeným automatom ťahu . . . 45
46 GMK prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\delta_V(s)$ s vyznačeným nastavením pre $K_{\dot{\vartheta}} = 1,73$ a tomu zodpovedajúca prechodová charakteristika - návrh bez automatu ťahu . . . 46
47 GMK prenosu $a_n(s)/\delta_V(s)$ a zodpovedajúca prechodová charakteristika - návrh bez automatu ťahu . . . 47
48 Prechodová charakteristika uzavretého systému "tlmič normálového zrýchlenia - lietadlo" - prenos $a_n(s)/\delta_V$ . . . 47
49 GMK prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ a prechodová charakteristika stabilizácie vertikálnej rýchlosti - návrh bez automatu ťahu . . . 48
50 Odolnosť stabilizátora vertikálnej rýchlosti na vertikálny poryv vetra - návrh bez automatu ťahu . . . 48
51 Schéma stabilizácie vertikálnej rýchlosti s výpočtom derivácie normálového zrýchlenia . . . 49
52 GMK prenosu $\dot{a_n}(s)/\delta_V(s)$ - celkový pohľad a detail . . . 50
53 Prechodové charakteristiky prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ s tlmičom rýchlych kmitov a tlmičom derivácie normálového zrýchlenia . . . 51
54 GMK prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ - celkový pohľad a detail . . . 51
55 Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe 52

56 Vplyv automatu ťahu na stabilizáciu vertikálnej rýchlosti 52
57 Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe - nastavenie s automatom ťahu 53
58 Schéma stabilizácie vertikálnej rýchlosti so spätnou väzbou od normálového zrýchlenia a jeho derivácie 54
59 Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe 55
60 Prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}/\delta_V(s)$ a potlačenie rušenia U_Y na výstupe - nastavenie s automatom ťahu 56
61 Schéma úsporného autopilota stabilizácie výšky 59
62 Vplyv stabilizácie vertikálnej rýchlosti na stabilizáciu výšky 60
63 Prechodová charakteristika a GMK prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ - nastavenie bez automatu ťahu 61
64 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a prechodová charakteristika prenosu $\dot{H}(s)/\delta_V(s)$ 62
65 Schopnosť potlačiť vertikálny poryv vetra pri rôznych konfiguráciách autopilota . 62
66 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra 63
67 GMK prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ celkové a detailné zobrazenie 63
68 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra 64
69 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra 65
70 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra 66
71 Prechodová charakteristika prenosu $H(s)/\delta_V(s)$ a odpoveď systému na rušenie vertikálnym poryvom vetra 67
72 Schéma úsporného systému automatického riadenia letu v zostupnom paprsku . 70
73 Detail bloku lietadla s tlmičom rýchlych kmitov v systéme úsporného autopilota GLIDESLOPE 71
74 Detail bloku výpočtu kinematickej rovnice ε_{GS} - blok LET PO ZOSTUPNOM PAPRSKU 71
75 Systém výpočtu premenného deliteľa 71
76 Rovnica výpočtu výšky 72
77 Nastavenie koeficientu $K_{\dot{\vartheta}}$ a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\dot{\vartheta}(s)/\dot{\vartheta}_+(s)$ 73
78 Nastavenie koeficientu K_{a_n} a výsledná prechodová charakteristika prenosu $a_{n1}(s)/a_{n0}(s)$ 74
79 GMK a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\dot{\varepsilon}_{GS1}(s)/\dot{\varepsilon}_{GS0}(s)$ 75
80 $\dot{\varepsilon}_{GS}$ - let v zostupnom paprsku: v čase t = 100s, strih vetra veľkosti 10 m/s . . . 75
81 GMK a výsledná prechodová charakteristika prenosu $\varepsilon_{GS}(s)/\varepsilon_{GS1}(s)$ 76
82 Priebeh výšky a detail zachytenia paprsku počas letu v GS 77
83 Vplyv poryvu vertikálneho vetra na let v zostupnom paprsku pomocou úsporného autopilota 77
84 Vplyv poryvu vetra na let v zostupnom paprsku - priebeh výšky 78
85 Let v zostupnom paprsku - priebeh ε_{GS} a výšky H 78
86 Zachytenie zostupného paprsku a detail vplyvu poryvu vertikálneho vetra na let v zostupnom paprsku - priebeh výšky 79
87 Priebeh výchylky výškovky počas letu v zostupnom paprsku 79
88 Priebeh δ_V - detail momentu zachytenia paprsku, potlačenie vertikálneho poryvu vetra 80

89 GMK prenosu $\varepsilon_{GS1}(s)/\varepsilon_{GS0}(s)$ 80
90 Charakteristika premenného deliteľa 81
91 Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na oblasť na medzi stability 81
92 Priebeh výšky - Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na let v blízkosti výšky rozhodnutia 82
93 Let v zostupnom paprsku bez premenného deliteľa a detail na let v blízkosti výšky rozhodnutia 82
94 Vplyv automatu ťahu: regulácia odchýlky ε_{GS} a regulácia rýchlosti v 83
95 Porovnanie prechodovej charakteristiky pre nastavenie úsporného autopilota z kapitoly 10.2.3 so zapnutým automatom ťahu a bez neho 84
96 Priebeh výšky uzavretého systému úsporný autopilot s AT - lietadlo pri nastavovaní rýchlosti 85

Zoznam tabuliek

1 Koeficienty pozdĺžneho pohybu lietadla 10
2 Koeficienty stranového pohybu lietadla 11
3 Poloha pólov - pôvodný systém 16
4 Poloha pólov - systém s tlmičom 16
5 Poloha pólov - systém so stabilizátorom 18
6 Porovnanie nastavenia a výsledkov stabilizátorov vertikálnej rýchlosti 45
7 Porovnanie nastavenia a výsledkov stabilizátorov vertikálnej rýchlosti v závislosti na zapojení automatu ťahu 49
8 Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor vertikálnej rýchlosti s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia 50
9 Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s automatom ťahu 53
10 Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s tlmičom normálového zrýchlenia a jeho derivácie 54
11 Nastavenie jednotlivých koeficientov spätných väzieb pre stabilizátor $\dot{H}$ s tlmičom normálového zrýchlenia a jeho derivácie - návrh s automatom ťahu 55
12 Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii vzdušnej rýchlosti $\dot{H}$ - návrhy bez automatu ťahu 56
13 Porovnanie charakteristík pri potlačení konštantného rušenia na výstupe - návrhy bez automatu ťahu 57
14 Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii vzdušnej rýchlosti $\dot{H}$ - návrhy s automatom ťahu 57
15 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia 60
16 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia - konfigurácia číslo 2 61
17 Nastavenie stabilizátora vertikálnej rýchlosti v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia 63
18 Nastavenie systému automatickej stabilizácie výšky 64
19 Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom normálového zrýchlenia . 65
20 Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia 66

21 Nastavenie stabilizátora výšky v konfigurácii s tlmičom derivácie normálového zrýchlenia a tlmičom normálového zrýchlenia 67
22 Porovnanie charakteristík jednotlivých autopilotov pri stabilizácii výšky H - návrhy bez automatu ťahu 67
23 Porovnanie charakteristík pri potlačení konštantného rušenia spôsobeného vertikálnym poryvom vetra - návrhy bez automatu ťahu 68
24 Porovnanie charakteristík rôznych konfigurácií stabilizátora barometrickej výšky - návrhy s automatom ťahu 68
25 Poloha pólov - pôvodný systém 73
26 Poloha pólov - systém s tlmičom 73
27 Poloha pólov - systém s tlmičom normálového zrýchlenia 74