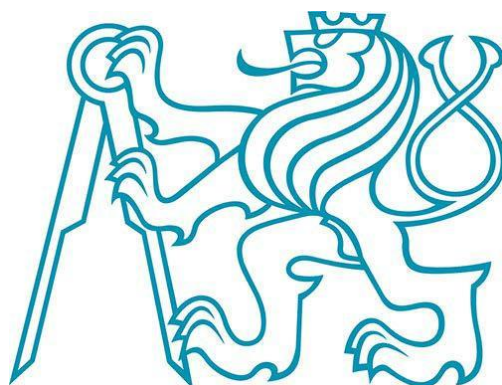


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

12122 Ústav letadlové techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rozbor přistání malého sportovního letounu

Autor: Inna Kaklyugina

Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kaklyugina** Jméno: **Inna** Osobní číslo: **408598**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Strojirenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Rozbor přistání malého sportovního letounu

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of a Small Sport Aircraft Landing

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Metodický popis přistání letounu
- 2) Sestavte postup výpočtu přistání letounu
- 3) Ověřte splnění požadavků na přistání vzorového letounu

Seznam doporučené literatury:

- Tichopád, V.: Letové výkony, ČVUT v Praze, Praha, 1984

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Brabec Ph.D., ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma “Rozbor přistání malého sportovního letounu” vypracovala samostatně. Veškerou literaturu a další zdroje, z nichž jsem při zpracování čerpala, v práci řádně cituji a jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

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:

.....
Inna Kaklyugina

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Jiřímu Brabcovi Ph.D. za všechny rady a připomínky v průběhu tvorby mé bakalářské práce.

Anotace

Jméno autora: Inna Kaklyugina

Název práce: Rozbor přistání malého sportovního letounu

Jazyk práce: Čeština

Akademický rok: 2016/2017

Škola: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta Strojní

Ústav: Ústav letadlové techniky

Program: Strojírenství

Obor: Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Klíčová slova: Přistávací manévr, metodika přistání, délka přistání, letové výkony

Anotace:

Předmětem této bakalářské práce je „Rozbor přistání malého sportovního letounu“, metodický popis přistání letounu, sestavení postupu výpočtu přistání letounu s ohledem na zadané parametry. Poslední část se zabývá ověřením splnění požadavků na přistání.

Annotation

Author: Inna Kaklyugina

Title of thesis: Analysis of a Small Sport Aircraft Landing

Language: Czech language

Academic year: 2016/2017

University: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Aerospace Engineering

Program: Mechanical Engineering

Field of study: Computer supported construction

Supervisor: Ing. Jiří Brabec Ph.D.

Key words: Landing maneuvers, aircraft landing methods, landing distance, flight performance

Annotation:

This paper examines and analyses the landing of a small sport Aircraft. The main object of this research is to create a comprehensive and methodical description of the aircraft landing procedure, and to establish an appropriate method of calculating the landing of the airplane with respect to specified parameters.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam obrázků..... | 9 |
| Seznam tabulek..... | 10 |
| Seznam příloh..... | 11 |
| Seznam zkratk..... | 12 |
| 1 Úvod | 13 |
| 2 Metodický postup přistání | 14 |
| 2.1 . Faktory ovlivňující přistání..... | 14 |
| 2.1.1 Hmotnost letadla | 14 |
| 2.1.2 Použití vztlakových klapek..... | 14 |
| 2.1.2.1 Vliv výchylky vztlakových klapek na délku přistání | 14 |
| 2.1.3 Atmosférické podmínky | 14 |
| 2.1.3.1 Teplota | 14 |
| 2.1.3.2 Vítr..... | 15 |
| 2.1.3.2.1 Vliv protivětru na délku přistání..... | 15 |
| 2.1.4 Vzletová a přistávací dráha (RWY)..... | 15 |
| 2.1.4.1 Délka RWY | 15 |
| 2.1.4.2 Použitelná délka přistání (LDA)..... | 15 |
| 2.1.4.3 Povrch RWY..... | 16 |
| 2.1.4.3.1 Kontaminace RWY..... | 16 |
| 2.1.4.3.2 Únosnost RWY..... | 17 |
| 2.1.4.4 Sklon dráhy..... | 17 |
| 2.2 Postupy provedení přistávacího manévru..... | 17 |
| 2.2.1 Přiblížení na přistání..... | 18 |
| 3 Postup stanovení délky přistání..... | 20 |
| 3.1 Fáze přistání..... | 20 |
| 3.1.1 Klouzání..... | 20 |
| 3.1.1.1 Mechanika klouzavého letu | 21 |
| 3.1.2 Přejížděcí oblouk | 25 |
| 3.1.2.1 Vztahy pro výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přejížděcího oblouku..... | 25 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.3 Výdrž..... | 28 |
| 3.1.3.1 Vztahy pro výpočet potřebné délky ve fázi výdrže..... | 28 |
| 3.1.4 Dosednutí a průběh dojezdu | 30 |
| 3.1.4.1 Dosednutí letadla a průběh dojezdu se zád'ovým podvozkem..... | 30 |
| 3.1.4.2 Vztahy pro výpočet dojezdu letadla se zád'ovým podvozkem | 31 |
| 4 Ověření splnění požadavků na přistání vzorového letounu..... | 33 |
| 4.1 Požadavky..... | 33 |
| 4.2 Letové výkony..... | 33 |
| 4.2.1 Návrhové rychlosti | 34 |
| 4.2.2 Základní charakteristiky klouzavého letu za předpokladu parabolického tvaru aerodynamické poláry..... | 34 |
| 4.2.3 Klouzací poměr..... | 36 |
| 4.2.4 Úhel klouzání | 38 |
| 4.2.5 Rychlostní polára v klouzavém letu | 39 |
| 4.3 Určení výchozí délky přistání | 41 |
| 4.3.1 Výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přechodového oblouku..... | 41 |
| 4.3.2 Výpočet potřebné délky ve fázi výdrže. | 43 |
| 4.3.3 Výpočet pozemní části přistání | 43 |
| 4.3.4 Celková délka přistání..... | 46 |
| 5 Závěr | 49 |
| Seznam použité literatury..... | 50 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 2.1 Schéma přiblížení okruhem [6]..... | 18 |
| Obr. 2.2 Schéma leteckého okruhu [11]..... | 19 |
| Obr. 3.1 Fáze přistání [1] | 20 |
| Obr. 3.2 Schéma sil působících na letadlo při klouzavém letu [2] | 21 |
| Obr. 3.3 Stanovení úhlu klouzání z aerodynamické poláry letadla [2]..... | 23 |
| Obr. 3.4 Určení základních charakteristik klouzavého letu z aerodynamické poláry [2]..... | 24 |
| Obr. 3.5 Schéma fáze klouzání a přechodového oblouku [2]..... | 25 |
| Obr. 3.6 Princip konstrukce letadla se zádovým podvozkem [10] | 30 |
| Obr. 3.7 Schéma sil působících na letadlo při dojezdu [2] | 31 |
| Obr. 3.8 Schéma zobrazení maximální použitelného součinitelů tření při dojezdu letadla se zádovým podvozkem [2]..... | 31 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 2.1 Vztah mezi součinitelem valivého tření podvozkových kol μ a různými druhy povrchu RWY [2]..... | 16 |
| Tab. 2.2 Vztah mezi koeficientem tření a předpokládanými brzdnými účinky [5].... | 17 |
| Tab. 3.1 Vztah mezi efektivním součinitelem tření μ' a typem podvozku [2]..... | 32 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Výsledná tabulka hodnot pro přistání sportovního letounu bez použití vztlakových klapek 0°

Příloha č. 2: Výsledná tabulka hodnot pro přistání sportovního letounu s výchylnou vztlakových klapek 35°

SEZNAM ZKRATEK

| Zkratka | Význam | Český ekvivalent |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| AIP | Aeronautical Information Publication | Letecká informační příručka |
| IAS | Indicated Air Speed | Indikovaná vzdušná rychlost |
| LD | Landing Distance | Délka přistání |
| LDA | Landing Distance Available | Použitelná délka přistání |
| LDR | Landing Distance Required | Potřebná délka pro přistání |
| PAPI | Precision Approach Path Indication | Světelná sestupová soustava |
| TAS | True Air Speed | Pravá vzdušná rychlost |
| VASI | Visual Approach Slope Indicator | Světelná sestupová soustava |
| VMS | Visual Meteorological Conditions | Vizuální meteorologické podmínky |
| RWY | Runway | Vzletová a přistávací dráha (VPD) |

1 Úvod

Cílem této práce je rozbor přistávacího manévru, problematiky mechaniky letu. Přistávacím manévrem končí každý úspěšný let a v závislosti na okolních podmínkách může pro každého pilota představovat větší nebo menší výzvu. Právě z tohoto důvodu se až 40 % leteckých nehod způsobených pilotem odehraje v této fázi letu.

Z toho důvodu, že každé přistání probíhá v jiných podmínkách, jsou v první části této práce uvedeny faktory, které mají vliv na provedení přistávacího manévru. V následující části jsou shrnuty obecné a metodicky správné postupy pro přistávací manévry.

Teoretický popis základních problémů letových výkonů je popsán na základě aktualizovaných požadavků evropských předpisů. Další informace byly čerpány z místních i světových publikací pro výcvik pilotů. K řadě probíraných problematik jsou připojeny řešené příklady s ilustracemi. Při volbě označení použitých veličin je respektováno doporučení normy ČSN 31 201 pro mechaniku letu. Důsledně je používán systém jednotek SI.

Na základě metodického popisu byl sestaven postup výpočtu přistání letounu. Ve výpočtu byla sestrojena rychlostní polára v klouzavém letu. Přistání letounu je stanoveno pro nastavení klapek v přistávací poloze 35° a bez použití vztlakových klapek 0° . Výška překážky, které se je nutné při přistání vyhnout, byla uvažována na $h = 15$ m. Výpočet pozemní části přistání byl proveden za předpokladu dosednutí letadla na beton, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$ a na rovný krátce střížený trávník, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$.

Poslední část práce je zaměřena na ověření a splnění požadavků na přistání vzorového letounu v přistávací konfiguraci se vztlakovými klapkami nastavenými na 35° .

2 Metodický postup přistání

2.1 Faktory ovlivňující přistání

Přistání je ovlivněno mnoha faktory, které mají významný vliv na bezpečnost a na volbu vhodného typu přistání pro konkrétní letadlo. Tyto faktory jsou popsány v následných podkapitolách.

2.1.1 Hmotnost letadla

Při zvyšování hmotnosti letadla se prodlužuje délka přistání a zvyšuje jeho přistávací rychlost, proto každý typ letadla má výrobcem stanovenou maximální přistávací hmotnost s ohledem na konstrukční omezení a namáhání podvozku letadla. Tato hmotnost nesmí být překročena ani v případě, pokud má letadlo maximální vzletovou hmotnost vyšší než přistávací (platí spíše u dopravních letadel) a potřebuje krátce po vzletu přistát. Z tohoto důvodu piloti vypouští palivo z letadla nad vymezeným prostorem.

2.1.2 Použití vztlakových klapek

Vztlakové klapky se před přistáním vysunují směrem dolů do přistávací polohy a tím zvyšují vztlak křídel. To umožňuje letadlu letět pomaleji a přistát se sníženou rychlostí a kratší přistávací délkou. Vychýlení klapek při přistání je maximální možné. Při přistání v silném větru je pro lepší říditelnost letadla doporučeno používat menší výchylky.[3]

Pokud se vztlakové klapky při přistání nevysunou, délka přistání se může zvětšit o 40 %. [6]

2.1.2.1 Vliv výchylky vztlakových klapek na délku přistání

Vztlakové klapky zvyšují maximální součinitel vztlaku c_L a součinitel odporu c_D a snižují rychlost letu $V_{\min} = V_{s0}$ (kde V_{s0} = pádová rychlost s motory na volnoběh v přistávací konfiguraci [m/s]). Díky tomuto, se sníží rychlost, jak v jednotlivých fázích přistání, tak i po celou přistávací délku.[2]

2.1.3 Atmosférické podmínky

Atmosférické podmínky, které mají vliv na přistání jsou především teplota a vítr.

2.1.3.1 Teplota

S rostoucí teplotou klesá hustota vzduchu. Pokles hustoty vzduchu způsobuje růst vzdušné rychlosti – TAS, která má vliv na prodloužení potřebné délky pro přistání. Indikovaná rychlost – IAS zůstává stejná. U sportovních letadel je na rozdíl od dopravních letadel prodloužení vzdálenosti přistání zanedbatelné.

2.1.3.2 Vítr

Významnými faktory při přistání je směr a rychlost větru. Protivítr zkracuje délku přistání. Velikost rychlosti přistání se sníží o hodnotu složky rychlosti protivětru. Naopak zadní vítr nebo jeho složka prodlužují délku přistání a navyšuje se i rychlost přistání. Boční vítr má minimální vliv na vzdálenost přistání. Kromě toho vítr působí na snížení říditelnosti letadla, kvůli tomu jsou pro všechny typy letadel výrobcem určené limitní rychlostní složek větru.

2.1.3.2.1 Vliv protivětru na délku přistání

Jak již bylo řečeno, vítr nebo konkrétně protivítr má významný vliv na délku RWY, proto je jeho začlenění do výpočtů pro přistávací fázi probíhající ve vzduchu nezbytné [2, Tichopád, V., str. 92].

$$(s_1 + s_2 + s_3)_{w \neq 0} = (s_1 + s_2 + s_3)_{w=0} - w(t_1 + t_2 + t_3) \quad (2.1)$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m], s_3 = vzdálenost dobrzdování letadla při letu těsně nad zemí [m],
 t_1, t_2, t_3 = doba letu v jednotlivých fázích [s]

Doby t_1 [s], t_2 [s], t_3 [s] se nemění.

Pro dojezd platí [2, Tichopád, V., str. 93]:

$$s_4 = m \int_{V_P}^w \frac{d(v^2)}{2R_t} - mw \int_{V_P}^w \frac{dv}{R_t} = \frac{1}{2} m \int_{V_P}^w \frac{d(v^2)}{R_t} - wt_4 \quad (2.2)$$

kde: s_4 = vzdálenost při dojezdu [m], m = hmotnost letadla [kg],
 V_P = rychlost dosednutí [m/s], V = rychlost letu [m/s],
 R_t = tečná zrychlující síla [N], t_4 = doba dojezdu [s]

2.1.4 Vzletová a přistávací dráha (RWY)

Parametry RWY, které mají vliv na výkon při přistání, jsou především jejich délka, sklon a povrch.

2.1.4.1 Délka RWY

Přistávací délka je limitující faktor a před přiletem musí pilot stanovit schopnost přistání za daných podmínek. Je nezbytné, aby délka přistání nepřekročila hodnotu použitelné délky přistání LDA, která je stanovena pro každé letiště a nachází se v letecké informační příručce – AIP.

2.1.4.2 Použitelná délka přistání (LDA)

LDA je délka dráhy, která je prohlášena za použitelnou a vhodnou pro dosednutí a dojezd přistávajícího letadla. [1]

2.1.4.3 Povrch RWY

Povrch RWY ovlivňuje také délku přistání a proto musí být vybudována bez nerovností, které by mohly zhoršit třecí koeficient a mít vliv na vzlet nebo přistání letadla. Hlavní kritéria povrchu je kontaminace a únosnost dráhy.

2.1.4.3.1 Kontaminace RWY

Jde o kontaminování dráhy sněhem popřípadě ledem nebo vodou. Tření mezi dráhou a pneumatikou letadla je hlavním kritériem kontaminované dráhy. Působením přírodních jevů se tření snižuje a to má vliv na prodloužení délky dojezdu a přistávací délky.

Například suchá tráva o výšce do 5 cm prodlužuje délku přistání o 5 %, suchá tráva o výšce od 5 do 10 cm prodlužuje délku přistání o 15 %, suchá tráva o výšce nad 10 cm prodlužuje délku přistání přibližně o 25 %, mokrá tráva ještě zvýší délku přistání o 10 %, sníh prodlouží délku přistání minimálně o 25 %.

Při kontaminaci povrchu vodou o vrstvě více než 2-3 mm může vzniknout jev aquaplaningu. Příčinou toho jevu je neschopnost drážek ve vzorku pneumatiky dostatečnou rychlostí odvádět vodu. Při aquaplaningu letadlo jenom klouže po vrstvě vody. Tento jev se projeví na rychlosti, kterou lze vypočítat pomocí vzorce 2.1 [6, Starikov, Ju. N., Behtir, V.P., str. 69]. Délka přistání zvětší o dalších 50-70 % [1],[6]

$$v = 62 \cdot \sqrt{p} \quad (2.3)$$

kde: v = rychlost akvaplaningu [kts], p = tlak v pneumatice [PSI]

Každému typu povrchu RWY přísluší hodnoty součinitelů valivého tření podvozkových kol μ . (tab. 2.1):

| Druhy povrchu | Součinitel valivého tření podvozkových kol μ |
|------------------------------------|---|
| Beton | 0,01 až 0,03 |
| Tvrdá travnatá plocha | 0,02 až 0,05 |
| Měkčí travnatá plocha, delší tráva | 0,05 až 0,07 |
| Měkká půda | 0,01 a více |

Tab. 2.1: Vztah mezi součinitelem valivého tření podvozkových kol μ a různými povrchy RWY [2]

Pilot při přistání na RWY musí znát vztah mezi koeficientem tření a předpokládanými brzdnými účinky. Dále je jako příklad přiložena tab. 2.2, ve které popsány termíny pro koeficienty na základě údajů o tření získaných pouze na uježděném sněhu a ledu. Tyto hodnoty nelze přijímat za absolutní a použitelné za každých podmínek. [5]

| Změřený koeficient | Odhad povrchového tření | Kód |
|--------------------|-------------------------|-----|
| 0,40 a více | <i>Dobré</i> | 5 |
| 0,39 - 0,36 | <i>Střední/dobré</i> | 4 |
| 0,35 – 0,30 | <i>Střední</i> | 3 |
| 0,29 – 0,26 | <i>Střední/špatné</i> | 2 |
| 0,25 a méně | <i>Špatné</i> | 1 |

Tab. 2.2: Vztah mezi koeficientem tření a předpokládanými brzdnými účinky [5]

Pokud je odhad povrchového tření ohlášen jako "dobrý", nemusí být podmínky ideální a dráha může být pokryta sněhem nebo ledem, takže se podmínky mohou velice lišit od stavu suché dráhy. Hodnota "dobré" slouží pouze k porovnání a znamená, že letadlo nebude mít potíže při přistávání.

2.1.4.3.2 Únosnost RWY

Únosnost se týká hlavně nezpevněných drah a má vliv na délku přistání. Platí, že při nízké únosnosti se délka přistání zkracuje vzhledem k zvětšenému valivému odporu kol.

Únosnost RWY musí odpovídat provozu letadel, na které je určena. Aby nedošlo k zaboření letounu, stanovují výrobci minimální únosnost povrchu pro každý druh letadla.

2.1.4.4 Sklon dráhy

Sklon dráhy se nachází v letecké informační příručce – AIP. Platí, že při kladném (klesání ve směru dojezdu) sklonu dráhy se délka přistání prodlužuje a záporný sklon bude délku zkracovat. Například, kladný sklon o velikosti 2 % prodlouží délku přistání přibližně o 10 % [6].

2.2 Postupy provedení přistávacího manévru

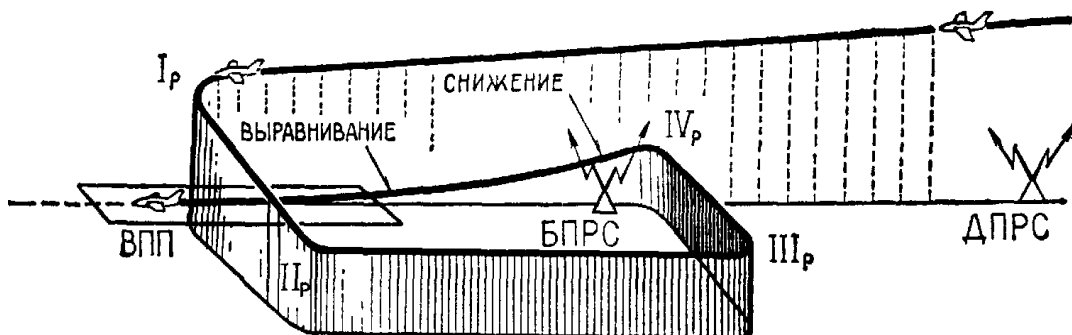
Tato kapitola popisuje postupy provedení přistávacích manévru za rozličných podmínek. Metodiky a odpovídající postupy jsou poměrně shodné na celém světě a záleží na konkrétním typu letadla.

2.2.1 Přiblížení na přistání

Přiblížení patří k části okruhu, která obsahuje 3. a 4. okruhovou zatáčku a je prvním krokem k bezpečnému přistání. Pro přiblížení na přistání je důležitá 3. zatáčka. Umístění 3. zatáčky je stanoveno letištním řádem nebo pilotem, pokud bude mít práh dráhy zhruba 45 za sebou, má ji sám začít. Během 3. zatáčky a dále, je třeba udržovat okruhovou výšku. Po dotočení třetí zatáčky je potřeba snížit výkon motorů a poddajným přitažením zpomalit na rychlost, při které je povoleno vysunutí vztlakových klapek. V poloze "base leg" mezi 3. a 4. zatáčkou je nutno provádět klesání tak, aby po dotočení 4. zatáčky výška nad přistávací drahou byla přibližně 500 ft. [8]

Po dotočení finální polohy "final leg" je nutné vysunout vztlakové klapky do potřebné polohy pro přistání. Při přiblížení na přistání se silným nebo bočním větrem je lepší provádět přistávací manévry s menším vysunutím vztlakových klapek. Při přiblížení s mírným větrem nebo bezvětří je naopak lepší provádět přistání s vztlakovými klapkami vysunutými na větší úhel a tím zvětšit aerodynamický odpor, díky čemuž zmenší potřebná délka RWY.

Z pravidla po 4. zatáčce letadlo směřuje, přímo na přistávací dráhu. Po dosažení výšky 50 m je možná upravit směr sestupu, výšky letu a vysunutí vztlakových klapek. Pokud letadlo nebude na ose sestupu v této výšce, je nutno opakovat přiblížení. Jde o přerušování přistání a tím pádem je potřeba provést přiblížení okruhem (Obr. 2.1).

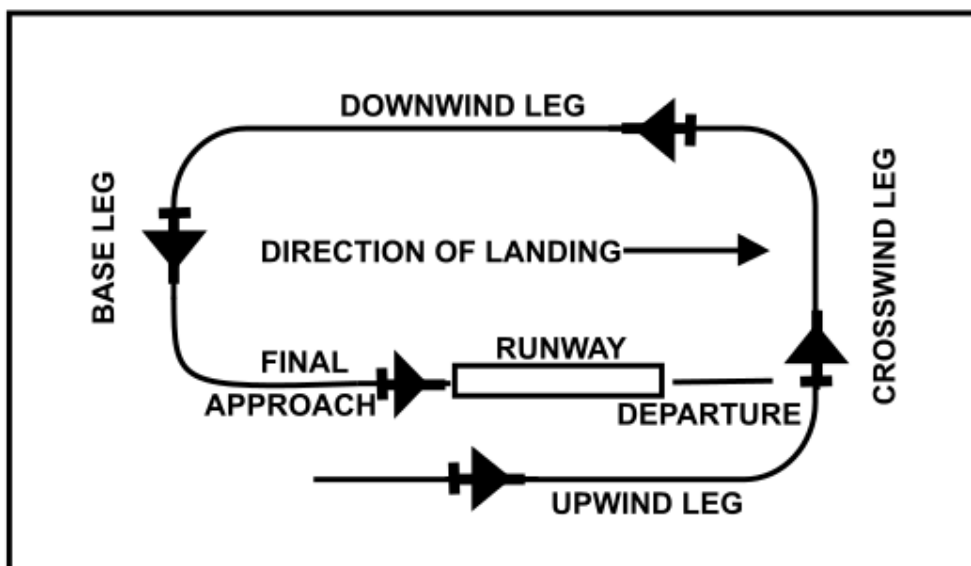


Obr. 2.1 Schéma přiblížení okruhem [6]

Přiblížení okruhem je vizuální letový manévry. Letištní okruh má tvar obdélníku, podle jehož trajektorie se letadlo pohybuje kolem letiště. Každé přiblížení je odlišné vzhledem k proměnným, jako je poloha dráhy, směr konečného přiblížení, rychlost větru a meteorologickým podmínkám. Z tohoto důvodu neexistuje jediný vhodný postup pro provedení vizuálního letového manévru.

Po získání počátečního vizuálního kontaktu je základním předpokladem, aby okolí dráhy bylo udržováno v dohledu, zatímco je letadlo v minimální nadmořské výšce/výšce pro klesání (MDA/H) a pro přiblížení okruhem. Okolí dráhy zahrnuje objekty jako je práh dráhy, přiblížovací světelná zařízení nebo jiné značení, které je možno identifikovat jako příslušící k dráze.[7]

Okruh ve své střední části má vzletovou a přistávací dráhu (Obr. 2.2). Z VPD letadlo po startu vystoupá do okružové výšky a vytočí 1. zatáčku „*crosswind leg*“, tím pádem letadlo pokračuje let po kratší straně obdélníka. Dále po zatočení 2. zatáčky „*downwind leg*“, se letadlo pohybuje v poloze po větru a letí proti směru vzletu, souběžně s vzletovou a přistávací dráhou. Po 3. zatáčce se letadlo nachází v poloze „*base leg*“. Po zatočení 4. zatáčky se dostane zpět do směru RWY a to je finální část „*final leg*“. [8],[11]



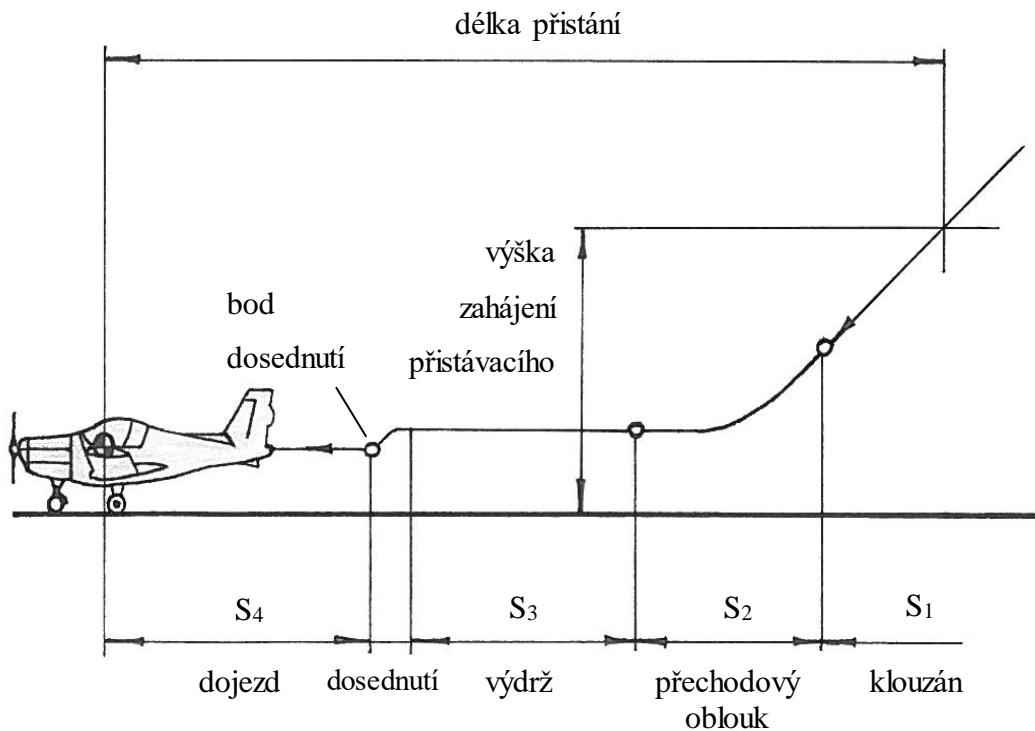
Obr. 2.2 Schéma leteckého okruhu [11]

3 Postup stanovení délky přistání

3.1 Fáze přistání

Přistání je manévr, který začíná ve výšce 15 m/50 ft nebo 25 m/80 ft nad přistávací drahou a končí úplným zastavením letadla na přistávací dráze (Obr. 3.1). Délku přistání teoreticky rozdělujeme do pěti fází:

1. klouzání z výšky HSOL= 15 m/50 ft nebo 25 m/80 ft
2. přechodový oblouk
3. výdrž
4. dosednutí letadla
5. dojezd [1]



Obr. 3.1 Fáze přistání [1]

3.1.1 Klouzání

Pod pojmem klouzavý let se rozumí, přímočarý ustálený let v rovině souměrnosti letadla s konstantním úhlem náběhu a s nulovým tahem pohonných jednotek.

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, přistávací manévr začíná 4. okružovou zatáčkou ve výšce 15 m/50 ft nebo 25 m/80 ft. [1]

Letadlo letí s vysunutým podvozkem předepsanou konstantní rychlostí. Tato rychlost závisí na vysunutí vzlakových a brzdících klapkách, které jsou základním prostředkem pro přesnější přistání.

Pro letadlo v přistávací konfiguraci, je podle předpisů BCAR a NLGS rychlost přiblížení na přistání stanovena hodnota [2, Tichopád, V., str. 87]:

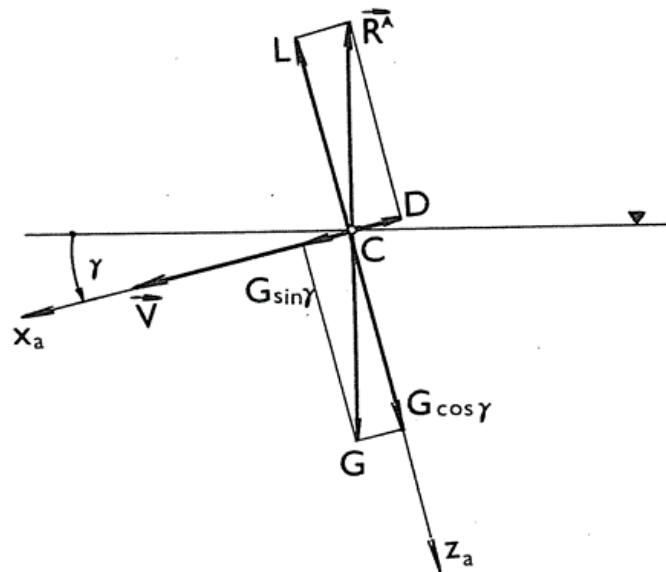
$$V_{zp} \geq 1,3V_{min} = 1,3V_{s0} \quad (3.1)$$

kde: je V_{s0} pádová rychlost s motory na volnoběh v přistávací konfiguraci [m/s]

Pilot musí nastavit výkon motoru tak, aby letadlo dodržovalo předepsanou rychlost a úhel sestupu. Při menší rychlosti vzniká nebezpečí pádu, při větší rychlosti se zbytečně prodlužuje délka přistání. [1]

3.1.1.1 Mechanika klouzavého letu

Při ustáleném přímočarém klouzavém letu bude na letadlo působit tíhová síla \vec{G} [N] a aerodynamická síla draku \vec{R}^A [N]. Tato aerodynamická síla draku má dvě složky v souřadnicové soustavě: aerodynamický odpor draku D [N] a aerodynamický vztlak draku L [N]. Síla tření T [N] je převyšována dopřemnou složkou tíhové síly $G \sin \gamma$ (Obr.3.2). [2]



Obr. 3.2 Schéma sil působících na letadlo při klouzavém letu [2]

Z obr. 3.2 vyplývá rovnice rovnováhy pro klouzavý let: [2, Tichopád, V., str. 17]:

$$D + G \sin \gamma_a = 0 \quad (3.2 a)$$

$$L - G \cos \gamma_a = 0 \quad (3.2 b)$$

kde: D = aerodynamický odpor draku [N], L = aerodynamický vztlak draku [N],
 G = tíhová síla [N], γ_a = aerodynamický podélný sklon [rad]

Obyčejný aerodynamický podélný sklon γ_a [rad] je nahrazován úhlem klouzání γ [rad] podle vztahu [2, Tichopád, V., str. 17]:

$$\gamma = -\gamma_a \quad (3.3)$$

Z toho vyplývá, že rovnice rovnováhy klouzavého letu budou mít tvar: [2, Tichopád, V., str. 17]:

$$D - G \sin\gamma_a = 0 \quad (3.4 a)$$

$$L - G \cos\gamma_a = 0 \quad (3.4 b)$$

kde: D = aerodynamický odpor draku [N], L = aerodynamický vztlak draku [N],
 G = tíhová síla [N], γ_a = aerodynamický podélný sklon [rad]

Pro výpočet úhlu klouzání γ [rad] a rychlosti letu při klouzání V [m/s] je potřeba aerodynamický odpor draku D [N] a aerodynamický vztlak draku L [N] vyjádřit pomocí aerodynamických součinitelů: [2, Tichopád, V., str. 17]:

$$D = c_D \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (3.5 a)$$

$$L = c_L \frac{1}{2} \rho V^2 S \quad (3.5 b)$$

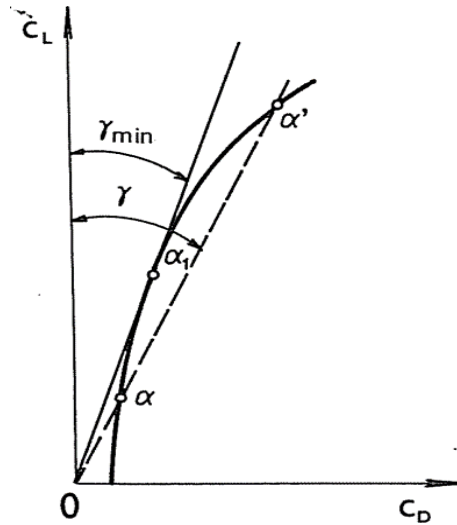
kde: D = aerodynamický odpor draku [N], L = aerodynamický vztlak draku [N],
 c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vztlaku, V = rychlost letu při klouzání [m/s],
 ρ = hustota (měrná hmotnost) vzduchu [kg/m³], S = plocha křídla [m²]

Dělením rovnice (3.4 a) a (3.4 b) dostaneme: [2, Tichopád, V., str. 18]:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{c_D}{c_L} \quad (3.6 a)$$

kde γ = úhel klouzání [rad], c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vztlaku

Úhel klouzání γ [rad] nezávisí na hmotnosti letadla m [kg] a na ploše křídla S [m²], závisí pouze na aerodynamických charakteristikách letadla. Úhel klouzání γ [rad] je možno určit přímo z aerodynamické poláry letadla (obr. 3.3). [2]



Obr. 3.3 Stanovení úhlu klouzání z aerodynamické poláry letadla [2]

Z obr. 3.3 je možné vypočítat, že lze klouzat při dvou různých úhlech náběhu α [rad] a α' [rad] pod stejným úhlem klouzání γ [rad]. V bodě dotyku tečny vedené z počátku k poláře, bude mít úhel klouzání γ [rad] minimální hodnotu γ_{min} [rad], kterou letadlo může dosáhnout. [2, Tichopád, V., str. 18]:

$$\operatorname{tg} \gamma_{min} = \left(\frac{c_D}{c_L} \right)_{min} \quad (3.6 \text{ b})$$

kde: γ_{min} = nejmenší úhel klouzání [rad], c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vzlaku

Dotykový bod tečny dělí poláru na dvě oblasti. Ze spodní části obr. 3.3 je možné vypočítat, že čím bude větší úhel náběhu α [rad], tím menší bude úhel klouzání γ [rad], rychlost klouzání V [m/s] i rychlost klesání V_k [m/s]. V části nad dotykovým bodem tečny se s rostoucím úhlem náběhu α [rad] zmenšuje pouze rychlost klouzání V [m/s], nicméně úhel klouzání γ [rad] a rychlost klesání V_k [m/s] rostou.

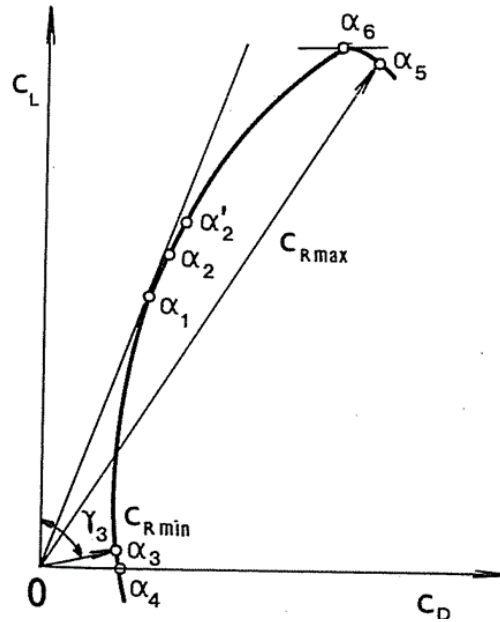
Rychlost klouzání V [m/s] závisí na aerodynamických charakteristikách, jako jsou, plošné zatížení křídla G/S [N/m²] a hustota vzduchu ρ [kg/m³] [2, Tichopád, V., str. 19]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{c_L^2 + c_D^2} \frac{G^2}{S \rho}} \quad (3.7)$$

kde: V = rychlost letu při klouzání [m/s], G = tíhová síla [N],
 S = plocha křídla [m²] c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vzlaku, ρ = hustota (měrná hmotnost) vzduchu [kg/m³]

Rychlost letadla při klouzavém letu V [m/s] je přímo úměrná druhé odmocnině plošného zatížení křídla G/S [N/m²] a nepřímo úměrná druhé odmocnině hustoty vzduchu ρ [kg/m³] a druhé odmocnině součinitele výsledné aerodynamické síly $c_R = \sqrt{c_L^2 + c_D^2}$. Součinitel c_R pro určitý úhel náběhu α [rad] je určen spojnicí bodu na poláře s počátkem, průvodičem aerodynamické poláry letadla. [2]

Největší rychlost při klouzavém letu může být určena z rovnice (3.7), kde úhel náběhu α [rad] bude takový, aby výsledný součinitel aerodynamické síly c_R byl minimální. Tento úhel náběhu α_3 [rad] je určen místem dotyku kružnice o poloměru c_{Rmin} (obr. 3.4). Nejčastěji mají aerodynamické poláry úhel klouzání γ_3 přibližně 90°. [2]



Obr. 3.4 Určení základních charakteristik klouzavého letu z aerodynamické poláry [2]

Nejmenší rychlost klouzavého letu bude určena rovnicí (3.7), kdy úhel náběhu α [rad] bude takový, že výsledný součinitel aerodynamické síly c_R bude maximální. Tento úhel náběhu α_R [rad] je určen místem dotyku kružnice o poloměru c_{Rmax} (obr. 3.4). V bodě α_R [rad], součinitel vzlaku c_L má maximální hodnotu a leží za kritickým úhlem náběhu α_6 [rad]. Při úhlu náběhu α_6 [rad] bude dosažena nejmenší rychlost klouzavého letu. To znamená, že čím je hodnota rychlosti blíže k této hodnotě, tím přitažení letadla bude nebezpečnější a při překročení α_6 [rad] bude následovat ztráta vzlaku c_L .

Svislou složkou rychlosti při klouzavém letu je klesací rychlost, která určuje rychlost, jakou se letadlo blíží k zemi [2, Tichopád, V., str. 20]:

$$V_k = \frac{c_D}{(c_L^2 + c_D^2)^{3/4}} \sqrt{\frac{G}{S \rho}} \quad (3.8)$$

kde: V_k = klesací rychlosti letu při klouzání [m/s], c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vzlaku, ρ = hustota (měrná hmotnost) vzduchu [kg/m³], G = tíhová síla [N], S = plocha křídla [m²]

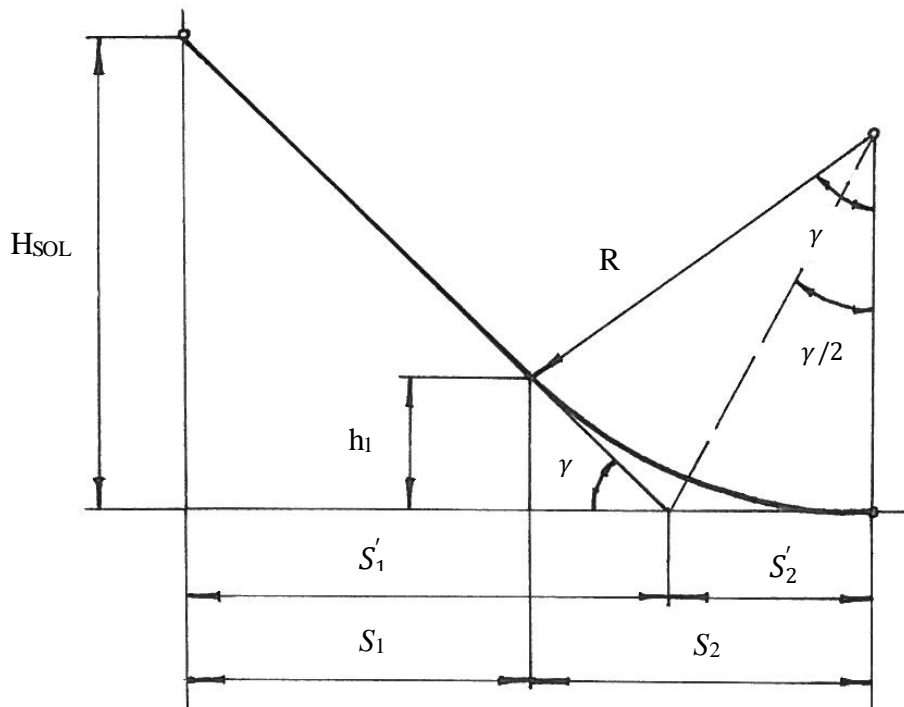
Klesací rychlost letu při klouzání V_K [m/s] je přímo úměrná výrazu $c_D/c_R^{3/2}$, druhé odmocnině z plošného zatížení křídla G/S [N/m²] a nepřímo úměrná druhé odmocnině hustoty vzduchu ρ [kg/m³]. Minimální klesací rychlost klouzavého letu bude při takovém úhlu náběhu α [rad], při kterém bude výraz $c_D/c_R^{3/2}$ minimální. Na aerodynamické poláře je to úhel náběhu α_2 [rad] (obr. 3.4). V tomto místě je možno předpokládat, že $c_R \cong c_L$. Na aerodynamické poláře vždy leží body α_2 [rad], α_2' [rad] nad bodem α_1 [rad], kvůli nejmenšímu sklonu dráhy letu γ_{min} [rad].

3.1.2 Přechodový oblouk

Přechodový oblouk je přechod z klouzání do vodorovného letu rovnoběžného se zemí. Počátek přechodového oblouku závisí na rychlosti letadla a velikosti větru. Motor je zpravidla na volnoběžných otáčkách. Obvykle tento přechod začíná ve výšce 5-7 m a končí ve výšce 0,5 m až 1 m nad plochou, kde bude mít letadlo přibližně nulovou vertikální rychlost a bude snižovat dopřednou rychlost. [1]

3.1.2.1 Vztahy pro výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přechodového oblouku

Při výpočtu je potřeba uvažovat vliv aerodynamických charakteristik letadla při vysunutém podvozku a vztakových klapkách. Výška překážky H_{SOL} zpravidla bývá stanovena výškou $H_{SOL} = 15$ [m]. Výška h_1 signalizuje ukončení klouzavého letu a přechod do fáze přechodového oblouku s poloměrem dráhy letu R [m] (obr. 3.5). [2]



Obr. 3.5 Schéma fáze klouzání a přechodového oblouku [2]

Vzdálenost při klouzání na přistání s_1 [m] je dána vztahem [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$s_1 = (15 - h_1) \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \quad (3.9 \text{ a})$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], h_1 = výška přechodového oblouku [m],
 γ = úhel klouzání [rad]

Výška h_1 [m] z rovnice (3.9 a) je určena počátkem přechodového oblouku [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$h_1 = (R - R \cos \gamma) = R(1 - \cos \gamma) \quad (3.9 \text{ b})$$

kde: h_1 = výška přechodového oblouku [m], R = poloměr dráhy letu [m],
 γ = úhel klouzání [rad]

Vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku s_2 [m] je určena dle obr. 3.5 [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$s_2 = R \sin \gamma \quad (3.10)$$

kde: s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m],
 R = poloměr dráhy letu [m], γ = úhel klouzání [rad]

Vzdálenost při klouzání na přistání s_1 [m] a vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku s_2 [m] jsou pak [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$s_1 + s_2 = (15 - h_1) \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} + R \sin \gamma = [15 - R(1 - \cos \gamma)] \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} + R \sin \gamma \quad (3.11 \text{ a})$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m],
 h_1 = výška přechodového oblouku [m], γ = úhel klouzání [rad],
 R = poloměr dráhy letu [m]

Jednodušší vyraz pro určení vzdálenosti při klouzání na přistání s_1 [m] a vodorovné vzdálenosti po kruhovém oblouku s_2 [m] je určen podle obr. 3.5 [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$s_1 + s_2 = s'_1 + s'_2 = \frac{15}{\operatorname{tg} \gamma} + R \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \quad (3.11 \text{ b})$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m], γ = úhel klouzání [rad], R = poloměr dráhy letu [m]

Pro $\operatorname{tg} \gamma \cong \gamma$ [2, Tichopád, V., str. 88]:

$$s_1 + s_2 \cong \frac{15}{\gamma} + \frac{R}{2} \gamma \quad (3.11 \text{ c})$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m], γ = úhel klouzání [rad], R = poloměr dráhy letu [m]

Konstantní rychlosti letu V_{min} [m/s] minimálním poloměrem R [m] oblouku náleží součinitel vztlaku c_{Lmax} . Vyraz pro poloměr přechodového oblouku má tvar [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$R = \frac{v_{min}^2 V_1^2}{g(V_1^2 - v_{min}^2)} = \frac{v_{min}^2}{g} \frac{1}{(1 - v_{min}^2/V_1^2)} \quad (3.12 \text{ a})$$

kde: R = poloměr dráhy letu [m], g = tíhové zrychlení [m/s^2] ($g = 9,81[m/s^2]$),
 V_{min} = rychlost letu [m/s], V_1 = rychlost rozhodnutí [m/s]

Pro zadané číselné hodnoty $V_1/V_{min} = 1,3$ a $g = 9,81[m/s^2]$, pak vzorec pro určení vzdálenosti při klouzání na přistání s_1 [m] a vodorovné vzdálenosti po kruhovému oblouku s_2 [m] nabývá tvaru [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$s_1 + s_2 \cong \frac{15}{\gamma} + 0,125\gamma V_{min}^2 \quad (3.12 \text{ b})$$

kde: s_1 = vzdálenost při klouzání [m], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m], γ = úhel klouzání [rad], V_{min} = rychlost letu [m/s]

Během fáze přechodového oblouku se předpokládá, že rychlost bude konstantní, ale to není zcela správně. V.S. Pyšnov při zbrzdění na oblouku uvádí přibližný výraz, přičemž předpokládá, že letadlo bude klouzat na oblouku s průměrným úhlem klouzání $\frac{\gamma}{2}$ [rad] a též předpokládá, že aerodynamický odpor draku D [N], bude stejný jako i při ustáleném klouzavém letu [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$D = G \sin \gamma \quad (3.13)$$

kde: D = aerodynamický odpor draku [N], G = tíhová síla [N],
 γ = úhel klouzání [rad]

Dále rovnice se pro výpočet tečné složky výsledné síly na letadlo letícího po oblouku používá tvar [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$R_t = D - G \sin \frac{\gamma}{2} = G(\sin \gamma - \sin \frac{\gamma}{2}) \cong G \frac{\gamma}{2} \quad (3.14 \text{ a})$$

kde: R_t = tečná zrychlující síla [N], D = aerodynamický odpor draku [N],
 G = tíhová síla [N], γ = úhel klouzání [rad]

Pro úbytek kinetické energie platí vztah [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$\Delta \left(\frac{mv^2}{2} \right) \cong R_t s_2 \cong -G \frac{\gamma}{2} s_2 \cong G h_1 \quad (3.14 \text{ b})$$

kde: R_t = tečná zrychlující síla [N], s_2 = vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku [m] G = tíhová síla [N], γ = úhel klouzání [rad], h_1 = výška přechodového oblouku [m]

Odkud $\Delta V^2 = -2gh_1$ a tím pádem i rychlost na konci oblouku má tvar [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$V'_{zp} = \sqrt{V_{zP}^2 + \Delta V^2} = \sqrt{V_{zP}^2 - 2gh_1} \quad (3.14 c)$$

kde: V_{zP} = rychlost letu při přiblížení na přistání [m/s^2], g = tíhové zrychlení [m/s^2] ($g = 9,81[m/s^2]$), h_1 = výška přechodového oblouku [m]

3.1.3 Výdrž

Ve výdrži letadlo letí těsně nad zemí přímočarým pohybem zhruba rovnoběžně s povrchem. Odpor, který letadlo má, postupně zmenšuje rychlost letu. Přičemž čím větší je odpor, tím rychlost klesá razantněji a délka výdrže se zkracuje. Zvýšený odpor způsobují brzdící klapky, které byly vysunuty při klouzání. Pokud brzdící klapky jsou neúplně otevřeny nebo zavřeny, bude letadlo pomalu ztrácet rychlost a tím se délka přistání prodlouží, což není žádoucí. Při této části pilot podrovnává řídicí pákou. Pod pojmem podrovnání rozumíme pomalé zvyšování úhlu náběhu ve výdrži a proporcionální zmenšování rychlosti do rychlosti dosednutí (obvykle 1,1-1,15 v_{min}). [1]

3.1.3.1 Vztahy pro výpočet potřebné délky ve fázi výdrže

Ve fázi výdrže letadlo se dobrzdňuje z rychlosti letu při přiblížení V_{zP} [m/s] na rychlost přistání V_P [m/s], přitom úhel náběhu α [rad] se postupně zvyšuje z hodnoty α_2 [rad] na hodnotu α_P [rad]. Za předpokladu nulového tahu pohonných jednotek, pohybová rovnice bude mít tvar [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$\frac{G}{g} \frac{V}{dt} = -c_D \frac{\rho}{2} S V^2 \quad (3.15 a)$$

kde: V = rychlost letu [m/s], c_D = součinitel odporu, ρ = hustota (měrná hmotnost) vzduchu [kg/m^3], G = tíhová síla [N], g = tíhové zrychlení [m/s^2], S = plocha křídla [m^2]

Pro vodorovný let těsně nad zemí musí být splněna podmínka [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$c_L \frac{1}{2} \rho V^2 S = G \quad (3.15 b)$$

kde: V = rychlost letu [m/s], c_L = součinitel vztlaku, ρ = hustota (měrná hmotnost) vzduchu [kg/m^3], G = tíhová síla [N], S = plocha křídla [m^2]

Při spojení vztahu (3.15 a) a (3.15 b) a dosazení rovnice $dt = \frac{ds}{v}$ vplyne vztah pro element dráhy při dobrzd'ování [2, Tichopád, V., str. 89]:

$$ds = -\frac{1}{2g} \frac{d(v^2)}{c_D/c_L} \quad (3.16 \text{ a})$$

kde: V = rychlost letu [m/s], c_L = součinitel vztlaku, c_D = součinitel odporu,
 g = tíhové zrychlení [m/s²]

Přepokládá se, že poměr součinitel odporu c_D k součiniteli vztlaku c_L (c_D/c_L) jako funkce rychlosti letu a nabývá hodnoty mezi $(c_D/c_L)_2$ a $(c_D/c_L)_P$ nebo $\left(\frac{c_D}{c_L}\right) \cong \left(\frac{c_D}{c_L}\right)_2 = tg\gamma \cong \gamma$. Po dosazení do výrazu (3.16 a) pro element dráhy při dobrzd'ování a po následné integraci vplyne vztah pro vzdálenost s_3 [m] příslušnou dobrzd'ování letadla [2, Tichopád, V., str. 90]:

$$s_3 = \frac{2}{2g} \frac{V_{ZP}^2 - V_P^2}{\gamma} \quad (3.16 \text{ b})$$

kde: s_3 = vzdálenost odbrzd'ování letadla letem těsně nad zemí [m], V_{ZP} = rychlost letu při přiblížení na přistání [m/s²], V_P = přistávací rychlost [m/s²],
 g = tíhové zrychlení [m/s²], γ = úhel klouzání [rad]

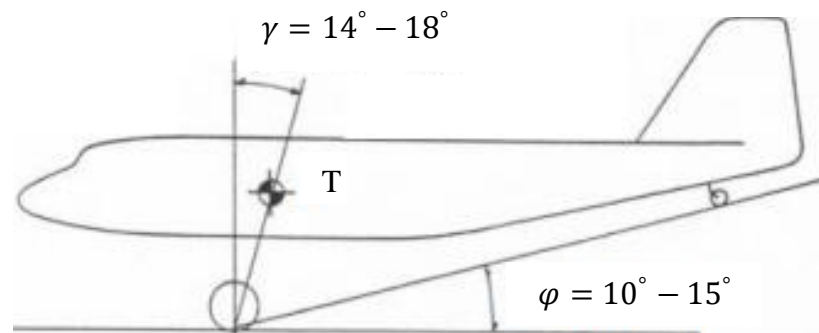
3.1.4 Dosednutí a průběh dojezdu

Dosednutí je fáze přistání, při které dojde k doteku letadla s přistávací drahou. Dojezd je poslední fáze přistání a letadlo se pohybuje přímočaře zpomaleně. Dosednutí a průběh dojezdu je závislý na typu podvozku, který slouží k pohybu letadla po dráze při rozjezdu na vzlet, při dojezdu po přistání a pro pojíždění po letišti. Letadla mohou být vybavena předovým nebo zádovým podvozkem.

3.1.4.1 Dosednutí a průběh dojezdu letadla se zádovým podvozkem

Zadní část podvozku je označována jako ostruhový podvozek. Letadla se zádovým podvozkem mají dosedat najednou na vše tři kola.

Před těžištěm letadla jsou umístěna kola hlavního podvozku (obr. 3.6), který přenáší největší podíl z celkového zatížení podvozku. Ostruha se nachází na zádi letadla a připadá na ni 6 % až 10 % celkového zatížení. Letadlo se zádovým podvozkem stojící na zemi má skloněnou podélnou osou s vysoko zdviženou přídělí (obr. 3.6). [10]

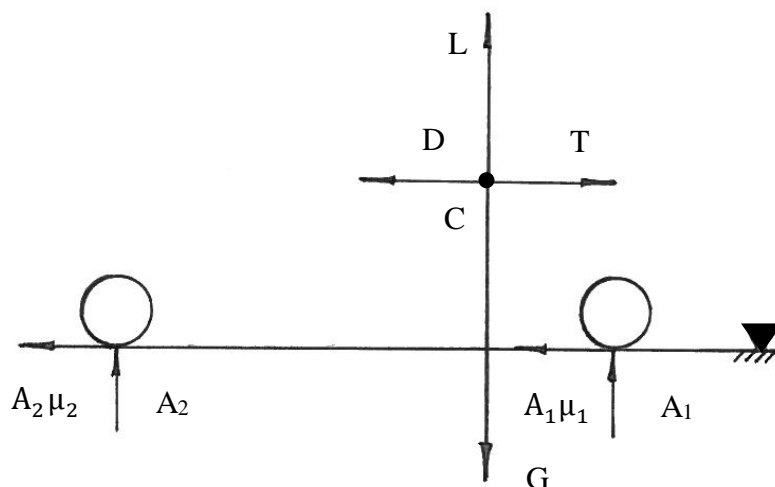


Obr. 3.6 Princip konstrukce letadla se zádovým podvozkem [10]

Kola letadla a ostruha musí být před dosednutí ve stejné výšce, přičemž křídlo bude ofukováno pod určitým úhlem náběhu. Tento úhel odpovídá přímé blízkosti vrcholu poláry a v této chvíli je rychlost letu minimální, letadlo ztratí vzlak a přistane současně na všechna kola a ostruhu. Letadla se zádovým podvozkem oproti letadlům s předovým podvozkem mají malou hmotnost a poměrně jednoduchou konstrukci, použití je ale omezené pouze na malá a nejlacinější letadla.

3.1.4.2 Vztahy pro výpočet dojezdu letadla se zád'ovým podvozkem

Při dojezdu má silová pohybová rovnice dle obr. 3.7 tvar [2, Tichopád, V., str. 90]:



Obr. 3.7 Schéma sil působících na letadlo při dojezdu [2]

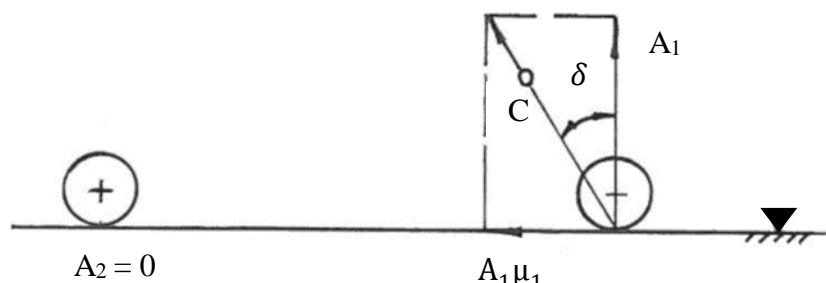
$$-L + G - A_1 - A_2 = 0 \quad (3.17 a)$$

kde: A_1, A_2 = reakce na kolech podvozku [N], L = aerodynamický vztlak draku [N],
 G = tíhová síla [N]

$$T - D - \mu_1 A_1 - \mu_2 A_2 = m a_t \quad (3.17 b)$$

kde: T = tah pohonné jednotky [N], D = aerodynamický odpor draku [N],
 A_1, A_2 = reakce na kolech podvozku [N], μ_1, μ_2 = součinitelé valivého tření
 podvozkových kol, m = hmotnost letadla [kg], a_t = tečné zrychlení [m/s^2]

Aby při dojezdu letadla s ostruhovým kolem nedošlo k překlopení, maximální použitelný součinitel tření hlavních kol podvozku σ je omezen podmínkou možnosti překlopení (obr.3.8).



Obr. 3.8 Schéma zobrazení maximálního použitelného součinitele tření při dojezdu letadla se zád'ovým podvozkem [2]

Letadlo se nachází na mezi překlopení, pokud výslednice reakce A_1 a třecí síly $\mu_1 A_1$ hlavních kol podvozku prochází těžištěm. Poté je reakce na ostruhovém kole $A_2=0$. Z toho vyplývá, že rovnice pro výpočet celkové brzdné síly bude mít tvar [2, Tichopád, V., str. 90]:

$$A_1 \mu_1 = (G - L) \mu_1 = (G - L) t g \sigma \quad (3.18)$$

kde: A_1, A_2 = reakce na kolech podvozku [N], μ_1, μ_2 = součinitelé valivého tření podvozkových kol, G = tíhová síla [N], L = aerodynamický vztlak draku [N], σ = maximální použitelný součinitel tření

Efektivní součinitel tření pro celé letadlo μ' se liší podle typu podvozku v závislosti, jestli jsou podvozková kola brzděna nebo ne (tab. 3.1).

| Typ podvozku | Efektivní součinitel tření μ' |
|--|-----------------------------------|
| Dvoukolový podvozek | 0,3 |
| Tříkolový podvozek s nebrzděným předovým kolem | 0,2 až 0,55 |
| Tříkolový podvozek se brzděnými koly | 0,3 až 1,0 |

Tab. 3.1: Vztah mezi efektivním součinitelem tření μ' a typem podvozku [2]

Závěrečnou část přistání představuje přímočarý zpomalený pohyb letounu s přistávací rychlostí V_p do úplného zastavení.

Vyraz pro výpočet délky dojezdu [9]:

$$s_4 = \left[\frac{1}{2gk_A} \right] \ln \left[\frac{k_T + k_A V_{TD}^2}{k_T} \right] \quad (3.19)$$

kde $k_T = -\mu$ (Součinitel valivého tření podvozkových kol)
 c_D = součinitel odporu, c_L = součinitel vztlaku, ρ = hustota vzduchu [kg/m^3],
 G = tíhová síla [N], S = plocha křídla [m^2], V_p = přistávací rychlost [m/s],

$$k_A = \left[\frac{\rho}{2 \left(\frac{mg}{s} \right)} \right] (\mu c_L - a - b c_L^2), \text{ kde } a + b c_L^2 = c_{Dmax}$$

4 Ověření splnění požadavků na přistání vzorového letounu

4.1 Požadavky

Přistání letounu je stanoveno pro nastavení klapek v přistávací poloze 35° a bez použití vztakových klapek 0° . Výpočet pozemní části přistání byl proveden za předpokladu dosednutí letadla na beton, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$ a na rovný krátce strážný trávník, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$. Letoun se záďovým podvozkem dosedají najednou na všechna tři kola.

Základními požadavky pro přistání jsou tyto:

1. Z výšky 15 [m] nad prahem dráhy musí letadlo zastavit nejpozději v 70 % využitelné délky přistání deklarované (LDA) pro letiště. [1]
2. Rychlost ve výšce 15 [m] nesmí být menší než $1,3 V_{SO}$ (pádová rychlost nebo minimální ustálená rychlost v přistávací konfiguraci). [1]
3. Minimální uhel klouzaní (vztakové klapky v přistávací poloze): $\gamma = 7[^\circ]$
4. Maximální povolená délka přistání: LDR = 300 [m]

Zadané hodnoty:

Hmotnost letounu: $m = 600$ [kg]

Plocha křídla: $S = 13$ [m²]

Štíhlost: $\lambda = 7$

Tíhové zrychlení: $g = 9,81$ [m/s²]

Hustota vzduchu: $\rho = 1,225$ [kg/m³]

| | | |
|---|-------|--------|
| Výchyłky klapek δ [°] | 0 [°] | 35 [°] |
| Součinitel odporu při nulové vztakové síle C_{D0} [-] | 0,033 | 0,149 |
| Maximální součinitel vztlaku C_{Lmax} [-] | 1,72 | 3,05 |

4.2 Letové výkony

Letové výkony byly počítány na základě zadaných parametrů letounu. Pro výpočet byla použita literatura. [2]

4.2.1 Návrhové rychlosti

Určení rychlosti s výchylkou klapek $\delta=0^\circ$:

Výpočet pádové rychlosti V_{S1} [m/s]:

$$V_{S1} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_{y\max}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 600 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 13 \cdot 1,72}} = 20,77 \text{ [m/s]}$$

Referenční rychlost V_{ref} [m/s] pro začátek přistávacího manévru:

$$V_{ref} \geq 1,3V_{S1} \Rightarrow V_{ref} = 1,3 \cdot 20,77 = 27,001 \text{ [m/s]}$$

Přistávací rychlost V_p [m/s] :

$$V_p = 1,15V_{S1} = 1,15 \cdot 20,77 = 23,8855 \text{ [m/s]}$$

Určení rychlosti s výchylkou klapek $\delta=35^\circ$:

Výpočet pádové rychlosti V_{S0} [m/s]:

$$V_{S0} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho S C_{y\max}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 600 \cdot 9,81}{1,225 \cdot 13 \cdot 3,05}} = 15,57 \text{ [m/s]}$$

Referenční rychlost V_{ref} [m/s] pro začátek přistávacího manévru:

$$V_{ref} \geq 1,3V_{S0} \Rightarrow V_{ref} = 1,3 \cdot 15,57 = 20,241 \text{ [m/s]}$$

Přistávací rychlost V_p [m/s] :

$$V_p = 1,15V_{S0} = 1,15 \cdot 15,57 = 17,9055 \text{ [m/s]}$$

4.2.2 Základní charakteristiky klouzavého letu za předpokladu parabolického tvaru aerodynamické poláry

Určení základních parametru s výchylkou klapek $\delta = 0^\circ$:

Součinitel vzlaku c_L :

$$c_L = \frac{2mg}{\rho V^2} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 9,81}{13 \cdot 1,225 \cdot 27,001^2} = 1,014$$

Součinitel odporu c_D :

$$c_D = c_{x0} + c_{xi} = c_{x0} + \frac{c_y^2}{\pi \lambda} = 0,033 + \frac{1,014^2}{\pi \cdot 7} = 0,07975$$

Rychlost letu při klouzání V [m/s]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{c_L^2 + c_D^2}} \frac{G}{S} \frac{2}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1,014^2 + 0,07975^2}} \cdot \frac{600 \cdot 9,81}{13} \cdot \frac{2}{1,225}} = 26,96 \text{ [m/s]}$$

Určení základních parametru s výchylkou klapek $\delta = 35^\circ$:

Součinitel vztlaku c_L :

$$c_L = \frac{2mg}{S\rho V^2} = \frac{2 \cdot 600 \cdot 9,81}{13 \cdot 1,225 \cdot 20,241^2} = 1,8043$$

Součinitel odporu c_D :

$$c_D = c_{x0} + c_{xi} = c_{x0} + \frac{c_y^2}{\pi \lambda} = 0,149 + \frac{1,8043^2}{\pi \cdot 7} = 0,29704$$

Rychlost letu při klouzání V [m/s]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{c_L^2 + c_D^2}} \frac{G}{S} \frac{2}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1,8043^2 + 0,29704^2}} \cdot \frac{600 \cdot 9,81}{13} \cdot \frac{2}{1,225}} \\ = 20,106 \text{ [m/s]}$$

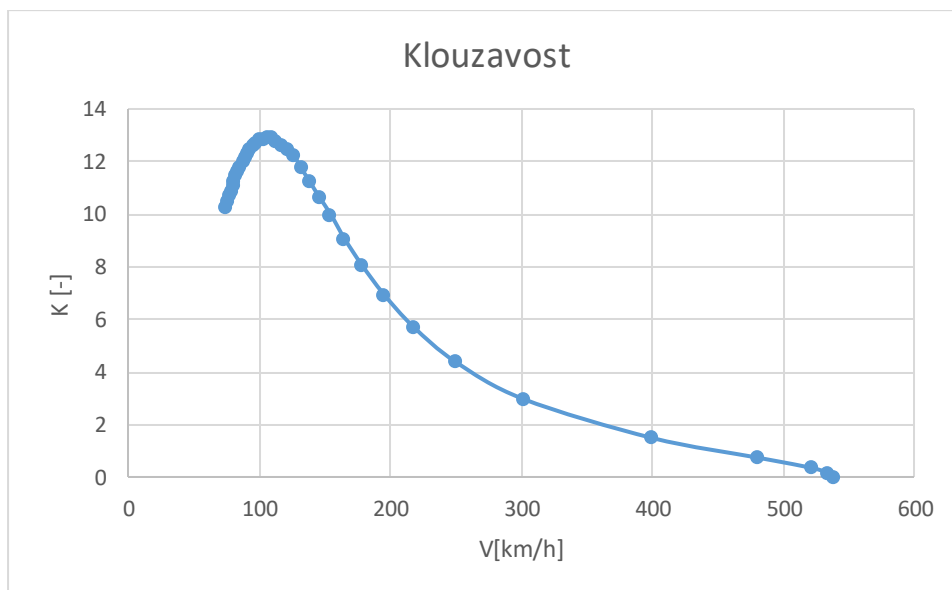
4.2.3 Klouzací poměr

Klouzavost K [1] závisí pouze na aerodynamických vlastnostech letounu. Můžeme klouzavost K [1] vyjádřit jako poměr součinitelů vztlaku C_L [1] a odporu C_D [1].

Určení klouzavosti s výchylkou klapěk $\delta = 0^\circ$:

$$K = \frac{C_L}{C_D} = \frac{1,014}{0,07975} = 12,715 [1]$$

Výsledný graf klouzavosti letounu:

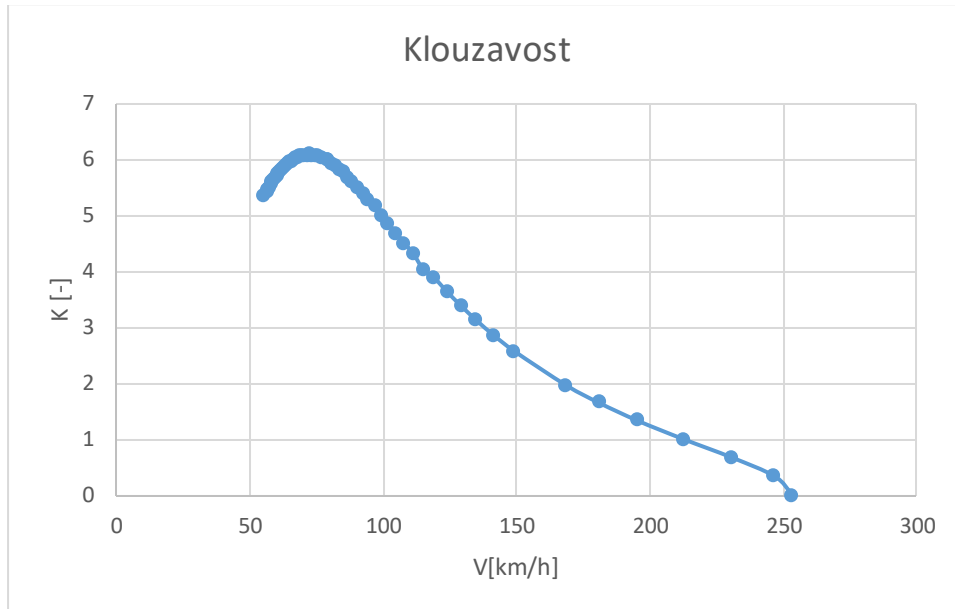


Graf klouzavosti letounu

Určení klouzavosti s výchytkou klapek $\delta = 35^\circ$:

$$K = \frac{C_L}{C_D} = \frac{1,8043}{0,29704} = 6,0743 [1]$$

Výsledný graf klouzavosti letounu:



Graf klouzavosti letounu

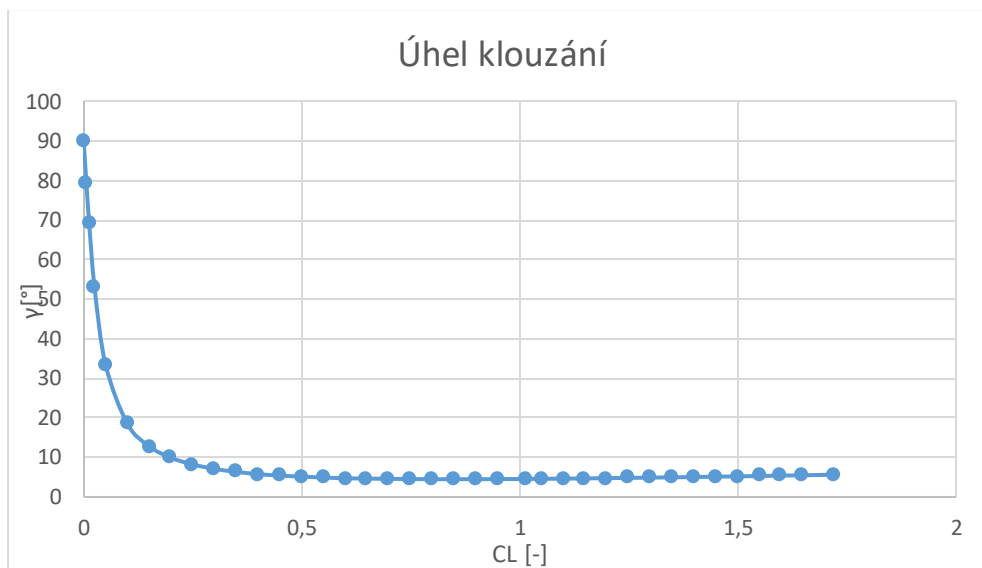
4.2.4 Úhel klouzání

Úhel klouzání γ [°] je to úhel, který svírá dráha přímočará dráha ustáleného klouzavého letu s horizontální rovinou. Je závislý na klouzavosti a platí, že s rostoucí klouzavostí se snižuje úhel klouzání.

Určení uhlu klouzání s výchytkou klapek $\delta = 0^\circ$:

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{k}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{12,715}\right) = 4,497 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Z vypočtených hodnot vytvořím graf:

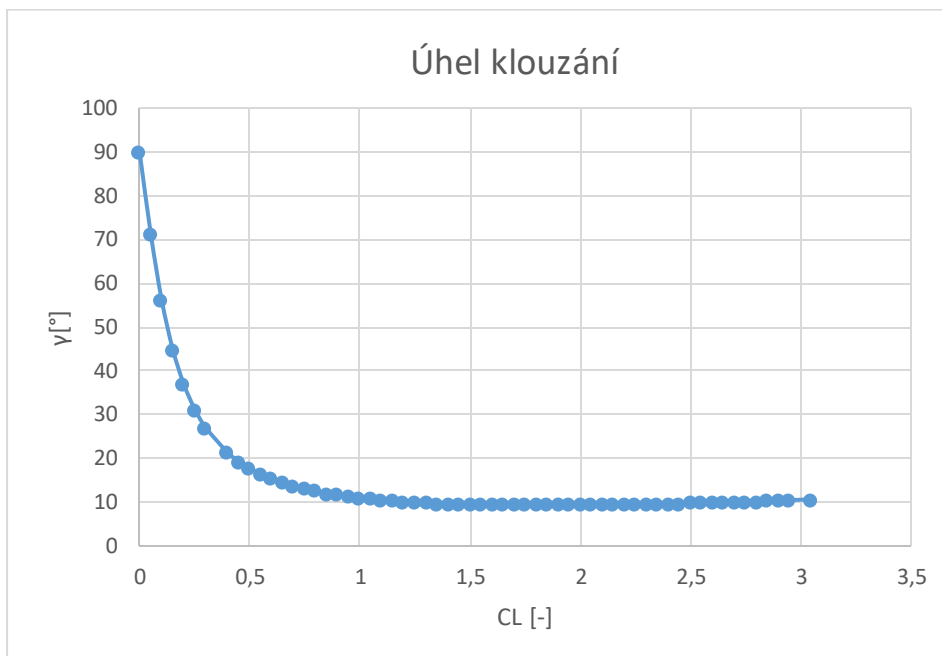


Graf úhlu klouzání

Určení úhlu klouzání s výchylkou klapek $\delta=35^\circ$:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{1}{k}\right) = \arctg\left(\frac{1}{6,0743}\right) = 9,349[^\circ]$$

Z vypočtených hodnot vytvořím graf:



Graf úhlu klouzání

4.2.5 Rychlostní polára v klouzavém letu

Rychlostní polára slouží ke zhodnocení režimů klouzavého letu z hlediska letových výkonů. Je to závislost klesací rychlosti na vodorovné složce rychlosti ustáleného přímočarého klouzavého letu. Klesací rychlost V_z bude vynášena v [m/s], vodorovná složka rychlosti klouzavého letu V_x vynášena v [km/h].

Sestrojení polárního diagramu rychlostí při klouzavém letu s výchylkou klapek $\delta = 0^\circ$:

Rychlost letu při klouzání V [m/s]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{c_L^2 + c_D^2}} \frac{G}{S} \frac{2}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1,014^2 + 0,07975^2}} \cdot \frac{600 \cdot 9,81}{13} \cdot \frac{2}{1,225}}$$
$$= 26,9586 \text{ [m/s]}$$

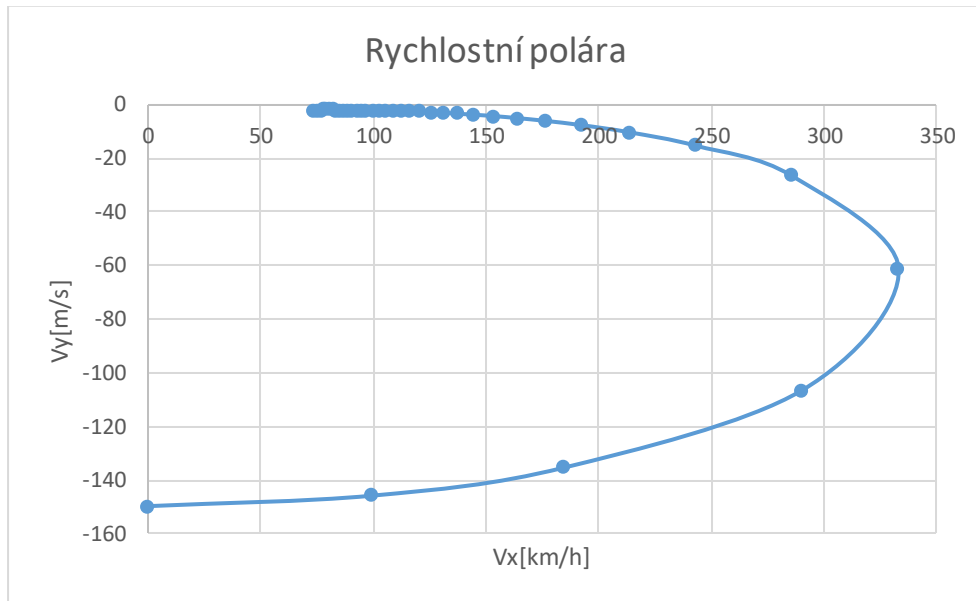
Vypočtenou rychlost potom rozložím na dopřednou rychlost V_x [km/h]:

$$V_x = V \cdot \cos\gamma = 26,9586 \cdot \cos 4,497 = 26,876 \left[\frac{m}{s} \right] = 96,752 \left[\frac{km}{h} \right]$$

a klesací rychlost V_z [m/s]:

$$V_z = -V \cdot \sin\gamma = -26,9586 \cdot \sin 4,497 = -2,114 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Z vypočtených hodnot vytvořím graf:



Rychlostní polára letounu

Sestrojení polárního diagramu rychlostí při klouzavém letu s výchylkou klapek $\delta = 35^\circ$:

Rychlost letu při klouzání V [m/s]:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{c_L^2 + c_D^2}} \frac{G}{S \rho}} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{1,8043^2 + 0,29704^2}} \cdot \frac{600 \cdot 9,81}{13} \cdot \frac{2}{1,225}} = 20,1061 \text{ [m/s]}$$

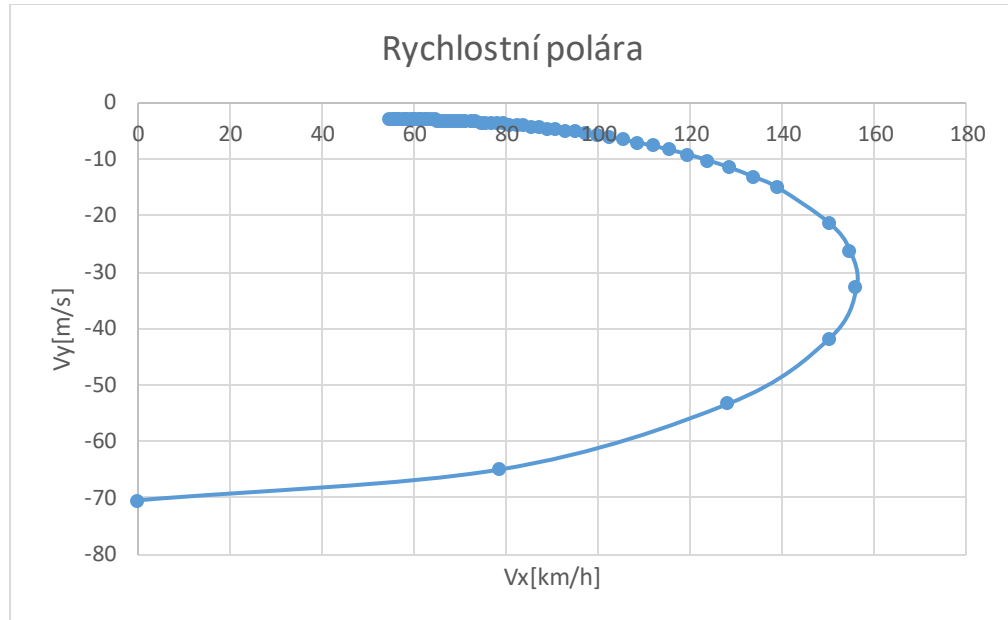
Vypočtenou rychlost potom rozložím na dopřednou rychlost V_x [km/h]:

$$V_x = V \cdot \cos\gamma = 20,1061 \cdot \cos 9,349 = 19,839 \left[\frac{m}{s} \right] = 71,421 \left[\frac{km}{h} \right]$$

a klesací rychlost V_z [m/s]:

$$V_z = -V \cdot \sin\gamma = -20,1061 \cdot \sin 9,349 = -3,266 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Z vypočtených hodnot vytvořím graf:



Rychlostní polára letounu

4.3 Určení výchozí délky přistání

Přistání letounu je stanoveno pro klapky v přistávací poloze 35° , kde $C_L=1,8043$ a v poloze 0° , kde $C_L=1,014$. Přistání je počítáno přes překážku $h_{SOL}=15$ m. Součinitel valivého tření podvozkových kol μ pro beton je $\mu=0,03$, pro rovný a krátce střížený trávník je $\mu=0,05$. Za předpokladu, že máme letadlo s ostruhovým kolem, hodnota efektivního součinitele tření pro dvoukolový podvozek bude se rovnat $\mu' = 0,3$.

4.3.1 Výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přechodového oblouku

Výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přechodového oblouku s vychylkou klapek 0° :

Pádová rychlost: $V_{S1}=20,77$ [m/s]

Referenční rychlost pro začátek přistávacího manévru: $V_{ref} = 27,001$ [m/s]

Přistávací rychlost: $V_p = 23,8855$ [m/s]

Výpočet délky vzdušné části přistání:

Poloměr dráhy letu R [m]:

$$R = \frac{V_{ref}^2}{g} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{S1}^2}{V_{ref}^2}\right)} = \frac{27,001^2}{9,81} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{20,77^2}{27,001^2}\right)} = 182,024 \text{ [m]}$$

$$kde V_{ref}/V_{S0} = 1,3$$

Výška přechodového oblouku h_1 [m]:

$$h_1 = (R - R \cos \gamma) = R(1 - \cos \gamma) = 182,024(1 - \cos 4,497) = 0,56037 \text{ [m]}$$

Délka klouzání na přistání s_1 [m]:

$$s_1 = (15 - h_1) \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} = (15 - 0,56037) \frac{1}{\operatorname{tg} 4,497} = 183,596 \text{ [m]}$$

Vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku s_2 [m]:

$$s_2 = R \sin \gamma = 182,024 \cdot \sin 4,497 = 14,272 \text{ [m]}$$

Délka klouzání na přistání a kruhového oblouku je pak:

$$s_1 + s_2 = 183,596 + 14,272 = 197,868 \text{ [m]}$$

Rychlost na konci oblouku V'_{zp} [m/s]:

$$V'_{zp} = \sqrt{V_{ref}^2 - 2gh_1} = \sqrt{27,001^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 0,56037} = 26,7966 \text{ [m/s]}$$

Výpočet potřebné délky a rychlosti ve fázích klouzání a přechodového oblouku s výchytkou klapek 35°:

Pádová rychlost: $V_{S0} = 15,57$ [m/s]

Referenční rychlost pro začátek přistávacího manévru: $V_{ref} = 20,241$ [m/s]

Přistávací rychlost: $V_p = 17,9055$ [m/s]

Výpočet délky vzdušné části přistání:

Poloměr dráhy letu R [m]:

$$R = \frac{V_{ref}^2}{g} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{V_{S0}^2}{V_{ref}^2}\right)} = \frac{20,241^2}{9,81} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{15,57^2}{20,241^2}\right)} = 102,29 \text{ [m]}$$

$$kde V_{ref}/V_{S0} = 1,3$$

Výška přechodového oblouku h_1 [m]:

$$h_1 = (R - R \cos \gamma) = R(1 - \cos \gamma) = 102,29(1 - \cos 9,349) = 1,359 \text{ [m]}$$

Délka klouzání na přistání s_1 [m]:

$$s_1 = (15 - h_1) \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} = (15 - 1,359) \frac{1}{\operatorname{tg} 9,349} = 82,86 \text{ [m]}$$

Vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku s_2 [m]:

$$s_2 = R \sin \gamma = 102,29 \cdot \sin 9,349 = 16,616 \text{ [m]}$$

Délka klouzání na přistání a kruhového oblouku je pak:

$$s_1 + s_2 = 82,86 + 16,616 = 99,476 \text{ [m]}$$

Rychlost na konci oblouku V'_{zp} [m/s]:

$$V'_{zp} = \sqrt{V_{\text{ref}}^2 - 2gh_1} = \sqrt{20,241^2 - 2 \cdot 9,81 \cdot 1,359} = 19,5715 \text{ [m]}$$

4.3.2 Výpočet potřebné délky ve fázi výdrže

Výpočet potřebné délky ve fázi výdrže s výchylkou klapek 0° :

Délka přímočarého zpomaleného pohybu letadla těsně nad zemí s_3 [m]:

$$s_3 = \frac{2}{2g} \frac{V'_{zp}{}^2 - V_p^2}{\gamma} = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{26,7966^2 - 23,8855^2}{4,497} = 3,3445 \text{ [m]}$$

Výpočet potřebné délky ve fázi výdrže s výchylkou klapek 35° :

Délka přímočarého zpomaleného pohybu letadla těsně nad zemí s_3 [m]:

$$s_3 = \frac{2}{2g} \frac{V'_{zp}{}^2 - V_p^2}{\gamma} = \frac{1}{9,81} \cdot \frac{19,5715^2 - 17,9055^2}{9,349} = 0,681 \text{ [m]}$$

4.3.3 Výpočet pozemní části přistání

Výpočet pozemní části přistání s výchylkou klapek 0° :

Určení celkové brzdicí síly $\mu_1 A_1$ [N] pro letadlo s ostruhovým kolem:

$$A_1 \mu'_1 = (G - L) \mu'_1 = (mg - L) \mu'_1 = (600 \cdot 9,81 - 5868,5) \cdot 0,3 = 5,25 \text{ [N]}$$

kde efektivní součinitel tření $\mu'_1 = 0,3$

Pak výslednice reakce A_1 [N] je rovna:

$$A_1 = 17,5 \text{ [N]}$$

Vypočet pozemní části přistání se provádí za předpokladu dosednutí letadla na beton, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$:

$$\begin{aligned} s_4 &= \left[\frac{1}{2gk_A} \right] \ln \left[\frac{k_T + k_A V_{TD}^2}{k_T} \right] \\ &= \left[\frac{1}{2 \cdot 9,81 \cdot (-0,000156787)} \right] \ln \left[\frac{-0,03 + (-0,000156787 \cdot 23,8855^2)}{-0,03} \right] \\ &= -449,163 \text{ [m]} \end{aligned}$$

kde $k_T = -0,03$

$$k_A = \left[\frac{\rho}{2 \left(\frac{mg}{s} \right)} \right] (\mu c_L - a - bc_L^2) = \left[\frac{1,225}{2 \left(\frac{9,81 \cdot 600}{13} \right)} \right] (0,03 \cdot 1,72 - 0,1675) = -0,000156787$$

kde $a + bc_L^2 = c_{Dmax} = 0,1675$

Letoun se zářovým podvozkem dosedají najednou na všechna tři kola, tedy při stanovení pozemní části přistání je za c_D dosazena maximální hodnota součinitelů odporu.

Vypočet se provádí za předpokladu dosednutí letadla na rovný a krátce střížený trávník, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$:

$$\begin{aligned} s_4 &= \left[\frac{1}{2gk_A} \right] \ln \left[\frac{k_T + k_A V_{TD}^2}{k_T} \right] \\ &= \left[\frac{1}{2 \cdot 9,81 \cdot (-0,000110252)} \right] \ln \left[\frac{-0,05 + (-0,000110252 \cdot 23,8855^2)}{-0,05} \right] \\ &= -376,53 \text{ [m]} \end{aligned}$$

kde $k_T = -0,05$

$$k_A = \left[\frac{\rho}{2 \left(\frac{mg}{s} \right)} \right] (\mu c_L - a - bc_L^2) = \left[\frac{1,225}{2 \left(\frac{9,81 \cdot 600}{13} \right)} \right] (0,05 \cdot 1,72 - 0,1675) = -0,000110252$$

kde $a + bc_L^2 = c_D = 0,1675$

Letoun se zářovým podvozkem dosedají najednou na všechna tři kola, tedy při stanovení pozemní části přistání je za c_D dosazena maximální hodnota součinitelů odporu.

Výpočet pozemní části přistání s výchylkou klapek 35°:

Určení celkové brzdicí síly $\mu_1 A_1$ [N] pro letadlo s ostruhovým kolem:

$$A_1 \mu'_1 = (G - L) \mu'_1 = (mg - L) \mu'_1 = (600 \cdot 9,81 - 5807,772) \cdot 0,3 \\ = 23,468 \text{ [N]}$$

$$\text{kde efektivní součinitel tření } \mu'_1 = 0,3$$

Pak výslednice reakce A_1 [N] je rovna:

$$A_1 = 78,228 \text{ [N]}$$

Vypočet pozemní části přistání se provádí za předpokladu dosednutí letadla na beton, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$:

$$s_4 = \left[\frac{1}{2gk_A} \right] \ln \left[\frac{k_T + k_A V_{TD}^2}{k_T} \right] \\ = \left[\frac{1}{2 \cdot 9,81 \cdot (-0,000650013)} \right] \ln \left[\frac{-0,03 + (-0,000650013 \cdot 17,9065^2)}{-0,03} \right] \\ = -162,53 \text{ [m]}$$

kde $k_T = -0,03$

$$k_A = \left[\frac{\rho}{2 \left(\frac{mg}{s} \right)} \right] (\mu c_L - a - bc_L^2) = \left[\frac{1,225}{2 \left(\frac{9,81 \cdot 600}{13} \right)} \right] (0,03 \cdot 3,05 - 0,572) = \\ -0,000650013$$

kde $a + bc_L^2 = c_D = 0,572$

Letoun se zářovým podvozkem dosedají najednou na všechna tři kola, tedy při stanovení pozemní části přistání je za c_D dosazena maximální hodnota součinitelů odporu.

Vypočet se provádí za předpokladu dosednutí letadla na rovný a krátce střížený trávník, kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$:

$$\begin{aligned} s_4 &= \left[\frac{1}{2gk_A} \right] \ln \left[\frac{k_T + k_A V_{TD}^2}{k_T} \right] \\ &= \left[\frac{1}{2 \cdot 9,81 \cdot (-0,000567493)} \right] \ln \left[\frac{-0,05 + (-0,000567493 \cdot 17,9065^2)}{-0,05} \right] \\ &= -137,8 \text{ [m]} \end{aligned}$$

kde $k_T = -0,05$

$$\begin{aligned} k_A &= \left[\frac{\rho}{2 \left(\frac{mg}{s} \right)} \right] (\mu c_L - a - bc_L^2) = \left[\frac{1,225}{2 \left(\frac{9,81 \cdot 600}{13} \right)} \right] (0,05 \cdot 3,05 - 0,572) = \\ &= -0,000567493 \end{aligned}$$

kde $a + bc_L^2 = c_D = 0,572$

Letoun se zářovým podvozkem dosedají najednou na všechna tři kola, tedy při stanovení pozemní části přistání je za c_D dosazena maximální hodnota součinitelů odporu.

4.3.4 Celková délka přistání

Celková délka přistání je pak dána součtem délek jednotlivých úseků přistání.

Celková délka přistání s_P [m] s výchylkou klapek 0° :

Celková délka přistání s_P [m] při dosednutí letadla na beton:

$$s_P = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 183,596 + 14,272 + 3,3445 + 449,163 = 650,4 \text{ [m]}$$

Celková délka přistání s_P [m] s výchylkou klapek 0° při dosednutí letadla na rovný a krátce střížený trávník:

$$s_P = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 183,596 + 14,272 + 3,3445 + 376,53 = 577,7 \text{ [m]}$$

Celková délka přistání s_P [m] s výchylkou klapek 35° :

Celková délka přistání s_P [m] při dosednutí letadla na beton:

$$s_P = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 82,86 + 16,616 + 0,681 + 162,53 = 262,7 \text{ [m]}$$

Celková délka přistání s_p [m] s výchytkou klapek 0° při dosednutí letadla na rovný a krátce strážný trávník:

$$s_p = s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 82,86 + 16,616 + 0,681 + 137,8 = 234 \text{ [m]}$$

Nakonec shrnutí vypočtených hodnot mého návrhu:

Přistání sportovního letounu bez použití vztlakových klapek 0° :

| |
|--|
| Součinitel vztlaku: $c_L = 1,014$ |
| Součinitel odporu: $c_D = 0,07975$ |
| Rychlost letu při klouzání: $V = 26,96$ [m/s] |
| Pádová rychlost: $V_{s1} = 20,77$ [m/s] |
| Referenční rychlost pro začátek přistávacího manévru: $V_{ref} = 27,001$ [m/s] |
| Přistávací rychlost: $V_p = 23,8855$ [m/s] |
| Klouzavost: $K = 12,715$ |
| Uhel klouzání: $\gamma = 4,497$ [°] |
| Délka klouzání na přistání: $s_1 = 183,596$ [m] |
| Vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku: $s_2 = 14,272$ [m] |
| Délka přímočarého zpomaleného pohybu letadla těsně nad zemí: $s_3 = 3,3445$ [m] |
| Pozemní část přistání za předpokladu <u>dosednutí letadla na beton</u> , kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$: $s_4 = 449,163$ [m] |
| Celková délka přistání s_p [m] při <u>dosednutí letadla na beton</u> : $s_p = 650,4$ [m] |
| Pozemní část přistání se provádí za předpokladu <u>dosednutí letadla na rovný a krátce strážný trávník</u> , kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$: $s_4 = 376,53$ [m] |
| Celková délka přistání s_p [m] při <u>dosednutí letadla na rovný a krátce strážný trávník</u> : $s_p = 577,7$ [m] |

Přistání sportovního letounu s výchytkou vztlakových klapek 35 ° :

| |
|--|
| Součinitel vztlaku: $c_L = 1,8043$ |
| Součinitel odporu: $c_D = 0,29704$ |
| Rychlost letu při klouzání: $V = 20,106$ [m/s] |
| Pádová rychlost: $V_{S0} = 15,57$ [m/s] |
| Referenční rychlost pro začátek přistávacího manévru: $V_{ref} = 20,241$ [m/s] |
| Přistávací rychlost: $V_p = 17,9055$ [m/s] |
| Klouzavost: $K = 6,0743$ |
| Uhel klouzání: $\gamma = 9,349$ [°] |
| Délka klouzání na přistání: $s_1 = 82,86$ [m] |
| Vodorovná vzdálenost po kruhovém oblouku: $s_2 = 16,616$ [m] |
| Délka přímočarého zpomaleného pohybu letadla těsně nad zemi: $s_3 = 0,681$ [m] |
| Pozemní části přistání za předpokladu <u>dosednutí letadla na beton</u> , kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,03$: $s_4 = 162,53$ [m] |
| Celková délka přistání s_p [m] při <u>dosednutí letadla na beton</u> : $s_p = 262,7$ [m] |
| Pozemní části přistání za předpokladu <u>dosednutí letadla na rovný a krátce strážný trávník</u> , kde součinitel valivého tření podvozkových kol je $\mu = 0,05$: $s_4 = 137,8$ [m] |
| Celková délka přistání při <u>dosednutí letadla na rovný a krátce strážný trávník</u> : $s_p = 234$ [m] |

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo provedení rozboru doporučené metodiky přistávacího manévru. Dalším cílem bylo sestavit postup výpočtu přistání vzorového sportovního letounu se záďovým podvozkem a ověřit splnění požadavků na přistání na základě teoretické části a na základě zadaných požadavků pro přistání.

Ověření splnění požadavků bylo provedeno pro letoun v přistávací konfiguraci se vzlakovými klapkami nastavenými na 35° . Uvažovaný letoun přistával na RWY z výšky 15 [m] (50 ft) a brzdil do úplného zastavení na vzdálenosti, která není větší, než 70 % využitelné délky RWY LDA deklarované pro dané letiště. Zároveň bylo uvažováno, že rychlost letu V_{ref} při zahájení přistání ve výšce myšlené překážky nesmí být menší než 1,3násobek pádové rychlosti letounu v přistávací konfiguraci V_{so} . Úhel klouzání, který svírá dráha přímočarého horizontálního letu s úhlem klouzání letounu je rovna $\gamma = 9,349^\circ$, což splňuje požadavek minimálního uhlu klouzání $\gamma = 7^\circ$ pro letoun v přistávací konfiguraci.

Dále byly z vypočtených hodnot určeny výchozí délky přistání letounu s nastavení klapek v přistávací poloze 35° . Pro přistání letounu na beton je LDR stanovena na 262,7 [m], pro travnatou dráhu je LDR stanovena na 234 [m], což v obou případech nepřekračuje zadaný požadavek na $LDR = 300$ [m].

Výpočet byl proveden za předpokladu, že letoun přistane na nejvhodnější dráze, v nejvhodnějším směru a za bezvětří. Z toho vyplývá, že délka přistávací dráhy LDA, která je vhodná pro dosednutí a dojezd sportovního letounu musí být o 30 % větší, než je délka pro přistání (LDR) z výpočtu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Keller, L.: *Učebnice pilota 2016: pro žáky a piloty letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost*. Vydavatelství Cheb: Svět křídel, 2016, kapitola [5], 267 str. ISBN -978- 80-87567-89-0.
- [2] Tichopád, V.: *Letové výkony*. Vydavatelství ČVUT Praha, 2001, 17-20 str., 88-93 str. ISBN 80-01-02339-7.
- [3] *Letectví* [online]. [cit. 2016-10-24]
http://www.kolmanl.info/?show=SHOW_TXT&alias=M_KLAPKY_UV.
- [4] Letecký předpis L 14. Letiště. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 2009, 32 str.
- [5] Letecký předpis L 14. Dodatek A. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 10. 11. 2016, Doc. A-6.
- [6] Starikov, Ju. N., Behtir, V. P.: *Učeb. posobie: praktičeskaja aerodinamika samoleta DA 42*. Ulyanovsk: UVAU GA (I), 2010, 68-69 str. BBK O53-082.022-011ja7.
- [7] Letecký předpis L8168. Praha: Ministerstvo dopravy ČR, 27.9.2007, Část I – Díl 4 – Hlava 7.
- [8] Zítka, K., Vacík, M.: *Učebnice létání: příručka pro výcvik soukromého pilota letounů – PPL(A)*. Vydavatelství: Vintage Aviation s.r.o., 2016, 35-40 str. ISBN 978-80-260-9395-4.
- [9] Jenkinson, Loyd R., Simpkin P., Rhodes D.: *Civil Jet Aircraft Design*. Aiaa Education Series, 264 str. ISBN 10: 156347350X ISBN 13: 9781563473500.
- [10] Slavětínský, D. : *O letadlech: Koncepce přistávacího zařízení* [online]. [cit. 2016-10-25]
http://www.slavetind.cz/stavba/koncepce/Koncepce_prist_zar.aspx.
- [11] Wikipedie: *Letištní okruh*. [online]. [cit. 2016-11-20]
https://cs.wikipedia.org/wiki/Leti%C5%A1tn%C3%AD_okruh.

Příloha č. 1

| C _L [1] | C _D [1] | K [1] | γ [°] | V [m/s] | V [km/h] | V _x [m/s] | V _x [km/h] | V _z [m/s] |
|--------------------|--------------------|---------|---------|---------|----------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| -0,800 | 0,062 | -12,903 | -4,432 | 30,352 | 109,268 | 30,261 | 108,941 | 2,346 |
| -0,750 | 0,059 | -12,803 | -4,466 | 31,347 | 112,849 | 31,252 | 112,506 | 2,441 |
| -0,700 | 0,055 | -12,658 | -4,516 | 32,446 | 116,806 | 32,345 | 116,443 | 2,554 |
| -0,650 | 0,052 | -12,449 | -4,593 | 33,669 | 121,208 | 33,561 | 120,819 | 2,696 |
| -0,600 | 0,049 | -12,245 | -4,669 | 35,042 | 126,151 | 34,926 | 125,733 | 2,852 |
| -0,550 | 0,047 | -11,763 | -4,859 | 36,595 | 131,742 | 36,464 | 131,269 | 3,100 |
| -0,500 | 0,044 | -11,261 | -5,075 | 38,375 | 138,150 | 38,225 | 137,610 | 3,395 |
| -0,450 | 0,042 | -10,661 | -5,358 | 40,442 | 145,590 | 40,265 | 144,953 | 3,777 |
| -0,400 | 0,040 | -10,000 | -5,711 | 42,882 | 154,375 | 42,669 | 153,609 | 4,267 |
| -0,350 | 0,039 | -9,074 | -6,289 | 45,819 | 164,947 | 45,543 | 163,954 | 5,019 |
| -0,300 | 0,037 | -8,086 | -7,050 | 49,451 | 178,024 | 49,077 | 176,678 | 6,069 |
| -0,250 | 0,036 | -6,975 | -8,159 | 54,101 | 194,764 | 53,554 | 192,793 | 7,678 |
| -0,200 | 0,035 | -5,744 | -9,876 | 60,343 | 217,235 | 59,449 | 214,016 | 10,350 |
| -0,150 | 0,034 | -4,409 | -12,780 | 69,285 | 249,427 | 67,569 | 243,248 | 15,326 |
| -0,100 | 0,033 | -2,989 | -18,498 | 83,727 | 301,417 | 79,400 | 285,840 | 26,564 |
| -0,050 | 0,033 | -1,510 | -33,516 | 111,024 | 399,685 | 92,564 | 333,230 | 61,303 |
| -0,025 | 0,033 | -0,757 | -52,877 | 133,587 | 480,913 | 80,623 | 290,244 | 106,515 |
| -0,013 | 0,033 | -0,379 | -69,258 | 144,721 | 520,996 | 51,254 | 184,516 | 135,340 |
| -0,006 | 0,033 | -0,189 | -79,276 | 148,351 | 534,064 | 27,605 | 99,377 | 145,760 |
| 0,000 | 0,033 | 0,000 | 90,000 | 149,668 | 538,804 | 0,000 | 0,000 | -149,668 |
| 0,006 | 0,033 | 0,189 | 79,276 | 148,351 | 534,064 | 27,605 | 99,377 | -145,760 |
| 0,013 | 0,033 | 0,379 | 69,258 | 144,721 | 520,996 | 51,254 | 184,516 | -135,340 |
| 0,025 | 0,033 | 0,757 | 52,877 | 133,587 | 480,913 | 80,623 | 290,244 | -106,515 |
| 0,050 | 0,033 | 1,510 | 33,516 | 111,024 | 399,685 | 92,564 | 333,230 | -61,303 |
| 0,100 | 0,033 | 2,989 | 18,498 | 83,727 | 301,417 | 79,400 | 285,840 | -26,564 |
| 0,150 | 0,034 | 4,409 | 12,780 | 69,285 | 249,427 | 67,569 | 243,248 | -15,326 |
| 0,200 | 0,035 | 5,744 | 9,876 | 60,343 | 217,235 | 59,449 | 214,016 | -10,350 |
| 0,250 | 0,036 | 6,975 | 8,159 | 54,101 | 194,764 | 53,554 | 192,793 | -7,678 |
| 0,300 | 0,037 | 8,086 | 7,050 | 49,451 | 178,024 | 49,077 | 176,678 | -6,069 |
| 0,350 | 0,039 | 9,074 | 6,289 | 45,818 | 164,947 | 45,543 | 163,954 | -5,019 |
| 0,400 | 0,040 | 10,000 | 5,711 | 42,882 | 154,375 | 42,669 | 153,609 | -4,267 |
| 0,450 | 0,042 | 10,661 | 5,358 | 40,442 | 145,590 | 40,265 | 144,953 | -3,777 |
| 0,500 | 0,044 | 11,261 | 5,075 | 38,375 | 138,150 | 38,225 | 137,610 | -3,395 |
| 0,550 | 0,047 | 11,763 | 4,859 | 36,595 | 131,742 | 36,464 | 131,269 | -3,100 |
| 0,600 | 0,049 | 12,245 | 4,669 | 35,042 | 126,151 | 34,926 | 125,733 | -2,852 |
| 0,650 | 0,052 | 12,449 | 4,593 | 33,669 | 121,208 | 33,561 | 120,819 | -2,696 |
| 0,700 | 0,055 | 12,662 | 4,516 | 32,446 | 116,806 | 32,345 | 116,443 | -2,554 |
| 0,750 | 0,059 | 12,803 | 4,466 | 31,347 | 112,849 | 31,252 | 112,506 | -2,441 |
| 0,800 | 0,062 | 12,903 | 4,432 | 30,352 | 109,268 | 30,261 | 108,941 | -2,346 |
| 0,850 | 0,066 | 12,907 | 4,430 | 29,446 | 106,006 | 29,358 | 105,689 | -2,275 |
| 0,900 | 0,070 | 12,888 | 4,437 | 28,616 | 103,018 | 28,530 | 102,708 | -2,214 |
| 0,950 | 0,074 | 12,831 | 4,456 | 27,853 | 100,269 | 27,768 | 99,966 | -2,164 |
| 1,014 | 0,0798 | 12,715 | 4,497 | 26,959 | 97,051 | 26,876 | 96,752 | -2,114 |
| 1,050 | 0,083 | 12,630 | 4,527 | 26,492 | 95,371 | 26,409 | 95,073 | -2,091 |
| 1,100 | 0,088 | 12,497 | 4,575 | 25,882 | 93,175 | 25,799 | 92,878 | -2,064 |
| 1,150 | 0,093 | 12,347 | 4,630 | 25,312 | 91,123 | 25,229 | 90,826 | -2,043 |
| 1,200 | 0,099 | 12,183 | 4,693 | 24,778 | 89,201 | 24,695 | 88,902 | -2,027 |
| 1,250 | 0,104 | 12,013 | 4,758 | 24,276 | 87,394 | 24,193 | 87,093 | -2,014 |
| 1,300 | 0,110 | 11,834 | 4,830 | 23,804 | 85,693 | 23,719 | 85,388 | -2,004 |
| 1,350 | 0,116 | 11,651 | 4,906 | 23,357 | 84,086 | 23,272 | 83,778 | -1,997 |
| 1,400 | 0,122 | 11,475 | 4,980 | 22,935 | 82,566 | 22,849 | 82,255 | -1,991 |
| 1,450 | 0,129 | 11,274 | 5,069 | 22,535 | 81,125 | 22,446 | 80,807 | -1,991 |
| 1,500 | 0,135 | 11,086 | 5,154 | 22,154 | 79,756 | 22,065 | 79,433 | -1,990 |
| 1,550 | 0,142 | 10,896 | 5,244 | 21,793 | 78,453 | 21,701 | 78,125 | -1,992 |
| 1,600 | 0,149 | 10,710 | 5,335 | 21,448 | 77,212 | 21,355 | 76,878 | -1,994 |
| 1,650 | 0,157 | 10,523 | 5,429 | 21,119 | 76,027 | 21,024 | 75,686 | -1,998 |
| 1,720 | 0,1675 | 10,269 | 5,562 | 20,682 | 74,456 | 20,585 | 74,105 | -2,005 |

Příloha č. 2

| Ct [1] | Co [1] | K [1] | γ [°] | V[m/s] | V[km/h] | Vx[m/s] | Vx[km/h] | Vz[m/s] |
|--------|--------|-------|--------------|--------|---------|---------|----------|---------|
| 0,000 | 0,149 | 0,000 | 90,000 | 70,436 | 253,568 | 0,000 | 0,000 | -70,436 |
| 0,050 | 0,149 | 0,335 | 71,463 | 68,558 | 246,808 | 21,796 | 78,466 | -65,001 |
| 0,100 | 0,149 | 0,669 | 56,214 | 64,115 | 230,815 | 35,654 | 128,356 | -53,287 |
| 0,150 | 0,150 | 1,000 | 45,004 | 59,029 | 212,504 | 41,737 | 150,252 | -41,743 |
| 0,200 | 0,151 | 1,326 | 37,016 | 54,325 | 195,504 | 43,377 | 156,156 | -32,706 |
| 0,250 | 0,152 | 1,646 | 31,273 | 50,272 | 180,979 | 42,968 | 154,684 | -26,097 |
| 0,300 | 0,153 | 1,960 | 27,037 | 46,848 | 168,653 | 41,728 | 150,222 | -21,295 |
| 0,400 | 0,156 | 2,564 | 21,306 | 41,494 | 149,378 | 38,658 | 139,168 | -15,077 |
| 0,450 | 0,158 | 2,844 | 19,371 | 39,366 | 141,719 | 37,138 | 133,697 | -13,057 |
| 0,500 | 0,160 | 3,117 | 17,786 | 37,520 | 135,073 | 35,727 | 128,617 | -11,461 |
| 0,550 | 0,163 | 3,379 | 16,485 | 35,900 | 129,239 | 34,424 | 123,926 | -10,187 |
| 0,600 | 0,165 | 3,628 | 15,412 | 34,463 | 124,068 | 33,224 | 119,607 | -9,159 |
| 0,650 | 0,168 | 3,864 | 14,508 | 33,181 | 119,452 | 32,123 | 115,643 | -8,313 |
| 0,700 | 0,171 | 4,010 | 13,749 | 32,028 | 115,299 | 31,110 | 111,995 | -7,612 |
| 0,750 | 0,175 | 4,296 | 13,103 | 30,983 | 111,540 | 30,176 | 108,635 | -7,024 |
| 0,800 | 0,178 | 4,494 | 12,544 | 30,033 | 108,118 | 29,316 | 105,537 | -6,523 |
| 0,850 | 0,182 | 4,674 | 12,076 | 29,162 | 104,983 | 28,517 | 102,660 | -6,101 |
| 0,900 | 0,186 | 4,843 | 11,666 | 28,362 | 102,102 | 27,776 | 99,994 | -5,735 |
| 0,950 | 0,190 | 4,999 | 11,312 | 27,623 | 99,441 | 27,086 | 97,509 | -5,418 |
| 1,000 | 0,194 | 5,155 | 10,979 | 26,939 | 96,979 | 26,446 | 95,204 | -5,130 |
| 1,050 | 0,199 | 5,273 | 10,739 | 26,300 | 94,680 | 25,839 | 93,022 | -4,900 |
| 1,100 | 0,204 | 5,386 | 10,508 | 25,705 | 92,538 | 25,274 | 90,986 | -4,688 |
| 1,150 | 0,209 | 5,499 | 10,307 | 25,148 | 90,533 | 24,742 | 89,072 | -4,500 |
| 1,200 | 0,215 | 5,594 | 10,135 | 24,625 | 88,651 | 24,241 | 87,268 | -4,333 |
| 1,250 | 0,220 | 5,681 | 9,984 | 24,133 | 86,880 | 23,768 | 85,564 | -4,184 |
| 1,300 | 0,226 | 5,756 | 9,856 | 23,669 | 85,209 | 23,320 | 83,952 | -4,051 |
| 1,350 | 0,232 | 5,822 | 9,746 | 23,231 | 83,632 | 22,896 | 82,426 | -3,932 |
| 1,400 | 0,238 | 5,879 | 9,653 | 22,815 | 82,135 | 22,492 | 80,972 | -3,826 |
| 1,450 | 0,245 | 5,928 | 9,575 | 22,421 | 80,716 | 22,109 | 79,591 | -3,730 |
| 1,500 | 0,251 | 5,969 | 9,511 | 22,046 | 79,366 | 21,743 | 78,276 | -3,643 |
| 1,550 | 0,258 | 6,002 | 9,459 | 21,689 | 79,082 | 21,394 | 77,020 | -3,565 |
| 1,600 | 0,265 | 6,028 | 9,419 | 21,349 | 76,857 | 21,061 | 75,820 | -3,494 |
| 1,650 | 0,273 | 6,048 | 9,388 | 21,024 | 75,686 | 20,742 | 74,673 | -3,429 |
| 1,700 | 0,280 | 6,062 | 9,367 | 20,713 | 74,567 | 20,437 | 73,573 | -3,371 |
| 1,750 | 0,288 | 6,070 | 9,355 | 20,415 | 73,496 | 20,144 | 72,518 | -3,319 |
| 1,804 | 0,297 | 6,074 | 9,349 | 20,106 | 72,382 | 19,839 | 71,421 | -3,266 |
| 1,850 | 0,305 | 6,073 | 9,351 | 19,856 | 71,482 | 19,592 | 70,532 | -3,226 |
| 1,900 | 0,313 | 6,066 | 9,361 | 19,593 | 70,534 | 19,332 | 69,595 | -3,187 |
| 1,950 | 0,322 | 6,058 | 9,374 | 19,340 | 69,623 | 19,081 | 68,693 | -3,150 |
| 2,000 | 0,331 | 6,042 | 9,397 | 19,096 | 68,745 | 18,840 | 67,822 | -3,118 |
| 2,050 | 0,340 | 6,028 | 9,420 | 18,861 | 67,899 | 18,607 | 66,983 | -3,087 |
| 2,100 | 0,350 | 6,008 | 9,450 | 18,634 | 67,083 | 18,381 | 66,172 | -3,059 |
| 2,150 | 0,359 | 5,986 | 9,485 | 18,415 | 66,295 | 18,163 | 65,389 | -3,035 |
| 2,200 | 0,369 | 5,960 | 9,524 | 18,204 | 65,533 | 17,953 | 64,631 | -3,012 |
| 2,250 | 0,379 | 5,933 | 9,567 | 17,999 | 64,797 | 17,749 | 63,896 | -2,991 |
| 2,300 | 0,390 | 5,904 | 9,613 | 17,801 | 64,085 | 17,551 | 63,185 | -2,973 |
| 2,350 | 0,400 | 5,873 | 9,663 | 17,610 | 63,394 | 17,360 | 62,495 | -2,956 |
| 2,400 | 0,411 | 5,839 | 9,718 | 17,424 | 62,725 | 17,174 | 61,825 | -2,941 |
| 2,450 | 0,422 | 5,806 | 9,772 | 17,244 | 62,078 | 16,994 | 61,178 | -2,927 |
| 2,500 | 0,445 | 5,771 | 10,086 | 17,069 | 61,448 | 16,805 | 60,498 | -2,989 |
| 2,550 | 0,445 | 5,734 | 9,892 | 16,899 | 60,837 | 16,648 | 59,932 | -2,903 |
| 2,600 | 0,456 | 5,697 | 9,956 | 16,734 | 60,243 | 16,482 | 59,336 | -2,893 |
| 2,650 | 0,468 | 5,658 | 10,022 | 16,574 | 59,666 | 16,321 | 58,756 | -2,884 |
| 2,700 | 0,480 | 5,619 | 10,091 | 16,418 | 59,105 | 16,164 | 58,190 | -2,877 |
| 2,750 | 0,493 | 5,578 | 10,164 | 16,266 | 58,558 | 16,011 | 57,639 | -2,870 |
| 2,800 | 0,506 | 5,539 | 10,234 | 16,119 | 58,027 | 15,862 | 57,104 | -2,864 |
| 2,850 | 0,518 | 5,498 | 10,308 | 15,975 | 57,509 | 15,717 | 56,580 | -2,859 |
| 2,900 | 0,531 | 5,457 | 10,384 | 15,834 | 57,004 | 15,575 | 56,070 | -2,854 |
| 2,950 | 0,545 | 5,416 | 10,462 | 15,698 | 56,511 | 15,467 | 55,680 | -2,851 |
| 3,050 | 0,572 | 5,332 | 10,622 | 15,434 | 55,563 | 15,170 | 54,611 | -2,845 |