

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Pavlović

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Milan Opalić, dipl. ing.

Student:

Ivan Pavlović

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Milanu Opaliću i asistentu dr.sc. Zoranu Domitranu na pruženoj pomoći i svim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Osobito se zahvaljujem roditeljima i obitelji na svojoj podršci tijekom školovanja.

Ivan Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Pavlović**

Mat. br.: 0035158346

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vitlo za vuču parajedrilice**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Paragliding tow winch**

Opis zadatka:

Polijetanje parajedrilice moguće je ostvariti spuštanjem parajedrilice niz padinu ili pomoću vitla za vuču parajedrilice. Podizanje pomoću vitla ostvaruje se kontroliranim vučenjem pilota s parajedrilicom preko užeta uz osiguravanje odgovarajuće sile u užetu i relativnu brzinu parajedrilice. Brzina povlačenja ovisi o vremenskih uvjeta koji moraju biti u granicama minimalnih propisanih za sigurno letenje parajedrilice. Podizanje parajedrilice moguće je izvršiti na odgovarajućim terenima kao što su sportski aerodromi ili velike ravne površine bez prepreka. Prema izvedbi vitla za vuču parajedrilice moguće je podijeliti vitla u dvije osnovne grupe, na stacionarna vitla i vitla koja koriste brzinu vozila za ostvarivanje dovoljne brzine povlačenja (*en. Payout*).

Iskustvenim podacima dobivena je maksimalna sila kojom je dopušteno vući parajedrilice u iznosu od $F_v=1500$ N za koju je parajedrilica projektirana, te brzina povlačenja užeta koja iznositi $v_u \geq 15$ m/s. Potrebno je projektirati i razraditi uređaj za stacionarnu vuču parajedrilica prema zadanim parametrima.

Uz rad priložiti podatke odabranih standardiziranih proizvoda.

Kompletno konstrukcijsko rješenje razraditi do razine radioničkih crteža.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

13. ožujka 2014.

Rok predaje rada:

15. svibnja 2014.

Predviđeni datumi obrane:

21., 22. i 23. svibnja 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Milan Opalić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	XIV
SUMMARY	XV
1. UVOD.....	1
1.1. Općenito o padobranskom jedrenju	2
1.2. Aerodinamika leta	2
1.2.1. Otpor	3
1.2.2. Uzgon.....	3
1.2.3. Brzina leta	3
1.2.4. Planiranje i vertikalna brzina	3
1.2.5. Napadni kut.....	4
1.2.6. Geometrija krila i masa jedrilice	4
1.2.7. Aerodinamične sile	4
1.3. Oprema za padobransko jedrenje	5
2. VUČA PARAJEDRILICA	7
2.1. Osnove vuče parajedrilica.....	7
2.2. Osnovne preporuke za vuču parajedrilica	7
2.3. Dodatna oprema za vuču.....	8
2.3.1. Sustav otpuštanja	8
2.3.2. Uzde	9
2.3.3. Slaba karika.....	9
2.3.4. Pomoćni padobran.....	9
2.3.5. Užad za vuču.....	9
2.4. Sile prilikom vuče	9
2.4.1. Sile i potrebna snaga tijekom namatanja užeta s pomoćnim padobranom	10
2.4.2. Sile tijekom vuče u ovisnosti o brzini	12
3. PREGLED POSTOJEĆIH RJEŠENJA	15
3.1. Statička vitla.....	15
3.2. Pay-out vitla	16
3.3. Hibridna vitla	17
4. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA.....	19
4.1. Definicija problema.....	19
4.2. Razrada funkcionalne strukture	19
4.2.1. Apstrakcija problema	19
4.2.2. Funkcijska struktura uređaja	20
4.2.3. Morfološka matrica	21

4.3. Odabir koncepta	25
4.3.1. Koncept 1	25
4.3.2. Koncept 2	26
4.3.3. Koncept 3	28
4.3.4. Izbor koncepta.....	28
5. TEHNIČKI PRORAČUN.....	29
5.1. Dimenzioniranje i izbor užeta	29
5.2. Proračun bubnja	30
5.2.1. Proračun stijenke bubnja.....	31
5.2.1.1. Provjera stijenke bubnja prema naprezanjima uslijed namatanja opterećenog užeta (prolom).....	31
5.2.1.2. Naprezanje uslijed savijanja bubnja i progib bubnja	33
5.2.2. Veza vijenca s bubnjem	34
5.2.2.1. Vijčani spoj vijenca.....	35
5.2.2.2. Zavareni spoj vijenca	36
5.2.3. Veza užeta s bubnjem	37
5.3. Izbor elektromotora.....	38
5.4. Izbor planetarnog prijenosnika.....	40
5.4.1. Odabir prijenosnog omjera prilikom vuče	40
5.5. Proračun remenskog prijenosa	41
5.6. Izbor spojki	44
5.6.1. Spojka 1 – vuča parajedrilice.....	44
5.6.2. Spojka 2 – namatanje užeta s malim padobranom.....	45
5.7. Vratila – dimenzioniranje i kontrolni proračun.....	46
5.7.1. Vratilo 1 – izlazno vratilo elektromotora i vratilo remenice 1.....	46
5.7.2. Vratilo 2 remenice 2.....	47
5.7.3. Vratilo 3 zupčanika 3	49
5.7.4. Vratilo 4 – ulazno vratilo planetarnog prijenosnika.....	51
5.7.5. Vratilo 5 – vratilo bubnja.....	53
5.8. Izbor ležaja	55
5.8.1. Ležaj vratila 2.....	55
5.8.2. Ležaj vratila 3.....	56
5.8.3. Ležajevi bubnja	56
5.9. Proračun pera	58
5.9.1. Spoj remenice 1 i vratila 1	58
5.9.2. Spoj remenice 2 i vratila 2, spojke 2 i vratila 2 i spojke 2 i vratila 3.....	58
5.9.3. Spoj remenice 3 i vratila 3	58
5.9.4. Spoj spojke 1 i vratila 1 i spojke 1 i vratila 4.....	59
5.10. Sustav za koaksijalno namatanje užeta	59
5.10.1. Vreteno za namatanje.....	59
5.10.2. Remenski prijenos.....	59
6. ZAKLJUČAK.....	61
LITERATURA.....	63
PRILOZI.....	64

POPIS SLIKA

Slika 1.	Padobranska jedrilica	1
Slika 2.	Aerodinamični profil	2
Slika 3.	Aerodinamične sile.....	5
Slika 4.	Krilo parajedrilice.....	6
Slika 5.	Oprema za vuču parajedrilice.....	8
Slika 6.	Vučni lanac.....	9
Slika 7.	Promjena sile tijekom vuče	10
Slika 8.	Sila vuče na padobranu.....	11
Slika 9.	Odnos brzine vuče i apsolutne brzine leta.....	12
Slika 10.	Brzina leta i vuče prilikom uzleta.....	13
Slika 11.	Brzina leta i vuče pri vršnom opterećenju.....	13
Slika 12.	Ovisnost brzine užeta i sile vuče	13
Slika 13.	Ovisnost brzine užeta i potrebne snage	14
Slika 14.	Statičko vitlo s benzinskim motorom.....	15
Slika 15.	Pay-out vitlo s remenskim kočenjem	16
Slika 16.	Hibridno vitlo s benzinskim motorom.....	17
Slika 17.	Black Box model sustava	19
Slika 18.	Koncept 1	26
Slika 19.	Koncept 2	27
Slika 20.	Koncept 3	27
Slika 21.	Aramidna jezgra Technora užeta.....	29
Slika 22.	Naprezanje elementa stjenke bubnja	32
Slika 23.	Moment savijanja bubnja	33
Slika 24.	Elektromotor Letrika AMK 4690 IM0388.....	39
Slika 25.	Planetarni prijenosnik APEX Dynamics AE090.....	41
Slika 26.	Remen tipa HTD	41
Slika 27.	Elektromagnetska spojka Mayr ROBATIC 4 / 500.211.0 / 24	44
Slika 28.	Ležaj FAG PCJ15.....	55
Slika 29.	Ležaj FAG PCJ17.....	56
Slika 30.	Ležaj FAG HK5020	57
Slika 31.	Ležaj FAG PCF30.....	57
Slika 32.	Vitlo za vuču parajedrilice	62

POPIS TABLICA

Tablica 1. Pregled vrsta vitla za vuču parajedrilice.....	18
Tablica 2. Morfološka matrica	21
Tablica 3. Osnovni pregled koncepata	25
Tablica 4. Pregled prednosti i nedostataka koncepata.....	28
Tablica 5. Dimenzije planetarnog prijenosnika APEX Dynamics AE090.....	41
Tablica 6. Dimenzije spojke 1	45
Tablica 7. Dimenzije spojke 2.....	45

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
DR-2014-00-00-00	Vitlo za vuču parajedrilice
DR-2014-00-00-01	Prirubnica
DR-2014-00-00-02	Spojница za uže
DR-2014-00-00-03	Postolje
DR-2014-00-00-04	Vreteno
DR-2014-00-00-05	Osovina 1
DR-2014-00-00-06	Remenica 6
DR-2014-00-00-07	Remenica 1
DR-2014-00-00-08	Remenica 2
DR-2014-00-00-09	Remenica 3
DR-2014-00-00-10	Remenica 5
DR-2014-00-00-11	Vratilo 1
DR-2014-00-00-12	Vratilo 2
DR-2014-00-00-13	Vratilo 3
DR-2014-00-00-14	Vratilo 4
DR-2014-00-00-15	Remenica 4
DR-2014-00-00-16	Osovina 3
DR-2014-00-01-00	Zavareni sklop bubnja
DR-2014-00-01-01	Bubanj
DR-2014-00-01-02	Ploča bubnja 1
DR-2014-00-01-03	Ploča bubnja 2
DR-2014-00-01-04	Ploča bubnja 3
DR-2014-00-01-05	Vratilo bubnja
DR-2014-00-02-00	Poklopac bubnja
DR-2014-00-02-01	Ploča bubnja 4
DR-2014-00-02-02	Čahura
DR-2014-00-03-00	Nosiva konstrukcija 1
DR-2014-00-03-01	Ploče i rebra

DR-2014-00-04-00	Nosiva konstrukcija 2
DR-2014-00-04-01	Distantna ploča
DR-2014-00-04-02	Cijev 1
DR-2014-00-05-00	Vodilica
DR-2014-00-05-01	Osovina 2
DR-2014-00-05-02	Kontaktni modul
DR-2014-00-05-03	Matica
DR-2014-00-05-04	Ploča vodilice
DR-2014-00-05-05	Osovina 6
DR-2014-00-05-06	Nož
DR-2014-00-05-07	Stup noža
DR-2014-00-05-08	Držac noža
DR-2014-00-05-09	Zglob poluge
DR-2014-00-05-10	Poluga
DR-2014-00-06-00	Sklop zatezne remenice
DR-2014-00-06-01	Vijak M
DR-2014-00-06-02	Matica M
DR-2014-00-06-03	Kotač
DR-2014-00-06-04	Osovina 4
DR-2014-00-06-05	Osovina 5
DR-2014-00-06-06	Oslonac kotača

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{jez}	mm ²	Površina jezgre vijka
A_V	mm ²	Površina jezgre vijka za spoj užeta i bubnja
a_R	mm	Osni razmak remenskog prijenosa
a_{RN}	mm	Osni razmak remenskog prijenosa sustava za koaksijalno namatanje
a'_R	mm	Stvarni osni razmak remenskog prijenosa
a'_{RN}	mm	Stvarni osni razmak remenskog prijenosa sustava za koaksijalno namatanje
a	mm	Debljina zavara
b_1		Faktor veličine strojnog dijela kod uvijanja i savijanja
b_1		Faktor kvalitete površinske obrade
b_{R2}	mm	Širina remena 2
C	N	Ekvivalentno opterećenje ležaja
C_R	N	Dinamička nosivost ležaja
C_0		Faktor otpora
C_u		Faktor uzgona
c		Faktor opterećenja za prijenos zupčastim remenom
c_p		Faktor pregiba užeta
D_{IV5}	mm	Vanjski promjer presjeka 1 vratila 5
D_b	mm	Promjer bubnja
D_h	mm	Promjer ploče bubnja
D_u	mm	Unutarnji promjer bubnja
d	mm	Promjer spoja vijenca i vratila bubnja
d_{IV2}	mm	Promjer presjeka 1 vratila 2
d_{IV3}	mm	Promjer presjeka 1 vratila 3
d_{2V3}	mm	Promjer presjeka 2 vratila 3
d_{2V2}	mm	Promjer presjeka 2 vratila 2
d_{IV4}	mm	Promjer presjeka 1 vratila 4
d_{IV5}	mm	Unutarnji promjer presjeka 1 vratila 5
d_{2V5}	mm	Promjer presjeka 2 vratila 5
d_1	mm	Promjer diobene kružnice remenice 1
d_2	mm	Promjer diobene kružnice remenice 2
d_3	mm	Promjer diobene kružnice remenice 3
d_4	mm	Promjer diobene kružnice remenice 4
d_5	mm	Promjer diobene kružnice remenice 5

d_6	mm	Promjer diobene kružnice remenice 6
d_7	mm	Promjer vijčanog spoja na vijencu bubnja
d_u	mm	Promjer užeta
d_{v1}	mm	Promjer jezgre vijka
d_{V1}	mm	Promjer vratila 1
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
F_A	N	Aerodinamična sila
F_N	N	Normalna sila u vijku
F_R	N	Sila otpora
F_{R1}	N	Sila u remenu 1
F_{R2}	N	Sila u remenu 2
F_{r2}	N	Radijalna sila vratila 2
F_{r3}	N	Radijalna sila vratila 3
F_{r5}	N	Radijalna sila vratila 5
F_t	N	Sila u zavaru
F_{t1}	N	Obodna sila na vratilu 1
F_{t2}	N	Obodna sila na vratilu 2
F_{t3}	N	Obodna sila na vratilu 3
F_{t4}	N	Obodna sila na vratilu 4
F_U	N	Sila uzgona
F_u	N	Sila u užetu
F_V	N	Sila u užetu pred ulazom u vijčanu vezu
$F_{u\max}$	N	Maksimalna sila u užetu
f		Faktor ispune
f_H		Faktor tvrdoće
G	N	Težina parajedrilice, pilota i opreme
h	mm	Visina veze užeta s bubnjem
h_n	mm	Ukupna visina slojeva namotanog užeta
h_{P1}	mm	Visina pera 1
h_{P2}	mm	Visina pera 2
h_{P3}	mm	Visina pera 3
h_{P4}	mm	Visina pera 4
h_{R2}	mm	Visina zuba remenica 3 i 4
I_y	mm ⁴	Moment tromosti poprečnog presjeka bubnja
i		Broj pera
i_{PP}		Prijenosni omjer planetarnog prijenosnika
i_{PP1}		Potrebni prijenosni omjer prilikom polijetanja
i_{PP2}		Potrebni prijenosni omjer prilikom vršnog opterećenja
i_R		Teorijski prijenosni omjer remenskog prijenosa

i_{RN}		Prijenosni omjer remenskog prijenosa za koaksijalno namatanje
L	okr	Ukupni broj okretaja ležaja
L_{\max}	m	Maksimalna udaljenost polijetanja
L_{a1}	mm	Aktivna duljina remena 1
L_{a2}	mm	Aktivna duljina remena 2
L_{a3}	mm	Aktivna duljina remena 3
L_h	h	Vijek trajanja ležaja
l_b	m	Duljina bubnja
l_{t1}	mm	Nosiva duljina pera 1
l_{t2}	mm	Nosiva duljina pera 2
l_{t3}	mm	Nosiva duljina pera 3
l_{t4}	mm	Nosiva duljina pera 4
l_u	m	Duljina užeta
M_{2I}	Nm	Moment savijanja u presjeku 1 vratila 1
$M_{2N(S1)}$	Nm	Nominalni moment spojke 1
M_{3I}	Nm	Moment savijanja u presjeku 1 vratila 3
M_{3II}	Nm	Moment savijanja u presjeku 2 vratila 3
M_{5I}	Nm	Moment savijanja u presjeku 1 vratila 5
M_{5II}	Nm	Moment savijanja u presjeku 2 vratila 5
M_b	Nm	Maksimalni moment na bubnju
M_N	Nm	Nominalni moment elektromotora
M_{R3}	Nm	Moment na remenici 3
M'_{1red1}	Nm	Reducirani moment na vratilu 1
M'_{2red1}	Nm	Reducirani moment na vratilu 2
M'_{3red1}	Nm	Reducirani moment u presjeku 1 vratila 3
M'_{3red2}	Nm	Reducirani moment u presjeku 2 vratila 3
M'_{4red1}	Nm	Reducirani moment na vratilu 4
M'_{5red1}	Nm	Reducirani moment u presjeku 1 vratila 5
M'_{5red2}	Nm	Reducirani moment u presjeku 2 vratila 5
M_{1redI}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 1 vratila 1
M_{2redI}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 1 vratila 2
M_{3redI}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 1 vratila 3
M_{3redII}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 2 vratila 3
$M_{3redIII}$	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 3 vratila 3
M_{4redI}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 1 vratila 4
M_{5redI}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 1 vratila 5
M_{5redII}	Nm	Reducirani moment u kontrolnom presjeku 2 vratila 5
M_{S1}	Nm	Maksimalni moment na spojki 1

M_{S2}	Nm	Maksimalni moment na spojki 2
m_{EM}	kg	Masa elektromotora
m_{PP}	kg	Masa planetarnog prijenosnika
m_{R1}	mm	Modul remena 1
m_{R2}	mm	Modul remena 2
m_{R3}	mm	Modul remena 3
m_{S1}	kg	Masa spojke 1
m_{S2}	kg	Masa spojke 2
n		Broj namotaja užeta na bubnju
n_{B1}	min ⁻¹	Brzina bubnja prilikom polijetanja
n_{B2}	min ⁻¹	Brzina bubnja prilikom vršnog opterećenja
n_{Bmax}	min ⁻¹	Maksimalna brzina bubnja
$n_{max S1}$	min ⁻¹	Maksimalna dopuštena brzina spojke 1
$n_{max S2}$	min ⁻¹	Maksimalna dopuštena brzina spojke 2
n_{V2}	min ⁻¹	Brzina vrtnje vratila 2
n_{V3}	min ⁻¹	Brzina vrtnje vratila 3
n_{V5}	min ⁻¹	Brzina vrtnje vratila 5
n_N	min ⁻¹	Nominalna brzina elektromotora
n_u		Broj namotaja po jednom sloju užeta na bubnju
n_v		Broj vijaka na vijencu bubnja
p	N/mm ²	Bočni tlak na pero
p_{Dop}	N/mm ²	Dopušteni bočni tlak na pero
P	W	Snaga vuče
$P_{20(S1)}$	W	Snaga spojke 1
$P_{20(S2)}$	W	Snaga spojke 2
P_{EM}	kW	Snaga elektromotora
P_{gB}	W	Gubici na bubnju
P_{gL}	W	Gubici valjnog ležaja
P_{guk}	W	Ukupni gubici
P_{gPP}	W	Gubici planetarnog prijenosnika
P_h	mm	Korak uspona navoja na vretenu
P_{potr}	W	Maksimalna potrebna snaga vuče
P_{max}	W	Maksimalna snaga bez gubitaka
p_{dop}	N/mm ²	Dopušteni tlak bokova zubi remenica 3 i 4
P_{NU}	W	Snaga namatanja užeta
R_{A2}	N	Reakcija u osloncu A vratila 2
R_{A3}	N	Reakcija u osloncu A vratila 3
R_{A5}	N	Reakcija u osloncu A vratila 5

R_{B2}	N	Reakcija u osloncu B vratila 2
R_{B5}	N	Reakcija u osloncu B vratila 5
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja vijka
R_{mu}	N/mm ²	Vlačna čvrstoća užeta
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća materijala vratila
S	m ²	Projicirana površina tijela u letu
S_{1I}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 1 vratila 1
S_{2I}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 1 vratila 2
S_{3I}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 1 vratila 3
S_{3II}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 2 vratila 3
S_{3III}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 3 vratila 3
S_{4I}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 1 vratila 4
S_{5I}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 1 vratila 5
S_{5II}		Sigurnost u kontrolnom presjeku 2 vratila 5
S_{potr}		Potrebna sigurnost vratila
S_u		Faktor sigurnosti za pogonsku užad
S_v		Faktor sigurnosti za vijčani spoj bubnja
$S2$	min	Trajanje maksimalnog kratkotrajnog preopterećenja
$S3$	%	Udio periodičnih preopterećenja
s	mm	Debljina stjenke bubnja
T_{2N}	Nm	Nominalni moment planetarnog prijenosnika
T_{2NOT}	Nm	Isključni moment planetarnog prijenosnika
T_{V1}	Nm	Okretni moment vratila 1
T_{V2}	Nm	Okretni moment vratila 2
T_{V3}	Nm	Okretni moment vratila 3
T_{V4}	Nm	Okretni moment vratila 4
T_{V5}	Nm	Okretni moment vratila 5
t	s	Vrijeme
t_{R1}	mm	Korak remena 1
t_{R2}	mm	Korak remena 2
t_{R3}	mm	Korak remena 3
t_u	mm	Aksijalna udaljenost dvaju susjednih slojeva užeta na bubnju
U_{EM}	V	Napon elektromotora
u_R		Stvarni prijenosni omjer remenskog prijenosa
v	m/s	Apsolutna brzina tijela u letu
v_p	m/s	Apsolutna brzina parajedrilice
v_{min}	m/s	Minimalna apsolutna brzina parajedrilice
v_{R2}	m/s	Brzina remena 2

v_u	m/s	Brzina užeta
v_{u1}	m/s	Brzina užeta prilikom polijetanja
v_{u2}	m/s	Brzina užeta prilikom vršnog opterećenja
$v_{u \max}$	m/s	Maksimalna brzina užeta
W_{1I}	mm ³	Moment otpora presjeka 1 vratila 1
W_{2I}	mm ³	Moment otpora presjeka 1 vratila 2
W_{3I}	mm ³	Moment otpora presjeka 1 vratila 3
W_{3II}	mm ³	Moment otpora presjeka 2 vratila 3
W_{3III}	mm ³	Moment otpora presjeka 3 vratila 3
W_{4I}	mm ³	Moment otpora presjeka 1 vratila 4
W_{5I}	mm ³	Moment otpora presjeka 1 vratila 5
W_{5II}	mm ³	Moment otpora presjeka 2 vratila 5
W_b	mm ³	Moment otpora poprečnog presjeka bubnja
w	mm	Debljina čelne ploče bubnja
w_{\max}	mm	Maksimalni progib bubnja
z		Broj vijaka veze užeta i bubnja
z_1		Broj zubi remenice 1
z_2		Broj zubi remenice 2
z_3		Broj zubi remenice 3
z_4		Broj zubi remenice 4
z_5		Broj zubi remenice 5
z_6		Broj zubi remenice 6
z_{z3}		Broj zubi u zahvatu remenice 3
α	°	Napadni kut
α_0		Faktor čvrstoće
α_1	°	Kut između vektora brzine užeta i apsolutne brzine parajedrilice
α_2	rad	Obuhvatni kut užeta u spoju s bubnjem
β	°	Kut planiranja
β_1	rad	Obuhvatni kut remenica 1 i 2
β_2	rad	Obuhvatni kut remenice 3
β_3	rad	Obuhvatni kut remenice 5
β_{kf}		Faktor zareznog djelovanja kod savijanja
β_{kt}		Faktor zareznog djelovanja kod uvijanja
η_B		Iskoristivost bubnja
η_L		Iskoristivost valjnog ležaja
η_R		Iskoristivost remenskog prijenosa u jednom stupnju
η_{R3}		Iskoristivost do remenice 3
η'_{uk}		Ukupna iskoristivost prilikom vuče

μ		Faktor trenja vijčanog spoja
μ_1		Faktor trenja vijčanog spoja užeta
μ_2		Faktor trenja zaobljenog žlijeba
ρ	kg/m ³	Gustoća fluida
σ_1	N/mm ²	Normalno naprezanje stjenke bubnja
σ_2	N/mm ²	Radijalno naprezanje stjenke bubnja
σ_3	N/mm ²	Cirkularno naprezanje stjenke bubnja
σ_d	N/mm ²	Dopušteno naprezanje bubnja uslijed savijanja
σ_{dop}	N/mm ²	Dopušteno naprezanje ploče bubnja
σ_{fDN}	N/mm ²	Trajna dinamička naizmjenična savojna čvrstoća
σ_{fDNdop}	N/mm ²	Dopušteno trajno dinamičko naizmjenično savojno naprezanje
$\sigma_{tDI dop}$	N/mm ²	Dopušteno trajno dinamičko istosmjerno savojno naprezanje
σ_{1redI}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 1 vratila 1
σ_{2redI}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 1 vratila 2
σ_{3redI}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 1 vratila 3
σ_{3redII}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 2 vratila 3
$\sigma_{3redIII}$	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 3 vratila 3
σ_{4redI}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 1 vratila 4
σ_{5redI}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 1 vratila 5
σ_{5redII}	N/mm ²	Reducirano naprezanje u kontrolnom presjeku 2 vratila 5
σ_{vdop}	N/mm ²	Dopušteno naprezanje u vijku
σ_x	N/mm ²	Normalno naprezanje stjenke bubnja
σ_φ	N/mm ²	Cirkularno naprezanje stjenke bubnja
τ	N/mm ²	Naprezanje u zavaru
τ_{dop}	N/mm ²	Dopušteno naprezanje u zavaru
τ_{tDI}	N/mm ²	Trajna dinamička istosmjerna uvojna čvrstoća

SAŽETAK

Širenjem padobranskog jedrenja u nizinske krajeve pojavila se potreba za mogućnošću lansiranja parajedrilica na terenima s velikom visinskom razlikom. Kao najraširenije rješenje pokazala su se vitla za vuču, bilo statička ili pokretna. U ograničenim prostorima bez dugih ravnih zaletnih terena statička vitla imaju prednost. Dosadašnja rješenja statičkih vitla su uglavnom kućne radinosti uz korištenje iskustvenih podataka leta parajedrilica.

U ovom radu dana je fizikalna analiza promjenjive sile koja djeluju na uređaj, njen odnos s također promjenjivom brzinom vuče te su dane rezultirajuće potrebe za snagom. Na temelju te analize pristupilo se metodičkoj razradi statičkog uređaja za vuču parajedrilica u kojoj je prikazan cijeli proces konstruiranja te cjelokupni tehnički proračun i potrebna tehnička dokumentacija.

Ključne riječi: parajedrilica; statičko vitlo; brzina užeta; sila vuče

SUMMARY

As paragliding spread to lowland areas a need arose to be able to launch paragliders without the need of terrain with large differences in altitude. Towing winches have proved themselves to be the most widespread and simplest solution, whether they are stationary or pay-out versions. In restricted areas which do not provide enough straight, empty, and flat driveways stationary winches are at an advantage. So far, stationary winch designs have been mostly home-made and are based on data gained from experience in paragliding.

This thesis provides a physical analysis of the varying force acting upon the device, its relation to the, also varying, towing speed, and the resulting power requirements. Based on this analysis a methodical elaboration of a static pay-in paragliding winch was done. This elaboration contains the entire design process as well as the entire technical calculation, and all the necessary technical documentation.

Key words: paraglider; stationary winch; line speed; tow force

1. UVOD

Padobransko jedrenje se od svojeg nastanka u današnjem obliku sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća značajno raširilo i kao rekreativni i kao natjecateljski sport. Zbog svoje relativne jednostavnosti, niske cijene i mogućnosti jednostavnog prijevoza potrebne opreme na željene lokacije padobransko jedrenje je postalo jedan od najraširenijih oblika letenja. Istovremeno, padobranske jedrilice, usprkos činjenici da ne posjeduju vlastiti pogon postižu značajne udaljenosti, od nekoliko desetaka za rekreativce do nekoliko stotina kilometara za najiskusnije pilote.

Padobransko jedrenje se najčešće povezuje s planinskim ili barem brežuljkastim područjima zbog činjenice da je najlakše polijetanje ostvariti na kosim terenima, a zbog visinske razlike je moguće prijeći veće udaljenosti. Kao alternativa planinama u nizinskim predjelima je sve aktualnije vuča parajedrilica pomoću specijalnih vitla koja pomoću potezne sile daju letjelicama potrebnu brzinu i visinu. Vitla za vuču su još uvijek dosta kompliciranija alternativa jednostavnom uzletu s padine te na tom području ima dosta mjesta za napredak, kako u samim metodama uzleta, tako i u sustavima za vuču.



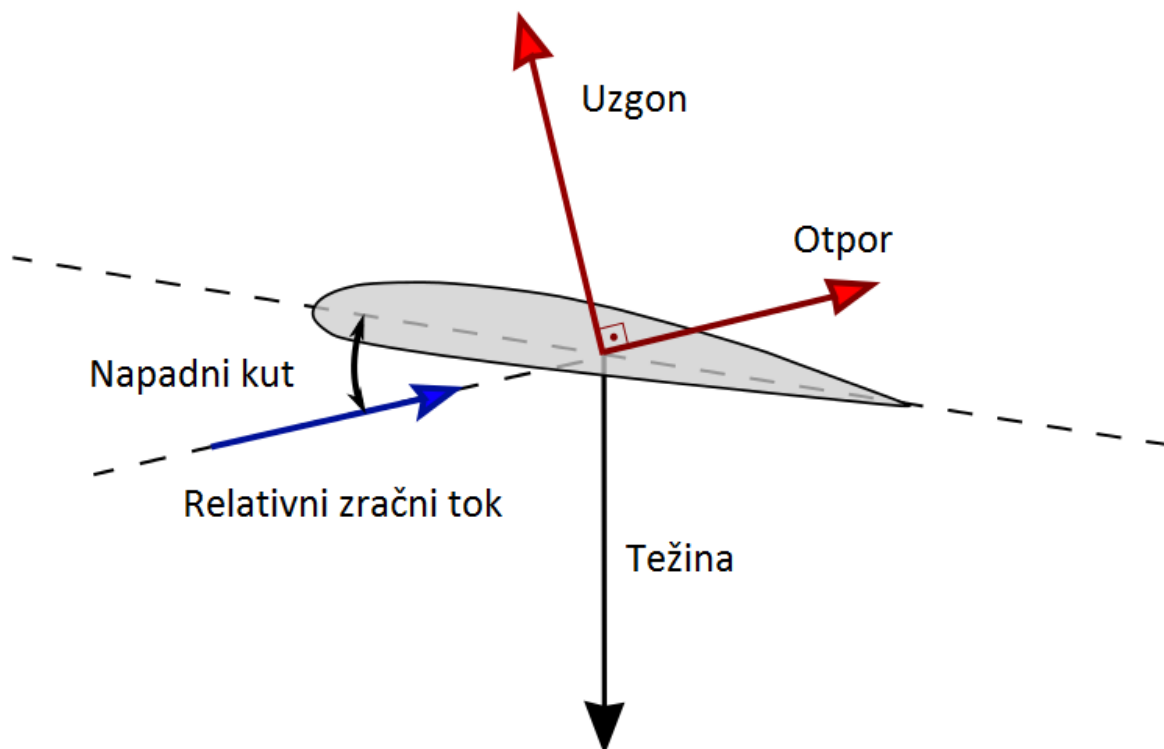
Slika 1. Padobranska jedrilica

1.1. Općenito o padobranskom jedrenju

Padobransko jedrenje je letenje u zračnim strujama s padobranskom jedrilicom [Slika 1], laganim zrakoplovom bez vlastitog pogona i bez krute osnovne konstrukcije. Pilot sjedi u pojasu koji je ovješten ispod padobranskog krila sastavljenog od većeg broja komora. Oblik krila se održava pomoću špagica koje spajaju padobran i pojas, tlaka zraka koji ulazi kroz otvore na čeonj strani krila te putem aerodinamičnih sila na vanjskoj konturi [7].

1.2. Aerodinamika leta

Padobranska jedrilica u svojoj je osnovi zasnovana na istim principima aerodinamike kao i drugi zrakoplovi to jest potrebno je da krilo što lakše klizi kroz fluid, u ovom slučaju zrak, te da istodobno drži letjelicu što duže u letu. To znači da otpor mora biti što manji, a uzgon što veći.



Slika 2. Aerodinamični profil

1.2.1. Otpor

Otpor definiramo kao silu (F_R) koja se suprotstavlja gibanju tijela te djeluje suprotnu smjeru gibanja tijela, a ovisi o brzini tijela (v), gustoći fluida (ρ), površini tijela (S) i faktoru otpora (C_0). Jednadžba otpora dana je jednadžbom (1):

$$F_R = C_0 \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \quad (1)$$

1.2.2. Uzgon

Najmanji koeficijent otpora u prirodi ima oblik suze te je on osnovni profil koji se primjenjuje u zrakoplovima pa tako i kod padobranskih jedrilica. Kod samog aerodinamičnog profila uzima se u obzir još i prije spomenuta potreba za uzgonom te se sukladno tome oblikuje i nesimetričan profil na način da je gornja površina veća od donje te fluidu koji struji s gornje strane treba duže nego li fluidu s donje strane što uzrokuje podtlak na gornjoj površini i predtlak na donjoj površini što u konačnici rezultira silom uzgona na krilo. U stvaranju uzgona podtlak sudjeluje s 2/3 udjela, a predtlak s 1/3. Smjer uzgona je okomit na smjer gibanja krila. Sila uzgona dana je jednadžbom (2):

$$F_U = C_u \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \quad (2)$$

U gornjoj jednadžbi F_U predstavlja silu uzgona, C_u faktor uzgona, ρ gustoću fluida, v brzinu krila u odnosu na okolni fluid, a S površinu krila.

1.2.3. Brzina leta

Gore spomenuta brzina leta (v) mora biti tolika da se osigura dovoljan tok zraka oko krila te time osigura potrebni uzgon. Minimalna brzina (v_{\min}) pri kojoj padobranske jedrilice još lete se kreće oko 5-6 m/s, a maksimalna brzina, koja je ograničena konstrukcijom jedrilice, se penje do nekih 20 m/s.

1.2.4. Planiranje i vertikalna brzina

Prilikom ravnornjelog leta jedrilica koja nema vlastiti pogon kontinuirano polagano gubi visinu zbog sile teže, a takvu vrstu leta zovemo planiranje. Kut pod kojim krilo planira u odnosu na horizontalu nazivamo kut planiranja (β), a kod padobranskih se jedrilica taj kut kreće između 7° i 12° .

Brzinu leta (v) možemo razdvojiti na horizontalnu i vertikalnu komponentu. Kada krilo mirno planira vertikalna komponenta je uvijek usmjerena prema dolje, okomito na horizontalnu podlogu. Padobranske jedrilice propadaju vertikalnom brzinom koja se kreće između 1 i 2 m/s.

Iz ovog se može dobiti i finesa koja je omjer visinske razlike i horizontalne udaljenosti koju jedrilica preleti. Finese za padobranske jedrilice se kreću od 1:6 do 1:8.

1.2.5. Napadni kut

Dužina koja na profilu krila spaja najizbočeniju točku na prednjem bridu krila i krajnju točku na stražnjem dijelu krila zove se tetiva profila. Kut koji zatvaraju tetiva profila i smjer relativnog toka fluida naziva se napadni kut (α) te o tom kutu ovisi brzina leta, veličina uzgona i otpora. Kad se prednji kraj krila nagne prema dolje napadni kut je pozitivan, a kad se nagne prema gore kut je negativan. Kod padobranskih jedrilica napadni kut mora biti pozitivan zbog mekane konstrukcije padobranske kupole i to u granicama koje ovise o specifičnom padobranu.

1.2.6. Geometrija krila i masa jedrilice

Površine kupola padobranskih jedrilica kreću se između 20 m² i 35 m². Raspon između krajnjih točaka krila kreće se od 8 m do 12 m. Treba imati na umu da se ti podaci odnose na potpuno raširenu kupolu, a ne na vertikalnu projekciju kupole formirane u letu koji su manji.

Vitkost padobranske jedrilice definira se kao omjer kvadrata raspona krila i površine krila. Što je vitkost veća krilo ima bolje karakteristike leta, ali je također i nestabilnije. Vitkost se kreće između 4 i 6.

Masa padobranskog krila kreće se između 3 kg i 7 kg, a ukupna masa krila, špagica, pojasa i ostale opreme kreće se između 12 kg i 22 kg.

1.2.7. Aerodinamične sile

Prilikom mirnog leta to jest jednolikog pravocrtnog gibanja sve sile koje djeluju na jedrilicu su u ravnoteži. Sile koje djeluju na jedrilicu su sljedeće:

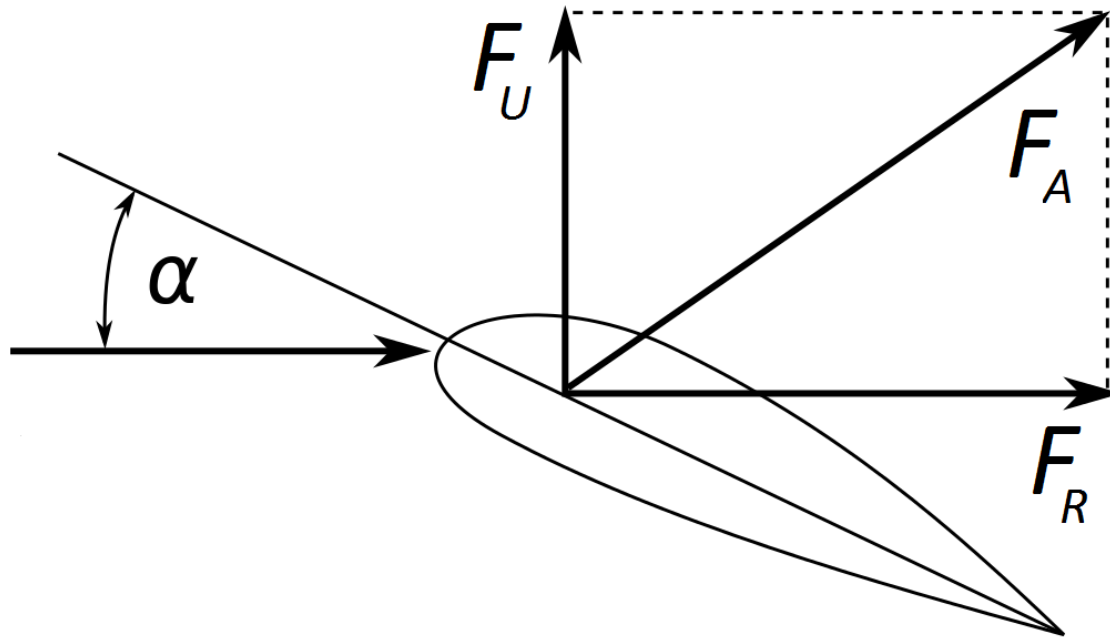
- Težina (G) djeluje prema dolje vertikalno te uključuje ukupnu težinu cijelog sustava (krilo, oprema, pilot).
- Otpor (F_R) djeluje suprotno od smjera gibanja.

- Uzgon (F_U) djeluje okomito na smjer gibanja.

Vektorski zbroj otpor i uzgona daje aerodinamičnu silu (F_A) koja uravnotežuje težinu.

Aerodinamična sila dana je jednadžbom (3):

$$\vec{F}_A = \vec{F}_R + \vec{F}_U = -\vec{G} \quad (3)$$



Slika 3. Aerodinamične sile

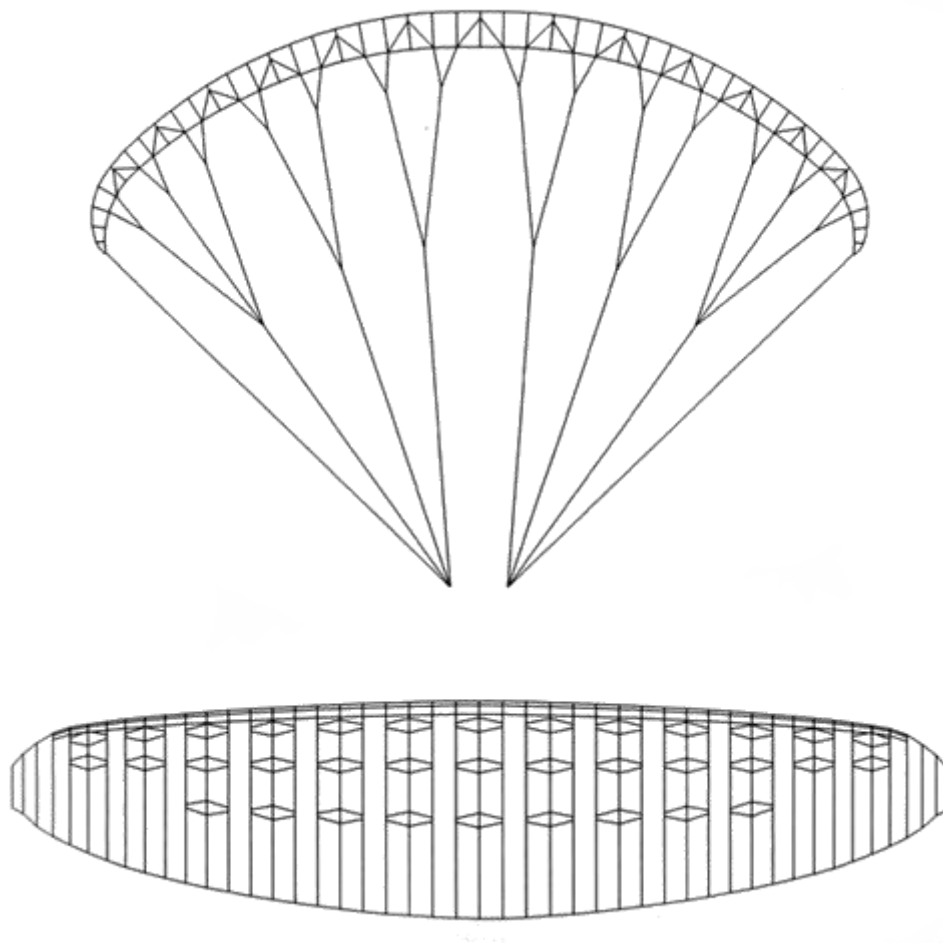
1.3. Oprema za padobransko jedrenje

Oprema za padobransko jedrenje dijeli se na sljedeće dijelove:

- Padobran
- Pojas (sjedalica koja nosi pilota)
- Kaciga, odjeća, obuća
- Rezervni padobran
- Instrumenti (variometar, GPS, radio)

Padobran za jedrenje se sastoji od triju osnovnih dijelova: kupole, špagica i nosivih traka. Kupola se sastoji od dva osnovna sloja tkanine (gornje i donje površine) koji su povezani

rebrima koja oblikuju komore duž krila. Rebra sadrže rupe da bi zrak slobodno strujao između komora radi izjednačavanja tlaka. Na prednjem bridu nalaze se otvori kroz koje ulazi zrak koji napuhne i formira padobran u oblik krila. Suvremeni padobrani izrađuju se od nepropusnih materijala poliestera ili najlona.



Slika 4. Krilo parajedrilice

2. VUČA PARAJEDRILICA

2.1. Osnove vuče parajedrilica

Dok se većina polijetanja padobranskih jedrilica ostvaruje spuštanjem niz padinu na ravnim terenima koriste se vitla za vuču. Visine na koju vitla mogu dići parajedrilicu kreću se od 300 m do 1200 m. U trenutku postizanja željene visine pilot odvaja užu od jedrilice te se užu uz pomoć malog padobrana vraća dok ga vitlo namotava natrag na bubanj.

Postoje dvije vrste vitla za vuču. Prva vrsta su statička vitla (tzv. Pay-in) koja vuku jedrilicu te motor mora zadovoljiti kompletne zahtjeve za snagom potrebnom za vuču. Početna udaljenost između jedrilice i vitla se najčešće kreće između 500 m i 1000 m.

Druga vrsta vitla su pokretna vitla (tzv. Pay-out), montirana na motorno vozilo (automobil ili čamac) koja mnogo sporije puštaju ili povlače užu, to jest služe za kontroliranje sile dok vozilo daje brzinu.

2.2. Osnovne preporuke za vuču parajedrilica

Kriteriji za sigurnu i efikasnu vuču padobranskih jedrilica su sljedeći [8] [9]:

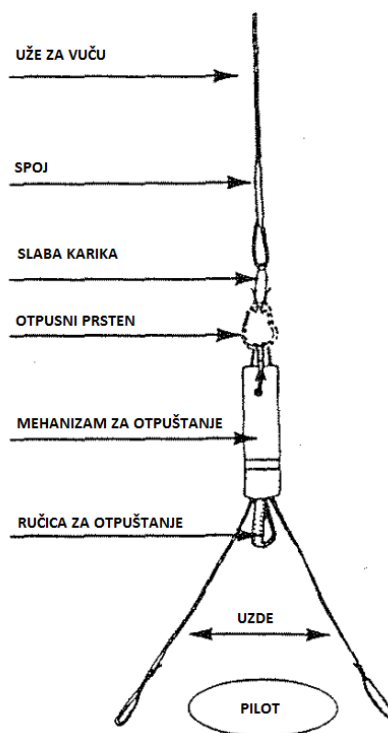
1. Konstantni smjer: smjer vučne sile mora biti stalan tijekom svih faza vučnog leta.
2. Konstantna napetost: sila u užetu mora biti stalna tijekom svih faza vučnog leta uz izuzetak polaganih povećanja sila tijekom izmjene geometrije između jedrilice i vitla.
3. Pouzdani senzor sila: sustav mora posjedovati pouzdani senzor za mjerenje opterećenja u užetu.
4. Spoj sa središtem masa: užu kroz koje djeluje sila mora biti spojeno što bliže središtu masa sustava preko pojasa na pilotu.
5. Polagani prijelazi: prijelazi iz mirovanja u vuču i iz vuče u mirovanje, kao i sve promjene u sili tijekom leta moraju biti postupene.
6. Pouzdani sustav otpuštanja: uređaji za otkapčanje i otpuštanje moraju biti potpuno pouzdani.
7. Slaba karika: sustav mora sadržavati pouzdanu slabu kariku koja će automatski otpustiti jedrilicu kad god silu u užetu prijeđe dopušteni iznos.

8. Sigurna metoda učenja: sustav mora sadržavati sigurnu metodu učenja te mogućnost postepenog napretka u znanju o samom sustavu.
9. Dovoljna snaga: sustav mora imati izvor snage koji zadovoljava potrebe za sigurnim letom tijekom vuče.
10. Osposobljena ekipa: sustavom mora upravljati ekipa u dovoljnom broju i osposobljena u vidu znanja o samom sustavu.
11. Pouzdana komunikacija: sustav mora pružiti mogućnost pouzdane komunikacije između pilota i ekipe na tlu.
12. Odgovarajući uvjeti: sustav se smije koristiti samo unutar okruženja i vremenskih uvjeta koji omogućuju sigurnu vuču.

2.3. Dodatna oprema za vuču

2.3.1. Sustav otpuštanja

Svaki sustav za otpuštanje mora otpustiti užu pri bilo kojem kutu i sili tijekom vuče. Sustav također mora otpustiti samo kad pilot to želi, uz izuzetak specijalnih automatskih sustava za otkapčanje koji se koriste pri učenju leta.



Slika 5. Oprema za vuču parajedrilice

2.3.2. Uzde

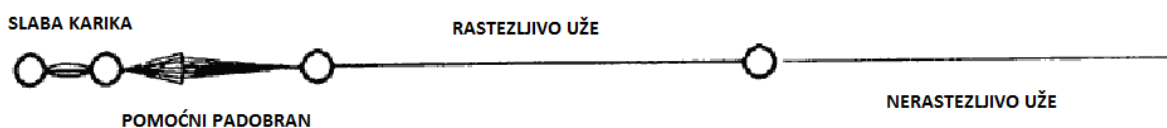
Uzde se spajaju na sustav za otpuštanje te se u obliku slova V spajaju na pojas. Uzde se izrađuju od već rastegnute užadi. Dužina uzdi se kreće između 0,3 m i 1 m.

2.3.3. Slaba karika

Svrha slabe karike jest da bude sigurnosni element u slučaju prekoračenja maksimalne dopustive sile u užetu prilikom koje slaba karika puca. Uglavnom slabe karike imaju granicu opterećenja koja se kreće između 0,75 G i 1,5 G. Što znači da je primjerice sila pucanja za parajedrilicu i pilota ukupne mase 100 kg i granicu od 1,5 G jednaka otprilike 1500 N. Slabe karike se najčešće izrađuju od špage s odgovarajućom granicom pucanja.

2.3.4. Pomoćni padobran

Pomoćni padobran [Slika 6] služi da uže nakon odvajanja polagano propada prema tlu dok ga vitlo namata natrag na bubanj.



Slika 6. Vučni lanac

2.3.5. Užad za vuču

Užad za vuču se proizvodi od polipropilena, poliestera, najlona ili čelika, a promjeri im se kreću od 1,75 mm do 6 mm. Prvih 50 m do 90 m od jedrilice se najčešće koristi rastezljivo uže, a ostatak do vitla je od nerastezljivog užeta. Prekidne sile užadi kreću se od 2200 N do 6200 N, a izbor užeta se radi primarno na temelju toga hoće li vitlo biti korišteno za vuču samo solo parajedrilica s jednim pilotom ili tandem parajedrilica s pilotom i putnikom.

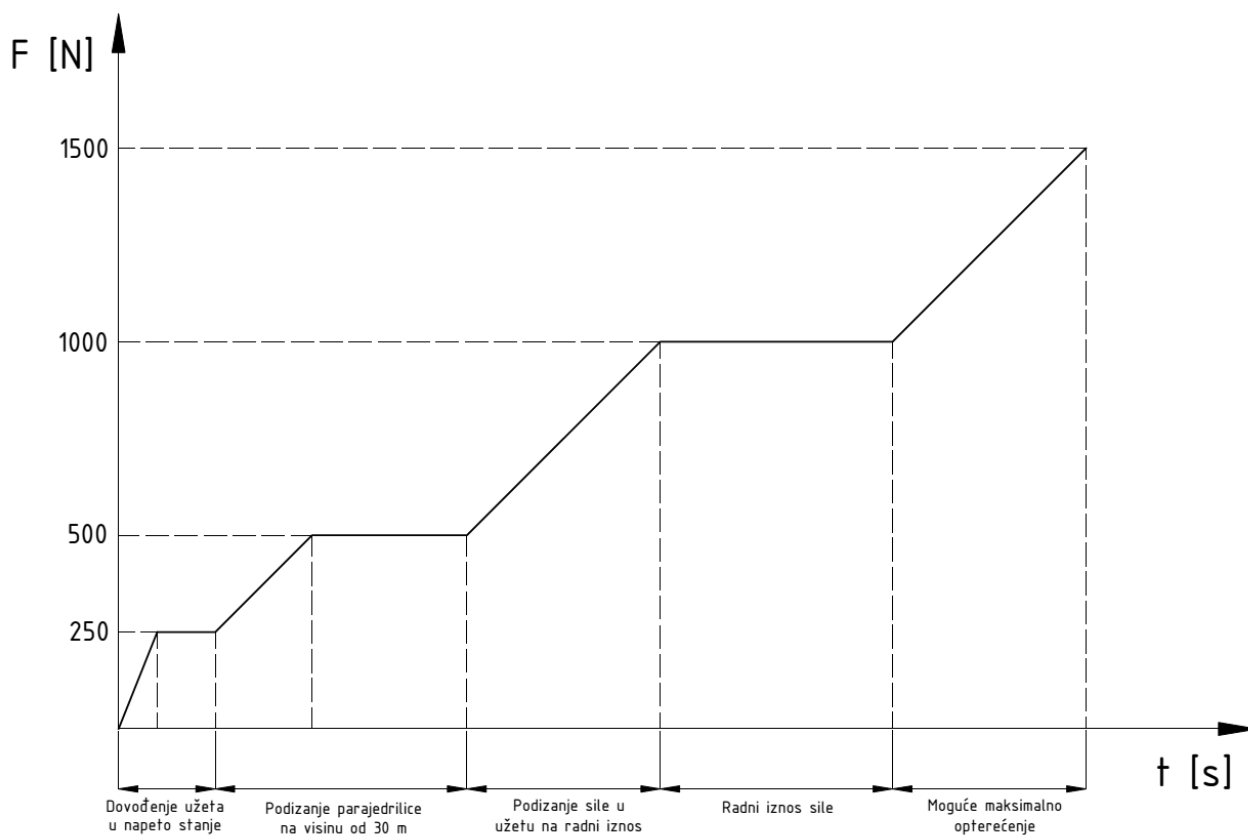
2.4. Sile prilikom vuče

Prilikom pokretanja vitla i dovođenja užeta u napeto stanje sila užeta ne bi smjela prelaziti 250 N. Kad zatim počne vuča sila se povećava do 500 N i drži se oko te vrijednosti dok jedrilica ne dostigne 30 m visine iznad zemlje. Nakon prelaska te granice sila se lagano povećava do

radne vrijednosti koja ovisi o ukupnoj masi letjelice i pilota, a kreće se uglavnom od 750 N do 900 N (za solo let) [8] [9]. Za potrebe ovog rada uzet ćemo još u obzir i moguća preopterećenja do 1500 N prilikom same završnice vuče.

Najveće sile se primjenjuju pri najvišim visinama jer tada horizontalna komponenta sile gubi u udjelu, a raste vertikalna komponenta.

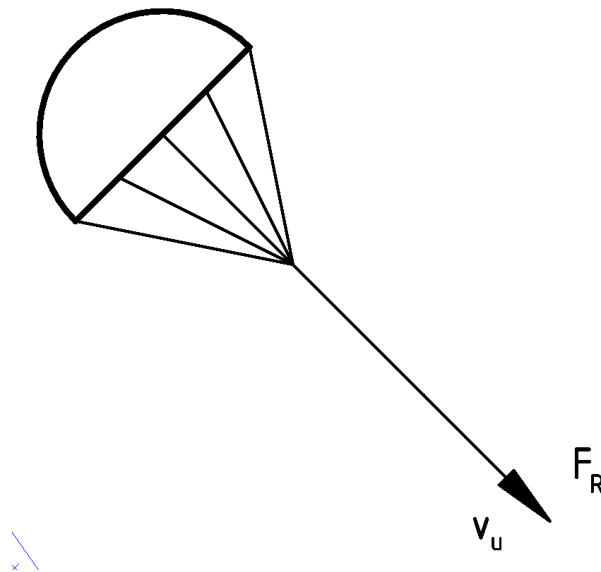
Prilikom otpuštanja užeta silu u vitlu treba najprije polako spustiti na nulu i tek onda pilot otkapča jedrilicu od užeta. Vitlo tada povećanom brzinom namata užu na bubanj.



Slika 7. Promjena sile tijekom vuče

2.4.1. Sile i potrebna snaga tijekom namatanja užeta s pomoćnim padobranom

Nakon odvajanja parajedrilice od užeta otvara se pomoćni padobran te vitlo počinje brzo namatanje užeta na bubanj. Vitlo mora imati dovoljnu snagu da namata užu maksimalnom brzinom zadanom u zadatku ($v_{i\max} = 15$ m/s) i istovremeno svladava silu otpora padobrana koji se dobiva iz jednadžbe (1).



Slika 8. Sila vuče na padobranu

Faktor otpora C_0 klasičnih padobrana kreće se od 0,8 do 1,35. Za potrebe proračuna uzet ćemo najgori slučaj od 1,35. Promjeri padobrana se kreću između 0,6 m i 1 m te ćemo i tu iz najvećeg promjera od 1 m proračunati iznos projicirane površine S :

$$S = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} = \frac{1^2 \cdot \pi}{4} = 0,785 \text{ m}^2 \quad (4)$$

Brzina je dana u zadatku i iznosi $v = 15 \text{ m/s}$. Gustoća zraka iznosi $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$. Uvrštavanjem svih ovih vrijednosti u jednadžbu (1) dobivamo u konačnici silu u iznosu od:

$$F_R = C_0 \cdot v^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S = 1,35 \cdot 15^2 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot 0,785 = 143 \text{ N} \quad (5)$$

Snagu bez gubitaka potrebnu za ostvarivanje ovakve sile i brzine dobivamo iz sljedeće jednadžbe:

$$P_{NU} = F_R \cdot v_u = 143 \cdot 15 = 2145 \text{ W} \quad (6)$$

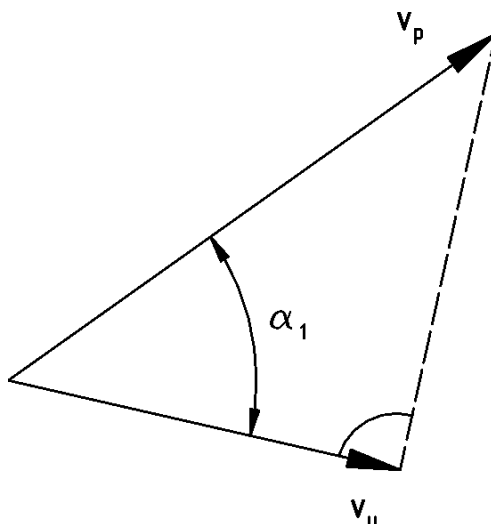
2.4.2. Sile tijekom vuče u ovisnosti o brzini

Kao što je predstavljeno na početku poglavlja 2.4. sile se tijekom vuče mijenjaju to jest sekvencijalno rastu. Brzina vitla će se tijekom tog razdoblja također mijenjati u ovisnosti o položaju parajedrilice u odnosu na vitlo što je uzrokovano time da je brzina koju vitlo mora dati zapravo jedna od vektorskih komponenti ukupne brzine parajedrilice. Što je parajedrilica na višoj visini, brzina koju vitlo treba dati je manja, a sila u užetu tijekom tog razdoblja raste. Značajan utjecaj na potrebnu brzinu također ima vjetar.

Brzina užeta može se izraziti preko jednadžbe (7) dobivene iz trokuta sila prikazanih na slici :

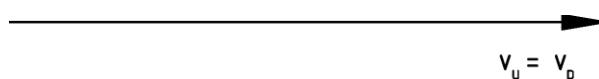
$$v_u = v_p \cdot \cos \alpha_1 \quad (7)$$

U gornjoj jednadžbi v_p predstavlja apsolutnu brzinu parajedrilice, a α_1 je kut između apsolutne brzine letjelice i komponente te brzine u smjeru namatanja užeta to jest brzine užeta.



Slika 9. Odnos brzine vuče i apsolutne brzine leta

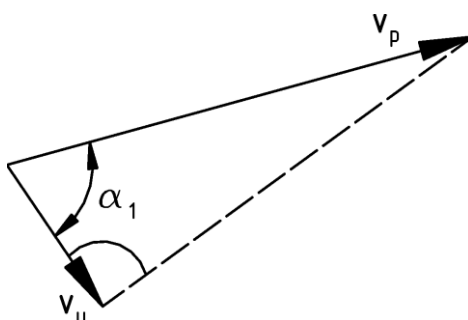
Prilikom početka vuče sila u užetu naraste na iznos od 500 N, a brzina koja se mora postići da bi parajedrilica poletjela iznosi 5,5 m/s. s obzirom da je letjelica još na tlu kut α_1 je jednak nuli te je brzina užeta jednaka brzini letjelice. Iz jednadžbe za snagu $P = F \cdot v$ dobivamo da je u tom slučaju bez gubitaka potrebna snaga od 2750 W.



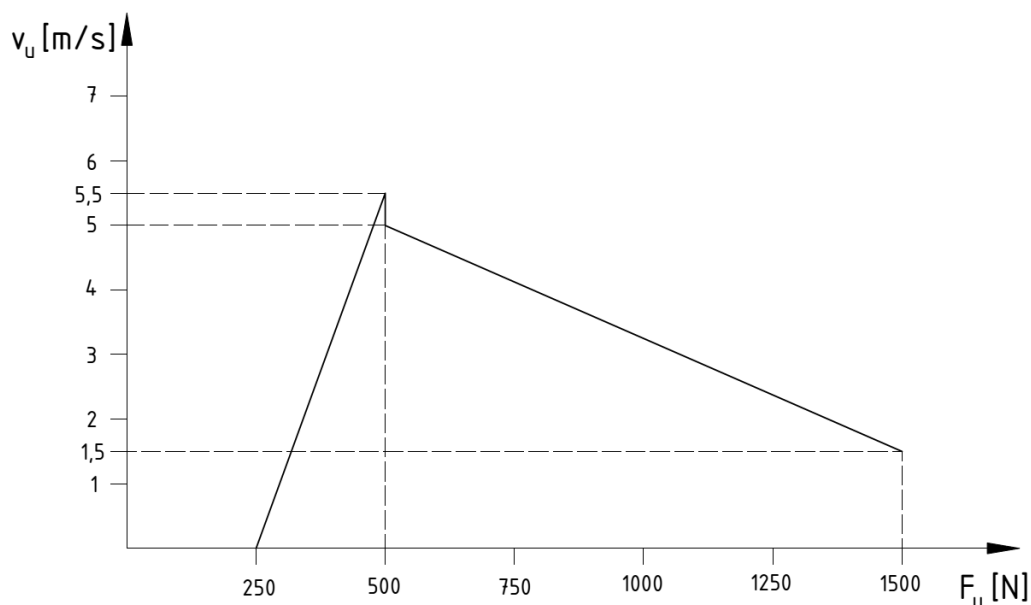
Slika 10. Brzina leta i vuče prilikom uzleta

Nakon polijetanja kut α_1 raste, a sila u užetu ostaje ista (500 N) te stoga potrebna snaga pada jer pada iznos komponente apsolutne brzine letjelice u smjeru užeta.

Nakon dosezanja visine od 30 m sila se povećava na radni iznos koji se kreće oko 900 N što uzrokuje veću potrebnu snagu, ali s obzirom da kut α_1 kontinuirano raste ta snaga se opet počinje smanjivati. Brzina parajedrilice se stabilizira oko 8 m/s. Za ekstremne potrebe kad sila treba iznositi 1500 N letjelica se nalazi izrazito visoko te se u projekciji prema tlu približava vitlu što znači da se kut α_1 tada približava pravom kutu što znači da potrebe za snagom dalje padaju.



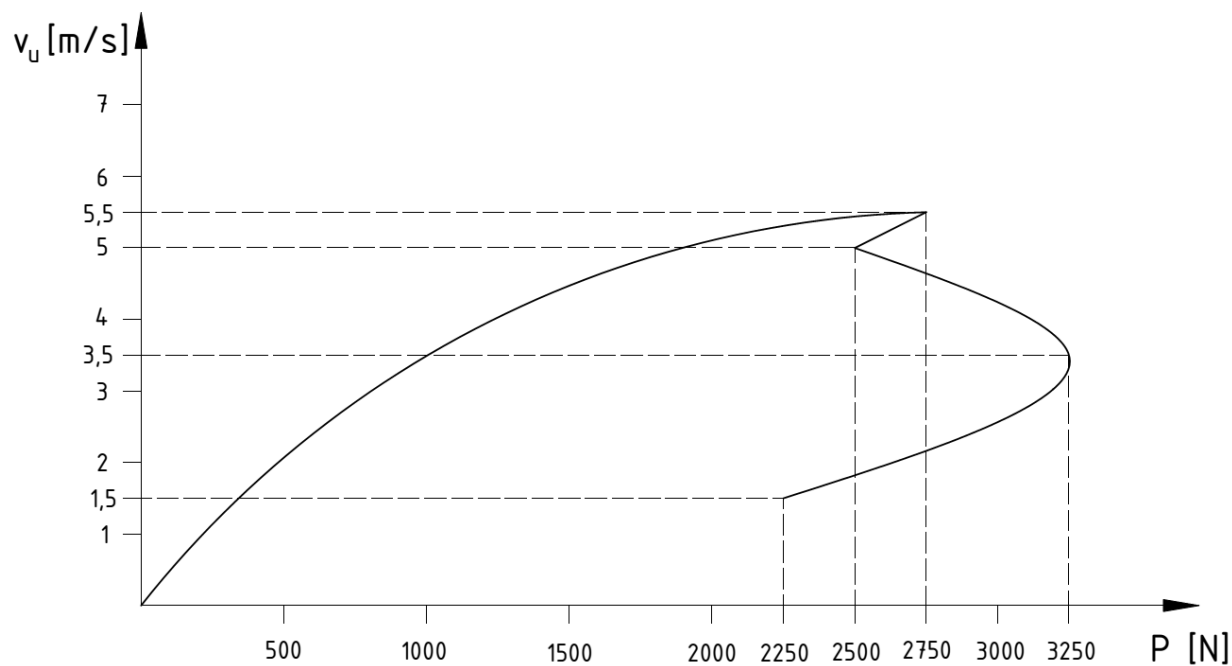
Slika 11. Brzina leta i vuče pri vršnom opterećenju



Slika 12. Ovisnost brzine užeta i sile vuče

U dijagramu na slici 12 je dana međuovisnost brzine užeta i sile tijekom vuče.

U dijagramu na slici 13 je dana ovisnost snage i brzine užeta tijekom vuče. Iz najisturenije desne točke grafa očitavamo maksimalnu potrebnu snagu vitla.



Slika 13. Ovisnost brzine užeta i potrebne snage

3. PREGLED POSTOJEĆIH RJEŠENJA

3.1. Statička vitla

Statička vitla su specifična po tome što koriste motore za davanje brzine i sile u užetu potrebne za vuču parajedrilica. Najčešće se koriste hidraulički motori pogonjeni motorima s unutrašnjim izgaranjem, a rjeđe električni motori napajani standardnim akumulatorima. Snaga se na bubanj najčešće prenosi lančanim ili remenskim prijenosom ili hidrodinamičkim prijenosnikom.

Bubnjevi se oblikuju na način da mogu primiti barem 1000 m užeta, a često i više. Najčešće im je duljina značajno manja od promjera, barem za red veličine. Na vitla se ugrađuju i sustavi za koaksijalno namatanje užeta te rezači užeta u kritičnim slučajevima. Vitla se uglavnom fiksiraju za kuku automobila ili prikolice.

Za namatanje užeta ponekad se koristi zasebni elektromotor direktno spojen na bubanj ili se u slučaju hidromotora on isključuje, a benzinski motor sam vrši brže namatanje.

Visina na koju statička vitla mogu podići parajedrilice u pravilu ide do 500 m.



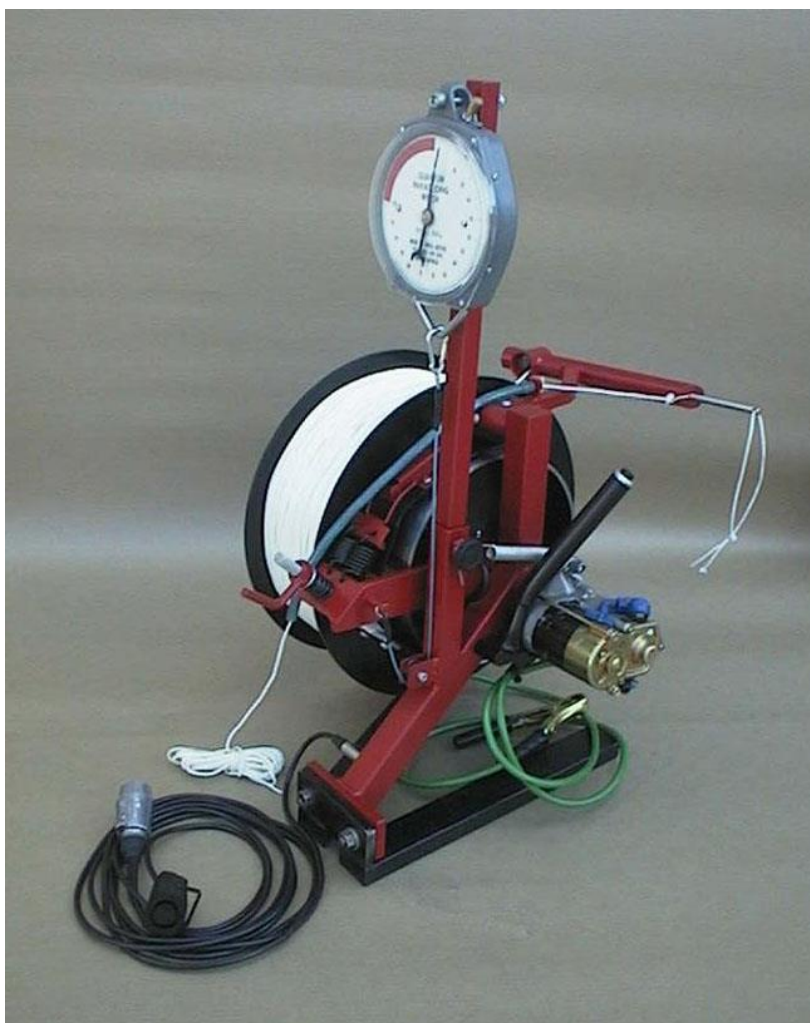
Slika 14. Statičko vitlo s benzinskim motorom

3.2. Pay-out vitla

Pay-out vitla se montiraju na automobilska vozila ili motorne čamce koji daju potrebnu brzinu prilikom vuče parajedrilice, a vitlo daje silu. Vitlo za davanje sile no koristi motor već silu ostvaruje kočenjem koje se može podešavati. Kočenje se ostvaruje putem hidrauličkih disk kočnica ili remenskim kočenjem na bubnju.

Ova vitla redovito dižu parajedrilice na visine od 1000 m i više te stoga imaju duže bubnjeve od onih na statičkim vitlima zbog potrebe za smještanjem veće duljine užeta. Na vitla se također ugrađuju sustavi za namatanje i odrezivanje užeta. Sustavi imaju uglavnom mjerače brzine izvlačenja i namatanja užeta koji signaliziraju vozaču treba li ubrzati ili usporiti vožnju.

Nakon odvajanja parajedrilice koristi se mali elektromotor za namatanje užeta natrag na bubanj.



Slika 15. Pay-out vitlo s remenskim kočenjem

3.3. Hibridna vitla

Hibridna vitla su konstrukcijski sličnija statičkim vitlima te se kao takva i primarno koriste, ali se mogu upotrebljavati i kao pay-out vitla te su njima sličnija što se tiče većih ukupnih dimenzija. Kao što je spomenuto u prijašnjim poglavljima u pay-out režimu rada može podići parajedrilicu značajno više nego u statičkom režimu rada.



Slika 16. Hibridno vitlo s benzinskim motorom

U tablici 1 je dan pregled osnovnih karakteristika i razlika triju tipova vitla za vuču parajedrilica.

Tablica 1. Pregled vrsta vitla za vuču parajedrilice

Tip vitla	Statičko vitlo	Pay-out vitlo	Hibridno vitlo
Način davanja sile za vuču	Motor (EM ili hidromotor + benzinski motor)	Kočnica (remenska ili hidraulička disk)	Motor
Način namatanja	Pomoćni elektromotor	Pomoćni elektromotor	Pomoćni elektromotor
Prijenos snage	Lančani, remenski ili hidrodinamički prijenos	-	Lančani ili remenski prijenos
Kapacitet bubnja (m)	~1000	1000 – 2000	1000 – 2000
Moguća dodatna oprema	Sustav za koaksijalno namatanje užeta, daljinsko upravljanje	Sustav za koaksijalno namatanje užeta	Sustav za koaksijalno namatanje užeta
Ostvariva visina parajedrilice (m)	300 – 500	>1000	>1000

4. KONSTRUKCIJSKA RAZRADA

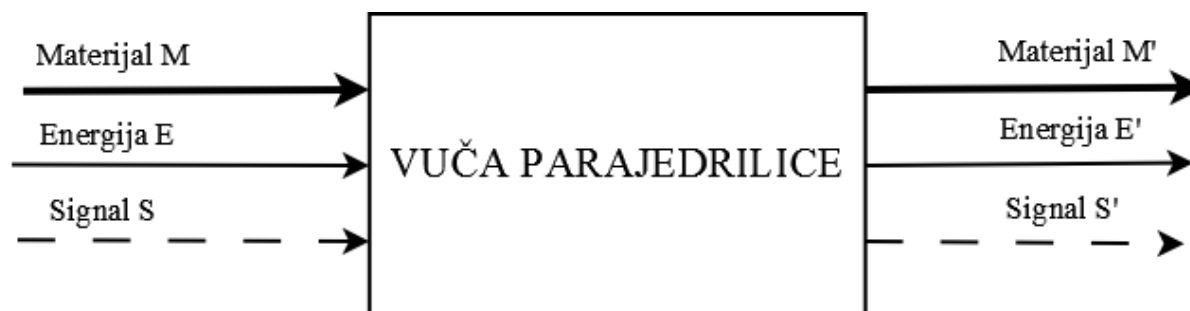
4.1. Definicija problema

Širenjem padobranskog jedrenja u nizinske krajeve pojavila se potreba za mogućnošću lansiranja parajedrilica pomoću vuče. Također se u prostornim ograničenjima gdje za vuču nije na raspolaganju dugačka ravna staza za pay-out vuču vozilom pojavljuje potreba za vučom s fiksne lokacije do maksimalne udaljenosti od 1000 m od mjesta vitla. Kao jedino realno rješenje postavlja se statičko vitlo koje mora biti energetski autonomno (akumulatorsko napajanje ili napajanje gorivom) i prenosivo (automobilski prijevoz).

4.2. Razrada funkcionalne strukture

4.2.1. Apstrakcija problema

Primarna zadaća uređaja je vuča parajedrilice čime je definirana osnovna „black box“ funkcija. Kao ulazni materijal možemo definirati samu parajedrilicu s opremom nužnom za vuču. Za pogon motora i mogućih spojki potrebna je električna ili kemijska energija. Sama parajedrilica dobiva i energiju vjetra. Ulazni signal je željena sila i brzina kojom želimo vući jedrilicu. Lansiranu parajedrilicu možemo definirati kao izlazni materijal. Izlazna energija je otpadna toplinska energija u samom uređaju. Izlazni signal je informacija o stvarnoj brzini užeta i sili u užetu.

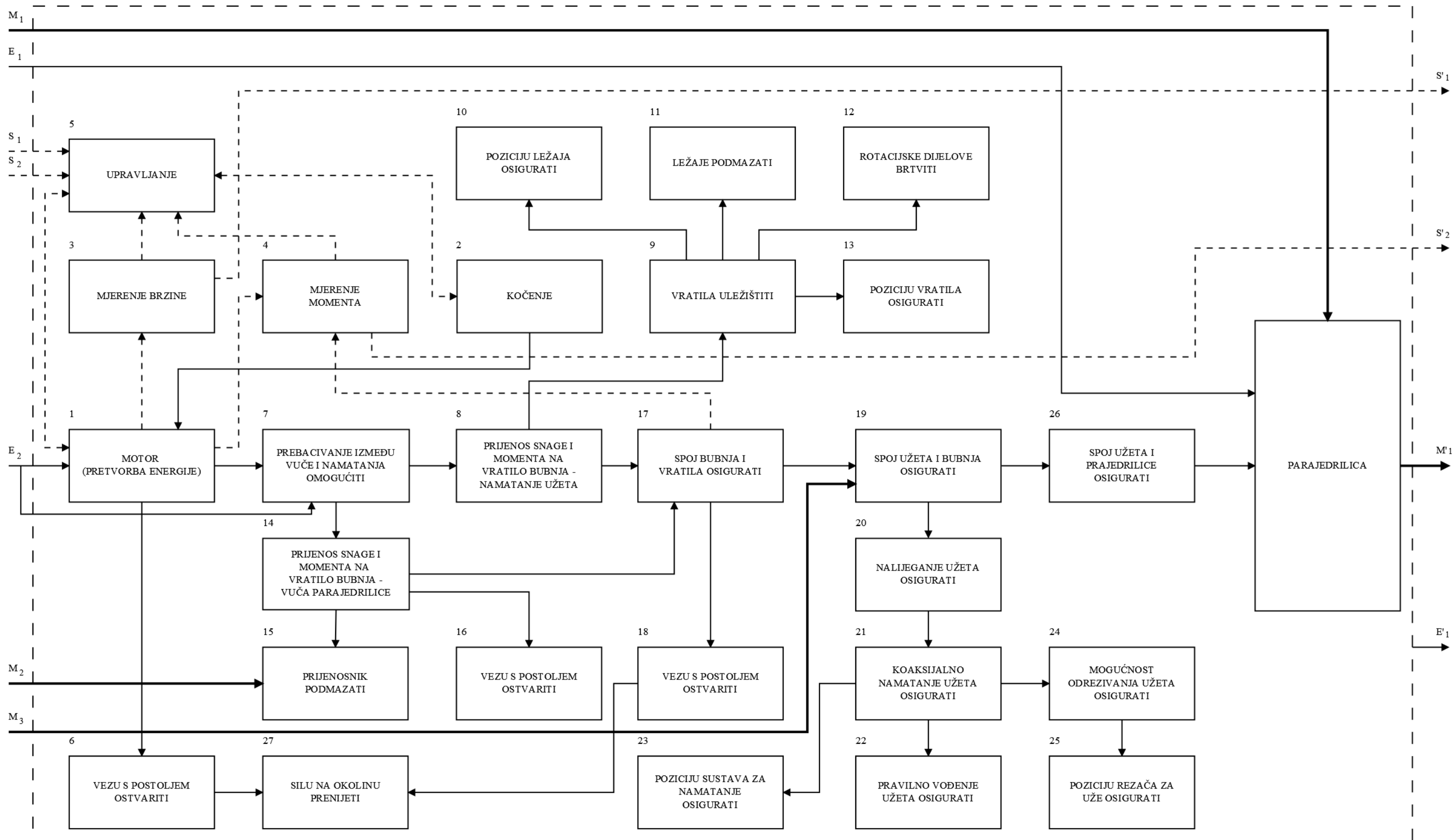


Slika 17. Black Box model sustava

Legenda:

M – parajedrilica s opremom	S – informacija o željenoj brzini i sili vuče
E – električna ili kemijska energija za pogon, energija vjetra	M' – lansirana parajedrilica
	E' – toplinska energija
	S' – informacija o stvarnoj sili i brzini vuče


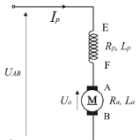

4.2.2. Funkcijska struktura uređaja

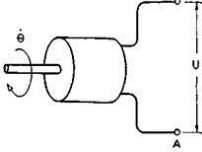
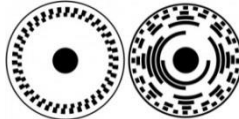


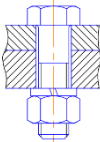
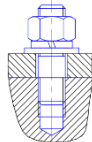
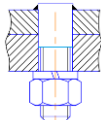

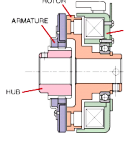
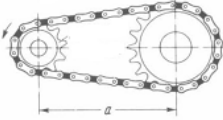
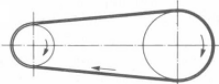
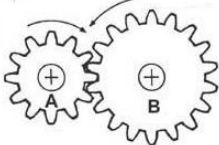
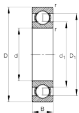

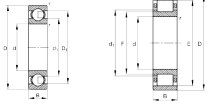
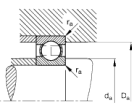
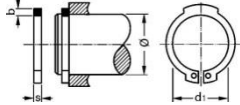
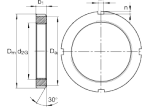




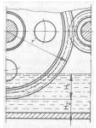
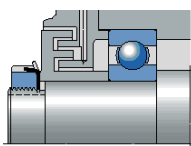

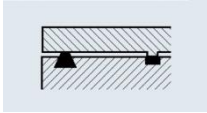
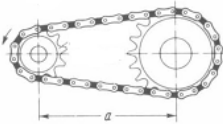

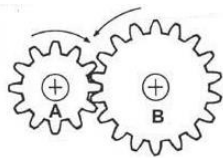
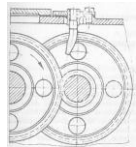

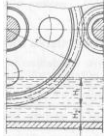
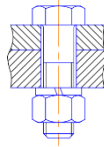
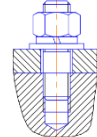
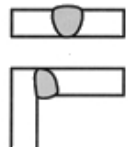
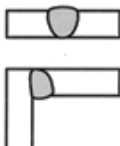
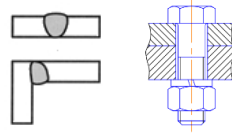
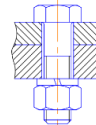
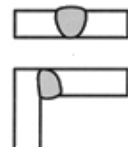
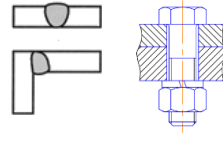
Legenda: E_1 – energija vjetra E_2 – električna energija E'_1 – gubici toplinske i električne energije M_1 – parajedrilica M_2 – mazivo prijenosnika M_3 – uže M'_1 – lansirana parajedrilica S_1 – informacija o željenoj brzini vitla S_2 – informacija o željenoj sili u užetu S'_1 – informacija o stvarnoj brzini vitla S'_2 – informacija o stvarnoj sili u užetu**4.2.3. Morfološka matrica**

Iz funkcijske dekompozicije uređaja za vuču izvlače se parcijalne funkcije koje se sortiraju u morfološku matricu te se za svaku funkciju nalazi nekoliko mogućih rješenja. Iz morfološke matrice će se zatim može pronaći više varijanti rješenja to jest mogućih koncepata koji idu na daljnju evaluaciju.

Tablica 2. Morfološka matrica

PARCIJALNE FUNKCIJE		Principi rješenja		
		1	2	3
1	MOTOR (PRETVORBA ENERGIJE)	 Izmjenični asinkroni elektromotor	 Istosmjerni elektromotor	 Hidromotor s benzinskim motorom
2	KOČENJE	Protustrujno	Elektromagnetska disk kočnica	Smanjenjem broja okretaja

3	MJERENJE BRZINE			
4	MJERENJE MOMENTA	Momentni senzor u sklopu motora		Mjerenje jakosti struje u motoru
5	UPRAVLJANJE	Frekvencijska regulacija broja okretaja	Promjena broja okretaja zakretnim potencijetrom	Koračna promjena brzine
6	VEZU S POSTOLJEM OSTVARITI			
7	PREBACIVANJE IZMEĐU VUČE I NAMATANJA OMOGUĆITI			
8	PRIJENOS SNAGE I MOMENTA NA VRATILO BUBNJA – NAMATANJE UŽETA			
9	VRATILO ULEŽISTITI			
10	POZICIJU LEŽAJA OSIGURATI			

11	LEŽAJE PODMAZATI	 Podmazivanje mašću	 Mast u ležaju	 Podmazivanje bučkanjem prijenosnika
12	ROTACIJSKE DIJELOVE BRTVITI	 Labirintna brtva	 Simmering brtva	 Prsten od pusta
13	POZICIJU VRATIŁA OSIGURATI	Pero i čvrsti dosjed	Pero i oblik	Pero, konus i vijak
14	PRIENOS SNAGE I MOMENTA NA VRATIŁO BUBNJA – VUČA PARAJEDRILICE	 Lančani prijenos	 Remenski prijenos	 Zupčanički prijenos
15	PRIENOSNIK PODMAZATI	 Podmazivanje brizganjem	 Podmazivanje mašću	 Podmazivanje uranjanjem
16	VEZU S POSTOLJEM OSTVARITI	 Vijak i matica	 Vijak u provrtu s navojem	 Zavarena izvedba
17	SPOJ BUBNJA I VRATIŁA OSIGURATI	 Zavarena izvedba	 Zavareni i vijčani spoj	
18	VEZU S POSTOLJEM OSTVARITI	 Vijčani spoj	 Zavareni spoj	 Zavareni i vijčani spoj

19	SPOJ UŽETA I BUBNJA OSIGURATI	 <p>Vijčani spoj s bubnjem</p>	 <p>Vijčani spoj s vijencem bubnja</p>	
20	NALIJEGANJE UŽETA OSIGURATI	 <p>Ožljebljeni bubanj</p>	 <p>Ravni bubanj</p>	
21	KOAKSIJALNO NAMATANJE UŽETA OSIGURATI	 <p>Mehanizam vretena s remenskim prijenosom</p>	 <p>Zupčanički mehanizam</p>	
22	PRAVILNO VOĐENJE UŽETA OSIGURATI	 <p>Vertikalni valjci</p>	 <p>Horizontalni valjci</p>	 <p>Vertikalni i horizontalni valjci</p>
23	POZICIJU SUSTAVA ZA NAMATANJE OSIGURATI	 <p>Vijčani spoj</p>	 <p>Zavareni spoj</p>	 <p>Zavareni i vijčani spoj</p>
24	MOGUĆNOST ODREZIVANJA UŽETA OSIGURATI	 <p>Pneumatski cilindar</p>	 <p>Hidraulični cilindar</p>	 <p>Mehanički rezač (poluga)</p>
25	POZICIJU REZAČA ZA UŽE OSIGURATI	 <p>Vijčani spoj</p>	 <p>Zavareni spoj</p>	 <p>Zavareni i vijčani spoj</p>
26	SPOJ UŽETA I PARAJEDRILICE OSIGURATI	 <p>Spoj O prstenom</p>		

27	SILU NA OKOLINU PRENIJETI	Zavarena nosiva konstrukcija	Liješana nosiva konstrukcija	Kombinirana liješana i zavarena konstrukcija
----	---------------------------	------------------------------	------------------------------	--

4.3. Odabir koncepta

Analizom kombinacija mogućih rješenja iz morfološke matrice odabrana su tri koncepta za daljnju analizu. Koncepti koriste kombinaciju parcijalnih rješenja danu u tablici 3.

Tablica 3. Osnovni pregled koncepta

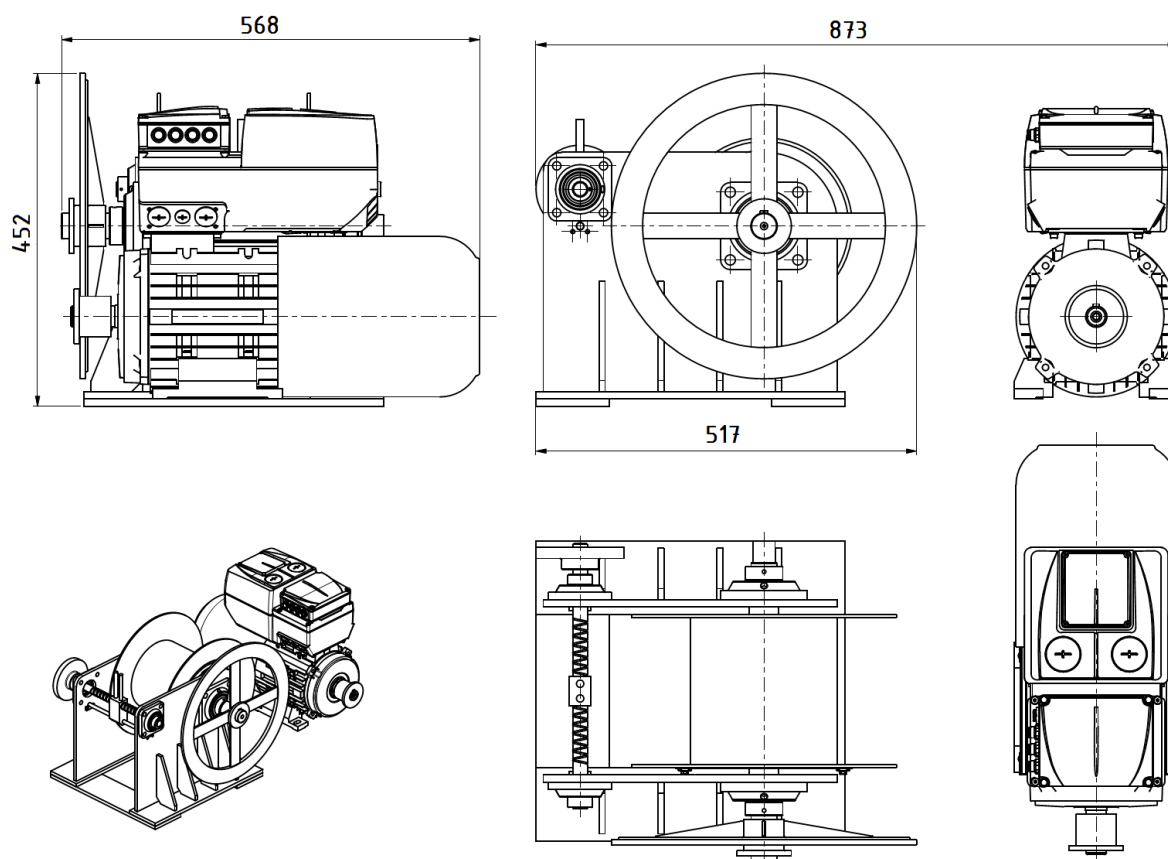
Koncept	Suma parcijalnih rješenja
1	1.1; 2.1; 3.2; 4.1; 5.1; 6.1; 7.1; 8.1; 9.1; 10.1; 11.2; 13.1; 14.1; 15.2; 16.1; 17.1; 18.1; 19.2; 20.2; 21.1; 22.3; 23.3; 24.3; 25.3; 26.1; 27.1
2	1.2; 2.3; 3.2; 4.3; 5.1; 6.1; 7.2; 8.3; 9.1; 10.1; 11.2; 13.2; 14.3; 15.3; 16.3; 17.2; 18.3; 19.2; 20.2; 21.1; 22.3; 23.3; 24.3; 25.3; 26.1; 27.1
3	1.2; 2.3; 3.2; 4.3; 5.1; 6.1; 7.2; 8.2; 9.1; 10.3; 11.2; 13.2; 14.3; 15.3; 16.2; 17.2; 18.3; 19.2; 20.2; 21.1; 22.3; 23.3; 24.3; 25.3; 26.1; 27.1

4.3.1. Koncept 1

Prvi koncept zamišljen je na tragu rješenja koja koriste remenske ili lančane prijenose. Kao pogon je odabran izmjenični asinkroni elektromotor. Prijenos snage ide preko lančanog prijenosa s prijenosnim omjerom oko 6-7.

Za namatanje užeta predviđeno je mehaničko prebacivanje lanca s većeg na manji gonjeni lančanik u istoj osi pri čemu se prijenosni omjer smanjuje na $i = 1$ što omogućuje direktni pogon s motora. Ova opća opcija prebacivanja u drugi režim rada se mora u svim rješenjima primijeniti na neki način jer je nemoguće isključivo frekvencijskom regulacijom brzine vrtnje postići adekvatni omjer potrebnog momenta i brzine i prilikom vuče parajedrilice i prilikom namatanja užeta poslije odvajanja jedrilice.

Koaksijalno namatanje užeta omogućeno je upotrebom povratnog vretena, to jest vretena koje je u jednom smjeru lijevovojno, a u drugom desnovojno. Vreteno je spojeno s bubnjem putem zupčastog remena što omogućuje da se namatanje uvijek vrši sukladno brzini vrtnje bubnja. Ovo rješenje koaksijalnog namatanja upotrijebljeno je i u druga dva koncepta.

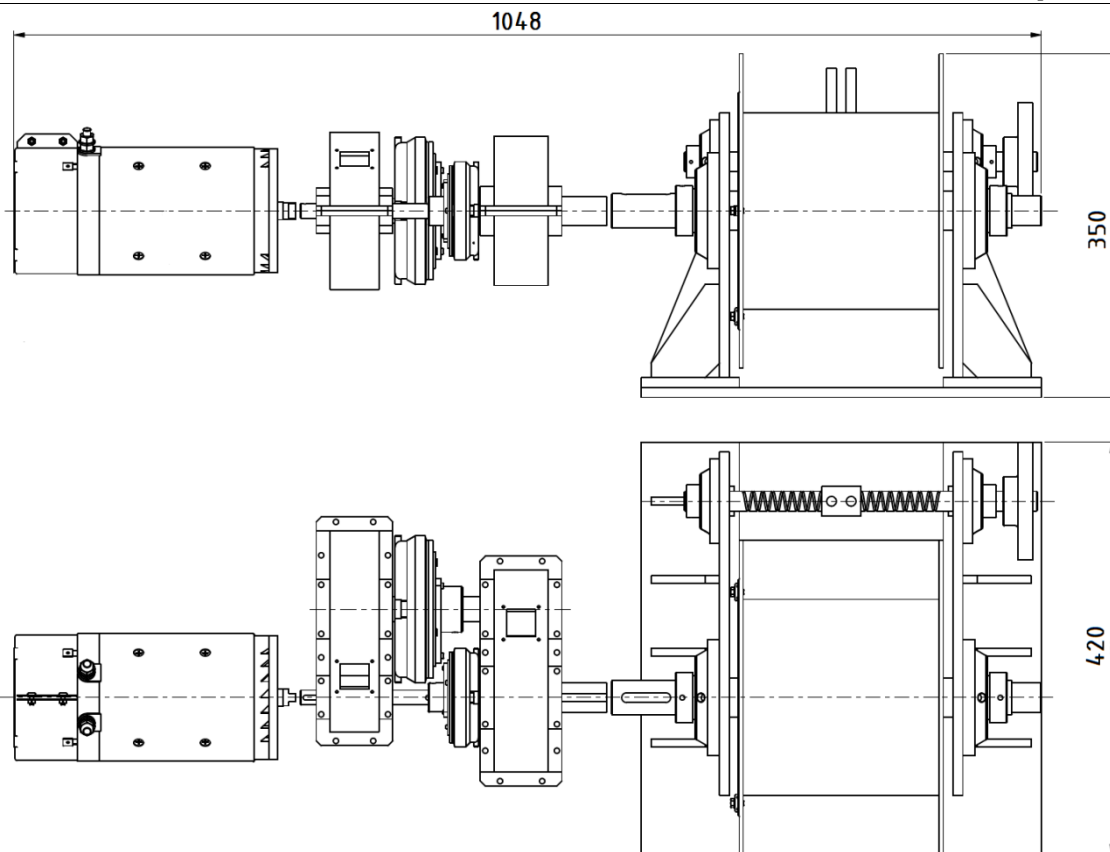


Slika 18. Koncept 1

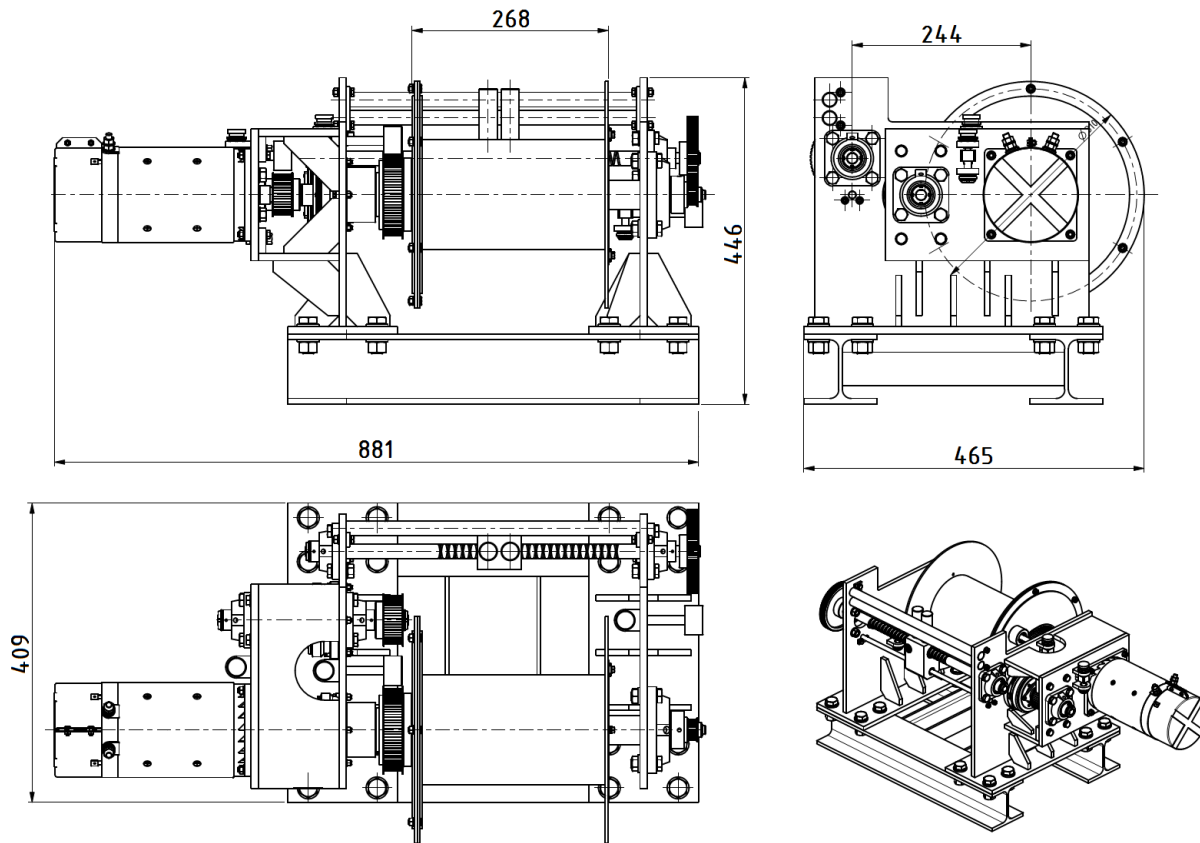
4.3.2. Koncept 2

Drugi koncept koristi istosmjerni elektromotor što za istu snagu omogućuje smanjenje ukupnih dimenzija i sigurniji rad. Prijenos snage na bubanj je ostvaren dvostupanjskim reduktorom s ukupnim prijenosnim omjerom koji se kreće između 6 i 7.

Režim rada direktnog pogona omogućen je izradom reduktora na način da su oba razmaka osi jednaka, to jest da su vratila 1 i 4 u istoj osi. Prilikom vuče parajedrilice elektromagnetska spojka između vratila 2 i 3 je uključena, a spojka između vratila 1 i 4 je isključena i reduktor funkcionira u režimu dvostupanjskog prijenosa. Kad se spojka između vratila 2 i 3 isključi, a ona između 1 i 4 uključi motor je direktno spojen na bubanj. Zbog potrebe da spojke ne dođu u kontakt s uljem za podmazivanje prijenosnik se mora razdvojiti u dva odvojena dijela.



Slika 19. Koncept 2



Slika 20. Koncept 3

4.3.3. Koncept 3

Treći koncept također koristi istosmjerni elektromotor za pogon. Prijenos snage na bubanj prilikom vuče parajedrilice ostvaren je putem planetarnog prijenosnika montiranog unutar bubnja s ukupnim prijenosnim omjerom $i = 7$. Prijenosnik je s ulazne strane bubnja učvršćen na način da se ne bi kojim slučajem rotirao zajedno s bubnjem, a s izlazne strane je učvršćen za sam bubanj na način da može prenijeti moment i brzinu.

Režim namatanja užeta ostvaren je dvostupanjskim prijenosom zupčastim remenom. Za prebacivanje iz jednog režima rada u drugi također se koriste dvije elektromagnetske spojke.

4.3.4. Izbor koncepta

U tablici 4 dane su prednosti i nedostaci svih triju koncepta.

Tablica 4. Pregled prednosti i nedostataka koncepta

Koncept	Prednosti (+)	Nedostaci (-)
1	Jednostavnost prijenosa snage lancem. Olakšana montaža.	Komplicirani sustav prebacivanja iz jednog u drugi režim rada. Opasnost i kompleksnost korištenja AC motora u vanjskim uvjetima. Velika masa motora.
2	Korištenje manjeg motora. Veća sigurnost korištenja motora.	Velike dimenzije. Povećana masa. Potreba za izradom dva odvojena reduktora.
2	Korištenje manjeg motora. Veća sigurnost korištenja motora. Kompaktnija konstrukcija – smještaj prijenosnika unutar bubnja. Korištenje većeg broja standardnih i gotovih dijelova.	Potreba za više dodataka – donekle otežana montaža.

Za daljnju razradu je odabran **koncept 3**. Korištenje istosmjernog motora je ocijenjeno kao najpogodnije za vanjsku upotrebu zbog olakšanog napajanja (nema potrebe za AC/DC pretvaračem) te zbog veće sigurnosti za operatera (smanjenja mogućnost električnog udara). Što se tiče prijenosa snage, korištenje planetarnog prijenosnika ugrađenog u sam bubanj omogućuje bolje iskorištenje volumena, smanjenje dimenzija i pouzdan rad zbog korištenja gotovog standardnog prijenosnika. U režimu namatanja koristi se relativno jednostavan i jeftin remenski prijenos koji zahtijeva samo malo više dijelova i nešto dužu montažu.

5. TEHNIČKI PRORAČUN

5.1. Dimenzioniranje i izbor užeta

Koristi se uže za parajedrilice tipa Technora koje ima jezgru od aramida i prevlaku od poliestera [20].



Slika 21. Aramidna jezgra Technora užeta

Maksimalna sila u užetu:

$$F_{u\max} = 1500 \text{ N}$$

Promjer užeta:

prema [4], str. 101.

$$d_u \geq \sqrt{\frac{4 \cdot S_u \cdot F_{u\max}}{f \cdot \pi \cdot R_{mu}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4 \cdot 1500}{0,5 \cdot \pi \cdot 3000}} = 2,26 \text{ mm}$$

$$f = \frac{A}{A_{teor}} = 0,5 \quad \text{- faktor ispunje}$$

$$R_{mu} = 3000 \text{ N/mm}^2 \quad \text{- vlačna čvrstoća Technora užeta}$$

$$S_u = 4 \quad \text{- faktor sigurnosti za pogonsku užad (pogonska grupa 1Am)}$$

$$d_u \geq 2,26 \text{ mm}$$

Odabrani normirani promjer užeta [20]:

$$d_u = 2,5 \text{ mm}$$

5.2. Proračun bubnja

Promjer bubnja

$$D_b \geq \left(\frac{D}{d}\right)_{\min} \cdot c_p \cdot d_u = 16 \cdot 1 \cdot 2,5 = 40 \text{ mm}$$

$$\left(\frac{D}{d}\right)_{\min} = 16$$

prema [4], str. 103., Tablica 1.4-1 za pogonsku grupu 1A_m

$$c_p = 1$$

faktor pregiba prema [4] str. 104., Tablica 1.4-2 i [4] str. 104, Slika 1.4-3

$$d_u = 2,5 \text{ mm}$$

$$D_b \geq 40 \text{ mm}$$

Odabrani promjer bubnja (iz konstrukcijskih razloga): $D_b = 150 \text{ mm}$

Debljina stjenke: $s = 5 \text{ mm}$

Dužina bubnja prema [4], str. 132

Bubanj je višeslojan te ima glatku površinu.

Za duljinu užeta odabrano je standardnih 1000 m što najčešći maksimum za statička vitla, to jest maksimalna udaljenost prilikom polijetanja. Na tu duljinu treba još dodati 4 sigurnosna namotaja na bubnju.

Duljina užeta: $l_u = L_{\max} + 4 \cdot D_b \cdot \pi = 1000 + 4 \cdot 0,15 \cdot \pi = 1002 \text{ m}$

Odabrana duljina bubnja: $l_b = 250 \text{ mm}$

Broj namotaja na bubnju: $n = \frac{d_u \cdot l_u}{l_b \cdot D_b \cdot \pi} = \frac{2,5 \cdot 1002000}{250 \cdot 150 \cdot \pi} = 22$

Visina svih slojeva namotanog užeta: $h_n = n \cdot d_u = 22 \cdot 2,5 = 55 \text{ mm}$

Promjer ploče bubnja: $D_h \geq D_b + 2 \cdot h_n = 150 + 2 \cdot 55 = 260 \text{ mm}$

Odabrani promjer ploče bubnja: $D_h = 280 \text{ mm}$

5.2.1. Proračun stjenke bubnja

Debljina stjenke bubnja za zavarenu izvedbu (jednoslojni bubanj):

$$s = (0,6 \dots 0,8) \cdot d_u = (0,6 \dots 0,8) \cdot 2,5 = 1,5 \dots 2 \text{ mm}$$

Kod višeslojnih bubnjeva potrebna je veća debljina stjenke. - prema [4], str. 132

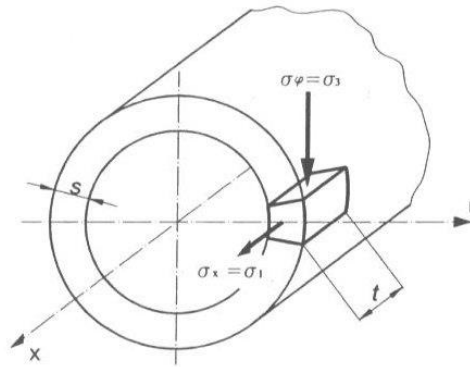
Odabrano: $s = 5 \text{ mm}$

5.2.1.1. Provjera stjenke bubnja prema naprezanjima uslijed namatanja opterećenog užeta (prolom)

Maksimalna sila u užetu: $F_{u \max} = 1500 \text{ N}$

Dozvoljeno naprezanje za čelični bubanj (St 44-2):

$$\sigma_1 = \sigma_x \leq 50 \text{ N/mm}^2 \quad |\sigma_3| = |\sigma_\varphi| \leq 100 \text{ N/mm}^2$$



Slika 22. Naprezanje elementa stjenke bubnja

Maksimalna sila u užetu: $F_{u\max} = 1500 \text{ N}$

Dozvoljeno naprezanje za čelični bubanj (St 44-2):

$$\sigma_1 = \sigma_x \leq 50 \text{ N/mm}^2 \qquad |\sigma_3| = |\sigma_\varphi| \leq 100 \text{ N/mm}^2$$

Naprezanja na mjestu namatanja užeta:

a) normalno (od savijanja)

$$\sigma_x = 0,96 \cdot F_{u\max} \cdot \sqrt{\frac{1}{D_b \cdot s^3}}$$

$$\sigma_x = 0,96 \cdot 1500 \cdot \sqrt{\frac{1}{150 \cdot 5^3}} = 10,52 \text{ N/mm}^2$$

b) cirkularno (tlačno)

$$\sigma_\varphi = -0,5 \cdot \frac{F}{t_u \cdot s}$$

$$\sigma_\varphi = -0,5 \cdot \frac{1500}{2,5 \cdot 5} = -60 \text{ N/mm}^2$$

Aksijalna udaljenost između dva susjedna slojeva užeta na bubnju: $t_u = 2,5 \text{ mm}$

Glavna naprezanja na mjestu namatanja

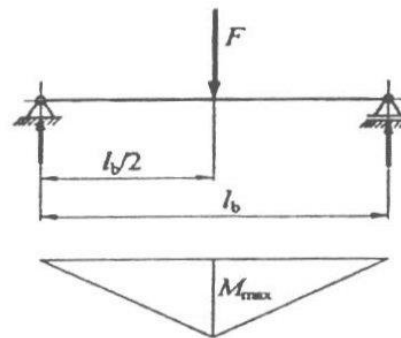
$$\sigma_1 = \sigma_x = 10,52 \text{ N/mm}^2 < 50 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma = |\sigma_\varphi| = 60 \text{ N/mm}^2 < 100 \text{ N/mm}^2$$

5.2.1.2. Naprezanje uslijed savijanja bubnja i progib bubnja

Naprezanje uslijed savijanja bubnja najveće je kad se uže opterećeno maksimalnim teretom namotava na bubanj na njegovoj sredini.



Slika 23. Moment savijanja bubnja

Maksimalni moment savijanja:

$$M_{\max} = F_{u \max} \cdot \frac{l_b}{2} = 1500 \cdot \frac{150}{2} = 112500 \text{ Nmm}$$

Moment otpora poprečnog presjeka bubnja:

$$W_b = \frac{\pi \cdot (D_b^4 - D_u^4)}{16D_b} = \frac{\pi \cdot (150^4 - 140^4)}{16 \cdot 150} = 159815 \text{ mm}^3$$

Promjer bubnja: $D_b = 150 \text{ mm}$

Unutarnji promjer bubnja: $D_u = 140 \text{ mm}$

Naprezanje uslijed savijanja

$$\sigma_{\varphi} = \frac{M_{\max}}{W_b} = \frac{112500}{159815} = 0,704 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\varphi} = 0,704 \text{ N/mm}^2 < \sigma_d = 120 \text{ N/mm}^2$$

Maksimalni progib bubnja:

$$w_{\max} = \frac{2 \cdot F_{u \max} \cdot l_b^3}{48 \cdot E \cdot I_y} = \frac{2 \cdot 1500 \cdot 250^3}{48 \cdot 210000 \cdot 5993079} = 0,0007759 \text{ mm}$$

Modul elastičnosti čelika: $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Moment tromosti poprečnog presjeka bubnja:

$$I_y = \frac{\pi \cdot (D_b^4 - D_u^4)}{64} = \frac{\pi \cdot (150^4 - 140^4)}{64}$$

$$I_y = 5993079 \text{ mm}^4$$

5.2.2. Veza vijenca s bubnjem

Prijenos okretnog momenta s vijenca na bubanj ostvarit će se preko kružnog zavora i vijčanim spojem.

Debljina čelne ploče bubnja: - prema [4], str. 128.

$$\sigma = 1,44 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{D_1}{D_b}\right) \cdot \frac{F_h}{w^2} \leq \sigma_{dop}$$

$$w \geq \sqrt{1,44 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{D_1}{D_b}\right) \cdot \frac{F_h}{\sigma_{dop}}}$$

$D_1 = 65 \text{ mm}$ - promjer čahure zavarene za vijenac

$$\sigma_{dop} = 90 \text{ N/mm}^2$$

$$F_h = 0,1 \cdot F_{u \max} = 150 \text{ N}$$

$$w \geq \sqrt{1,44 \cdot \left(1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{65}{150}\right) \cdot \frac{150}{90}} = 1,31 \text{ mm}$$

Kod višeslojnih bubnjeva potrebna je veća debljina čelne ploče. - prema [4], str. 132

Odabrano $w = 4 \text{ mm}$

5.2.2.1. Vijčani spoj vijenca

Odabrani vijci: M6 prema [1], str. 571.

Odabrani materijal vijaka: 6.6

Prenošenje momenta trenjem: $F_{u \max} \cdot \frac{D_b}{2} \leq n_v \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_7}{2}$

Normalna sila u vijku: $F_N = \sigma_{vdop} \cdot A_{jez}$

Promjer vijčanog spoja na vijencu bubnja : $d_7 = 290 \text{ mm}$

Faktor trenja vijčanog spoja: $\mu = 0,2$

Za materijal 6.6 vrijedi:

$$R_e = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad S_v = 2,5$$

$$\sigma_{vdop} = \frac{R_e}{S_v} = \frac{360}{2,5} = 144 \text{ N/mm}^2 \quad A_{jezgre} = 17,9 \text{ mm}^2$$

Broj vijaka:

$$F_{u \max} \cdot \frac{D_b}{2} \leq n_v \cdot \mu \cdot F_N \cdot \frac{d_7}{2} \quad F_{u \max} \cdot D_b \leq n_v \cdot \mu \cdot \sigma_{vdop} \cdot A_{jez} \cdot d_7$$

$$n_v \geq \frac{F_{u \max} \cdot D_b}{\mu \cdot \sigma_{vdop} \cdot A_{jez} \cdot d_7}$$

$$n_v \geq \frac{1500 \cdot 150}{0,2 \cdot 144 \cdot 17,9 \cdot 290} = 1,51$$

Odabrani broj vijaka:

$$n_v = 6$$

5.2.2.2. Zavareni spoj vijenca

Debljina zavara: $a = 4 \text{ mm}$

Provjera čvrstoće zavara na najmanjem promjeru: prema [2], str. 42

Naprezanje u zavaru: $\tau = \frac{F_t}{a \cdot (d + a) \cdot \pi} \leq \tau_{dop}$

Najmanji zavareni promjer (spoj vijenca i vratila bubnja): $d = 35 \text{ mm}$

Dopušteno naprezanje u zavaru: $\tau_{dop} = 40 \text{ N/mm}^2$

Tangencijalna sila u zavaru: $F_t = \frac{M_b}{\frac{d}{2}} = \frac{153750}{17,5} = 8786 \text{ N}$

$$\text{Maksimalni moment na bubnju: } M_b = F_{u \max} \cdot \frac{D_b + h_n}{2} = 1500 \cdot \frac{150 + 55}{2} = 153750 \text{ Nmm}$$

$$\tau = \frac{8786}{4 \cdot (35 + 4) \cdot \pi} = 17,93 \text{ N/mm}^2 < \tau_{dop} = 40 \text{ N/mm}^2$$

5.2.3. Veza užeta s bubnjem

Veza užeta s bubnjem na glatkom bubnju ostvaruje se vijčanom vezom na vanjskoj strani vijenca bubnja. Uže izlazi kroz provrt na vijencu te u dva kružna namotaja naliježe na posebno izrađene utore vijencu bubnja te se tu vijčano spaja.

Sila u užetu pred ulazom u vijčanu vezu iznosi:

$$F_V = \frac{F_{u \max}}{e^{\mu_1 \alpha_2}} = \frac{1500}{e^{0,1 \cdot 4\pi}} = 426,9 \text{ N}$$

$\mu_1 = 0,1$ - faktor trenja za čelik prema [4], str 133.

$\alpha_2 = 4\pi$ - 2 navoja prije vijčane veze

Potrebna normalna sila u jednom vijku - prema [4], str. 133.

$$F_N = 2 \cdot \frac{F_V}{(\mu_1 + \mu_2) \cdot (e^{\mu_1 \alpha_2} + 1)}$$

$$F_N = 2 \cdot \frac{426,9}{(0,1 + 0,1) \cdot (e^{0,1 \cdot 2\pi} + 1)} = 1485 \text{ N}$$

$\alpha_2 = 2\pi$ - obuhvatni kut

$\mu_2 = 0,1$ - faktor trenja za zaobljeni žlijeb

Potreban broj vijaka prema opterećenju na vlak i savijanje: - prema [4], str 133.

$$z \geq \frac{F_N}{\sigma_{vdop}} \left(\frac{1,3}{A_V} + \frac{32 \cdot \mu_1 \cdot h}{\pi \cdot d_{v1}^3} \right) = \frac{1485}{144} \cdot \left[\frac{1,3}{12,7} + \frac{32 \cdot 0,1 \cdot 4,25}{\pi \cdot 4,134^3} \right] = 1,69 = \dots = 3$$

Odabran vijak **M5**, kvalitete materijala **6.6**

$$d_{v1} = 4,134\text{mm} \quad - \text{promjer jezgre vijka M5}$$

$$A_v = 12,7 \text{ mm}^2$$

$$h = 4,25 \text{ mm}$$

$$\text{Za materijal 6.6:} \quad \sigma_{vdop} = 144 \text{ N/mm}^2$$

Odabrana su **3** vijka M5 kvalitete materijala 6.6.

5.3. Izbor elektromotora

Odabir elektromotora se vrši na temelju vršne potrebne snage prilikom režima vuče koja je dobivena u poglavlju 2.4.2.

$$\text{Maksimalna potrebna snaga bez gubitaka:} \quad P_{\max} = 3250 \text{ W}$$

Gubici [kW]:

P_{gPP} - planetarnog prijenosnika = 3% prenesene nazivne snage (prema [15])

P_{gL} - kotrljajućih (valjnih) ležaja do 0,5 % prenesene nazivne snage po uležištenom vratilu = 0,5 % (odabrano)

P_{gB} - gubici na bubnju = 4 % prenesene nazivne snage (odabrano)

Ukupni gubici:

$$P_{guk} = 2 \cdot P_{gL} + P_{gB} + P_{gPP} = 2 \cdot 0,5 + 4 + 3 = 8\%$$

$$\eta'_{uk} = \frac{P}{P \left(1 + \frac{2 \cdot P_{gL}}{100} \right)} \cdot \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{gB}}{100} \right)} \cdot \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{gPP}}{100} \right)} =$$

$$= \frac{P}{P \left(1 + \frac{P_{guk}}{100} \right)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{8}{100} \right)} \approx 0,92$$

Potrebna snaga:

$$P_{potr} = \frac{P_{max}}{\eta'_{uk}} = \frac{3250}{0,92} = 3533 \text{ W}$$

Odabran istosmjerni motor (prema [17]):

Letrika AMK 4690 IM0388

$$P_{EM} = 4 \text{ kW}$$

$$n_N = 2400 \text{ min}^{-1}$$

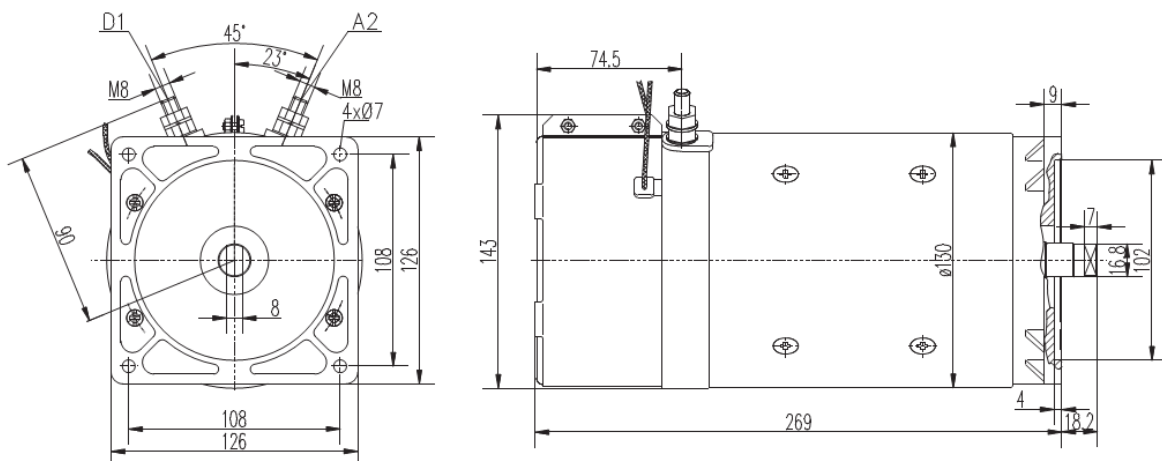
$$M_N = 14,1 \text{ Nm}$$

$$m_{EM} = 16 \text{ kg}$$

$$U_{EM} = 24 \text{ V}$$

$$S2 = 4 \text{ min}$$

$$S3 = 10\% \text{ ED}$$



Slika 24. Elektromotor Letrika AMK 4690 IM0388

Za regulaciju brzine vrtnje potreban je frekvencijski pretvarač. Ovo je osobito važno tijekom režima vuče parajedrilice kad se brzina užeta veći dio vremena kontinuirano mijenja.

Odabran frekvencijski pretvarač (prema [17]):

Letrika AEK

5.4. Izbor planetarnog prijenosnika

5.4.1. Odabir prijenosnog omjera prilikom vuče

Raspon brzina bubnja

Brzina užeta prilikom vuče parajedrilice kreće se od 1,5 m/s do 5,5 m/s.

$$v_u = 1,5 \dots 5,5 \text{ m/s}$$

Brzina bubnja:

Prilikom polijetanja:
$$n_{B1} = \frac{v_{u1} \cdot 60}{D_b \cdot \pi} = \frac{5,5 \cdot 60}{0,15 \cdot \pi} = 700 \text{ min}^{-1}$$

Prilikom vršnog opterećenja:
$$n_{B2} = \frac{v_{u2} \cdot 60}{(D_b + 2 \cdot h_n) \cdot \pi} = \frac{1,5 \cdot 60}{0,205 \cdot \pi} = 140 \text{ min}^{-1}$$

Potrebni prijenosni omjeri u odnosu na nominalnu brzinu elektromotora:

Prilikom polijetanja:
$$i_{PP1} = \frac{n_N}{n_{B1}} = \frac{2400}{700} = 3,43$$

Prilikom vršnog opterećenja:
$$i_{PP2} = \frac{n_N}{n_{B2}} = \frac{2400}{140} = 17,14$$

Odabrani prijenosni omjer:
$$i_{PP} = 3,43 \dots 17,14 = 7$$

Maksimalni moment na bubnju:

$$M_B = F_{u \max} \cdot \frac{D_b + 2 \cdot h_n}{2} = 1500 \cdot \frac{0,205}{2} = 153,75 \text{ Nm}$$

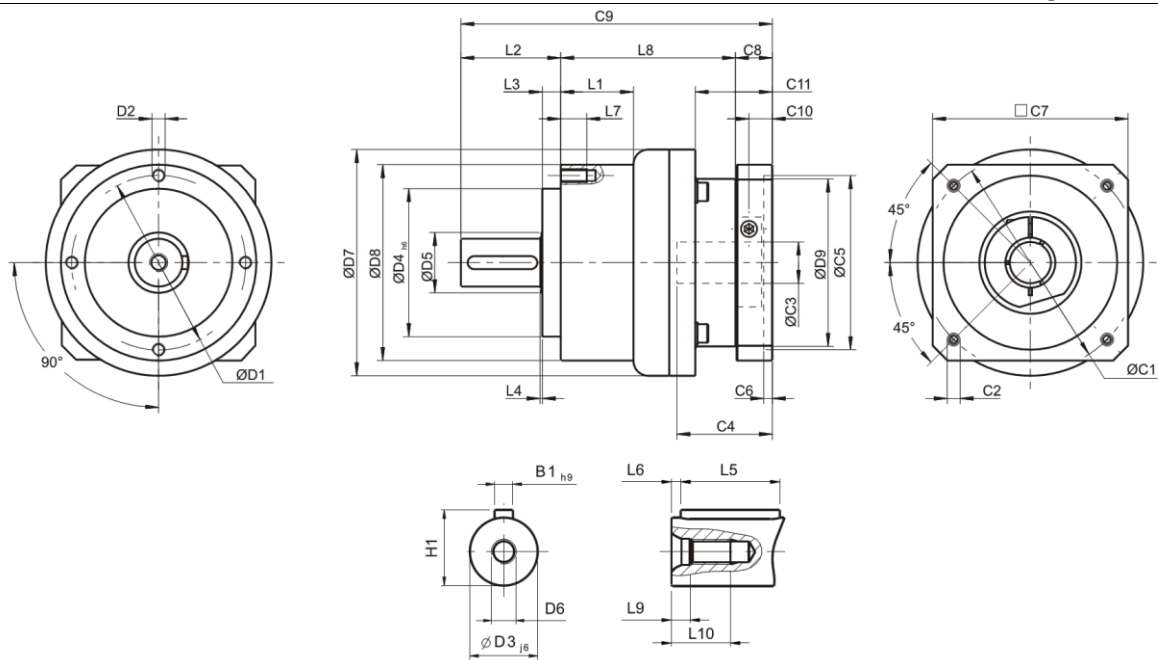
Odabrani planetarni prijenosnik: APEX Dynamics AE090

$$i_{PP} = 7$$

$$T_{2N} = 140 \text{ Nm}$$

$$T_{2NOT} = 3 \cdot T_{2N}$$

$$m_{PP} = 3,3 \text{ kg}$$



Slika 25. Planetarni prijenosnik APEX Dynamics AE090

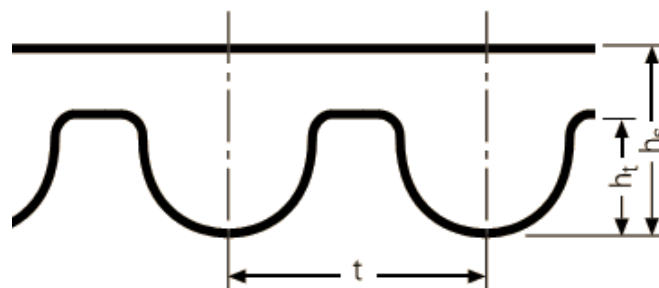
Tablica 5. Dimenzije planetarnog prijenosnika APEX Dynamics AE090

D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
80	M6	22	68	30	M8	104	90	77	33,5	46	8,5	1	32	3	12
L8	L9	L10	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	B1	H1
80,5	7,2	19	100	M6	22	40	80	4	90	17	143,5	10,75	35,5	6	24,5

5.5. Proračun remenskog prijenosa

Prilikom namatanja užeta s padobranom, nakon otkapčanja parajedriline, koristi se remenski prijenos sa zupčastim remenom tipa HTD.

Odabran je remen s korakom $t_{R1} = t_{R2} = 8 \text{ mm}$ (HTD 8M)



Slika 26. Remen tipa HTD

Modul: $m_{R1} = m_{R2} = \frac{t_{R1}}{\pi} = \frac{8}{\pi} = 2,546 \text{ mm}$

Brzina namatanja: $v_{u \max} = 15 \text{ m/s}$

Brzina bubnja: $n_{B \max} = \frac{v_{u \max}}{(D_b + 2 \cdot h_n) \cdot \pi} = \frac{15}{0,205 \cdot \pi} = 1397 \text{ min}^{-1}$

Potrebni prijenosni omjer: $i_R = \frac{n_N}{n_{B \max}} = \frac{2400}{1397} = 1,71$

Za remenski prijenos se koriste 4 remenice. Prve dvije remenice imaju isti broj zubi, to jest prijenosni omjer im je 1, a druge dvije remenice ostvaruju potrebni prijenosni omjer od 1,71.

Broj zubi remenica 1 i 2: $z_1 = z_2 = 22$

Broj zubi remenice 3: $z_3 = 26$

Broj zubi remenice 4: $z_4 = i_R \cdot z_3 = 1,71 \cdot 26 = 44,46 = \dots = 44$

Stvarni prijenosni omjer: $u_R = \frac{z_4}{z_3} = \frac{44}{26} = 1,69$

Maksimalni moment na remenici 3: $M_{R3} = F_R \cdot \frac{D_b + 2 \cdot h_n}{2} \cdot \frac{1}{u_R} \cdot \frac{1}{\eta_{R3}}$

$$\eta_{R3} = \eta_L \cdot \eta_B \cdot \eta_R = 0,995 \cdot 0,96 \cdot 0,95 = 0,91$$

$$M_{R3} = 143 \cdot \frac{0,15 + 2 \cdot 0,055}{2} \cdot \frac{1}{1,69} \cdot 0,91 = 12,09 \text{ Nm}$$

Promjer diobenih kružnica remenica 1 i 2: $d_1 = d_2 = m_{R1} \cdot z_1 = 2,546 \cdot 22 = 56,02 \text{ mm}$

Promjer diobene kružnice remenice 3: $d_3 = m_{R1} \cdot z_3 = 2,546 \cdot 26 = 66,21 \text{ mm}$

Promjer diobene kružnice remenice 4: $d_4 = m_{R1} \cdot z_4 = 2,546 \cdot 44 = 112,05 \text{ mm}$

Početni osni razmak: $a_R = 150 \text{ mm}$

Obuhvatni kut ([2], str. 297): $\cos \frac{\beta_2}{2} = \frac{d_4 - d_3}{2 \cdot a} = \frac{112,05 - 66,21}{2 \cdot 150} = 0,15279 \quad \beta_2 = 2,8348 \text{ rad}$

Brzina remena ([2], str. 297): $v_{R2} = d_4 \cdot \pi \cdot n_{BR} = 112,05 \cdot \pi \cdot 23,29 = 8,2 \text{ m/s}$

Vučna sila ([2], str. 298):
$$F_{R2} = \frac{2 \cdot M_{R3}}{d_3} = \frac{2 \cdot 12090}{66,21} = 365 \text{ N}$$

Broj zubi u zahvatu ([2], str. 298):
$$z_{Z3} = z_3 \cdot \frac{\beta_2}{2\pi} = 26 \cdot \frac{2,8348}{2\pi} = 11,73$$

Širina remena ([2], str. 298):
$$b_2 = \frac{c \cdot F_{R2}}{p_{dop} \cdot z_{Z3} \cdot h_{R2}} = \frac{1,25 \cdot 365}{0,85 \cdot 11,73 \cdot 3,4} = 13,46 \text{ mm}$$

Faktor opterećenja za prijenos zupčastim remenom: $c = 1,25$

Visina zuba remenica 3 i 4: $h_{R2} = 3,4 \text{ mm}$

Dopušteni tlak bokova zubi remenica 3 i 4: $p_{dop} = 0,85 \text{ N/mm}^2$

Odabrana standardna širina remena: $b_2 = 20 \text{ mm}$

Aktivna duljina remena 2:
$$L_{a2} = \beta_2 \cdot \frac{d_3}{2} + (2 \cdot \pi - \beta_2) \cdot \frac{d_4}{2} + 2 \cdot (a_R + 0,005) \cdot \sin \frac{\beta_2}{2}$$

$$L_{a2} = 2,8348 \cdot \frac{66,21}{2} + (2 \cdot \pi - 2,8348) \cdot \frac{112,05}{2} + 2 \cdot (150 + 0,005) \cdot \sin \frac{2,8348}{2} = 583,52 \text{ mm}$$

Odabran remen 2 (prema [16]): 584-8M-20

Stvarni osni razmak:
$$a'_R = \frac{L_{a2} - \beta_2 \cdot \frac{d_3}{2} + (2 \cdot \pi - \beta_2) \cdot \frac{d_4}{2}}{2 \cdot \sin \frac{\beta_2}{2}} - 0,005$$

$$a'_R = \frac{584 - 2,8348 \cdot \frac{66,21}{2} - (2 \cdot \pi - 2,8348) \cdot \frac{112,05}{2}}{2 \cdot \sin \frac{2,8348}{2}} - 0,005 = 150,24 = \dots = 150 \text{ mm}$$

Remen 1 ima isti osni razmak kao i remen 2.

Aktivna duljina remena 1:

$$L_{a1} = \pi \cdot \frac{d_1}{2} + 2 \cdot (a'_R + 0,005) = \pi \cdot \frac{56,02}{2} + 2 \cdot (150 + 0,005) = 388 \text{ mm}$$

Odabran remen 1 (prema [16]): 392-8M-20

5.6. Izbor spojki

5.6.1. Spojka 1 – vuča parajedrilice

Maksimalni moment na spojki 1:

$$M_{S1} = \frac{M_B}{\eta_L \cdot \eta_{PP} \cdot \eta_B} \cdot \frac{1}{i_{PP}} = \frac{153,75}{0,995 \cdot 0,97 \cdot 0,96} \cdot \frac{1}{7} = 23,7 \text{ Nm}$$

Odabrana elektromagnetska spojka (prema [14]):

Mayr ROBATIC 4 / 500.211.0 / 24 / 20 / 20 / DIN 6885/1

Zbog veoma kratkotrajnih faza vršnog opterećenja bilo je moguće odabrati spojku s nešto nižim nominalnim momentom. Također, zbog potrebe za veoma sporim podizanjem momenta prilikom vuče, zamašni momenti su zanemarivi prilikom izbora.

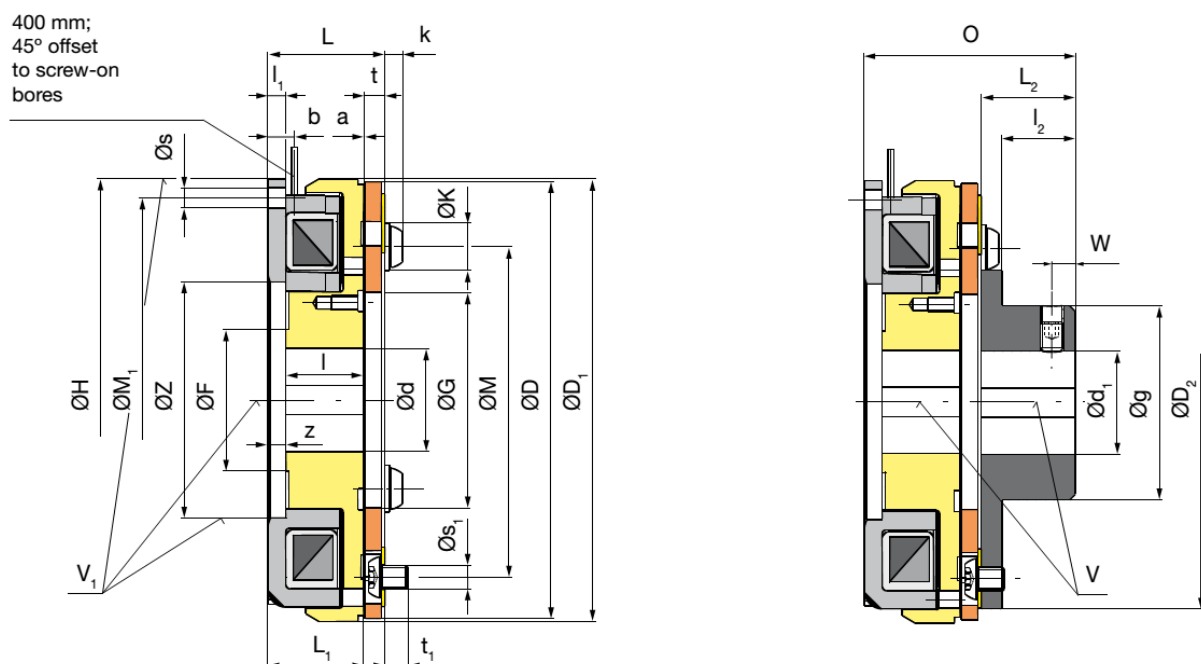
Karakteristike spojke 1:

$$M_{2N(S1)} = 20 \text{ Nm}$$

$$P_{20(S1)} = 26 \text{ W}$$

$$m_{S1} = 1,16 \text{ kg}$$

$$n_{\max S1} = 7000 \text{ min}^{-1}$$



Slika 27. Elektromagnetska spojka Mayr ROBATIC 4 / 500.211.0 / 24

Tablica 6. Dimenzije spojke 1

Ød^{H7}	Ød_1^{H7}	a	b	D	D₁	D₂	G	g	H_{h9}
20	20	0,2	4	92	100	70	49	29,5	100
K	k	L	L₁	L₂	l	l₁	l₂	M	M₁
3 x 4,6	1,7	31,1	26,5	20	24	4,3	16	60	90
O	s	s₁	t	t₁	V	V₁	W	Z^{H8}	Z
51,1	4 x 5,7	3 x M4	4,4	5,2	0,05	0,15	5	42	2,5

5.6.2. Spojka 2 – namatanje užeta s malim padobranom

Maksimalni moment na spojki 2: $M_{S2} = \frac{M_{R3}}{\eta_L} = \frac{12,09}{0,995} = 12,1 \text{ Nm}$

Odabrana elektromagnetska spojka (prema [14]):

Mayr ROBATIC 4 / 500.211.0 / 24 / 17 / 17 / DIN 6885/1

Odabrana je ista spojka kao u prvom slučaju, ali s manjim provrtima za vratila.

Karakteristike spojke 2:

$$M_{2N(S2)} = 20 \text{ Nm}$$

$$P_{20(S2)} = 26 \text{ W}$$

$$m_{S2} = 1,16 \text{ kg}$$

$$n_{\max S2} = 7000 \text{ min}^{-1}$$

Tablica 7. Dimenzije spojke 2

Ød^{H7}	Ød_1^{H7}	a	b	D	D₁	D₂	G	g	H_{h9}
17	17	0,2	4	92	100	70	49	29,5	100
K	k	L	L₁	L₂	l	l₁	l₂	M	M₁
3 x 4,6	1,7	31,1	26,5	20	24	4,3	16	60	90
O	s	s₁	t	t₁	V	V₁	W	Z^{H8}	Z
51,1	4 x 5,7	3 x M4	4,4	5,2	0,05	0,15	5	42	2,5

5.7. Vratila – dimenzioniranje i kontrolni proračun

5.7.1. Vratilo 1 – izlazno vratilo elektromotora i vratilo remenice 1

Vratilo 1 je više opterećeno u režimu vuče parajedrilice te će biti proračunato prema tom režimu. Vratilo 1 je u tom režimu opterećeno samo torzijski.

Oblikovanje vratila: dužinske procjene prema konstrukciji.

Proračun svih vratila prema [11] i [12].

Dopuštena naprezanja za materijal vratila St 60-2 (prema [2]):

$$\sigma_{fDNdop} = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{tDI dop} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Reducirani moment:

$$M'_{1red1} = \sqrt{0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V1})^2} =$$

$$M'_{1red1} = \sqrt{0,75 \cdot (0,736 \cdot 23,82)^2} = 15,18 \text{ Nm}$$

Faktor čvrstoće za materijal vratila St 60-2:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{280}{1,73 \cdot 220} = 0,736$$

Okretni moment koji opterećuje vratilo 1:

$$T_{V1} = \frac{M_{S1}}{\eta_{VL}} = \frac{23,7}{0,995} = 23,82 \text{ Nm}$$

Promjer vratila:

$$d_{V1} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M'_{1red1}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{15180}{80}} = 12,47 \text{ mm}$$

Odabrani promjer vratila 1:

$$d_{V1} = 20 \text{ mm}$$

Kontrola sigurnosti u presjecima:

Presjek I-I (dosjed remenice – spoj perom):

$$\text{Faktor } \beta_{ktl} = f(\text{pero}) = 1,8$$

$$\begin{aligned} M_{1redI} &= \sqrt{0,75(\alpha_0 \cdot T_{V1} \cdot \beta_{ktl})^2} = \\ &= \sqrt{0,75(0,736 \cdot 23,82 \cdot 1,8)^2} = 27,33 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\sigma_{1redI} = \frac{M_{1redI}}{W_{1I}} = \frac{27330}{800} = 34,16 \text{ N/mm}^2$$

$$W_{1I} = 0,1 \cdot d_{V1}^3 = 800 \text{ mm}^3$$

$$S_{1I} = \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{1redI}} = \frac{280 \cdot 0,95 \cdot 0,9}{34,16} = 7 > S_{potr} = 1,5$$

5.7.2. Vratilo 2 remenice 2

Oblikovanje vratila: dužinske procjene prema konstrukciji.

Sile koje opterećuju vratilo:

$$\text{Sila u remenu: } F_{R1} = \frac{2 \cdot M_{S2}}{d_1} = \frac{2 \cdot 12120}{56} = 432 \text{ N}$$

$$\text{Radijalna sila: } F_{r2} = 2 \cdot F_{R1} = 864 \text{ N}$$

Reakcije R_{A2} i R_{B2} :

$$R_{A2} = \frac{F_{r2} \cdot 25}{75} = 288 \text{ N}$$

$$R_{B2} = F_{r2} - R_{AH} = 864 - 288 = 576 \text{ N}$$

Dopuštena naprezanja za materijal vratila St 60-2 (prema [2]):

$$\sigma_{fDNdop} = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{iDldop} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

$$M_{2I} = R_{A2} \cdot 0,05 = 14,4 \text{ Nm}$$

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

$$M'_{2red1} = \sqrt{M_{2I}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V2})^2} =$$

$$M'_{2red1} = \sqrt{14,4^2 + 0,75 \cdot (0,736 \cdot 12,18)^2} = 16,36 \text{ Nm}$$

Faktor čvrstoće za materijal vratila St 60-2:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{dI}} = \frac{280}{1,73 \cdot 220} = 0,736$$

Okretni moment koji opterećuje vratilo 2:

$$T_{V2} = \frac{M_{S2}}{\eta_{VL}} = \frac{12,12}{0,995} = 12,18 \text{ Nm}$$

Promjer vratila:

$$d_{IV2} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{M'_{2red1}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{16360}{80}} = 12,78 \text{ mm}$$

Odabrani promjeri:

$$d_{IV2} = 17 \text{ mm} \quad d_{2V2} = 15 \text{ mm}$$

Kontrola sigurnosti u presjecima:

Presjek I-I (spoj perom):

$$\text{Faktor } \beta_{ktI} = f(\text{pero}) = 1,8$$

$$M_{2redI} = \sqrt{(M_{2I})^2 + 0,75(\alpha_0 \cdot T_{V2} \cdot \beta_{ktI})^2} =$$

$$= \sqrt{16,36^2 + 0,75(0,736 \cdot 12,18 \cdot 1,8)^2} = 21,52 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{2redI} = \frac{M_{2redI}}{W_{2I}} = \frac{21520}{491} = 43,83 \text{ N/mm}^2$$

$$W_{2I} = 0,1 \cdot d_{IV2}^3 = 491 \text{ mm}^3$$

$$S_{2I} = \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{2redI}} = \frac{280 \cdot 0,97 \cdot 0,9}{43,83} = 5,58 > S_{potr} = 1,5$$

5.7.3. Vratilo 3 zupčanika 3

Oblikovanje vratila: dužinske procjene prema konstrukciji.

Sile koje opterećuju vratilo:

$$\text{Sila u remenu 2: } F_{R2} = 365 \text{ N}$$

$$\text{Radijalna sila: } F_{r3} = 2 \cdot F_{R2} \cdot \cos \frac{\pi - \beta_2}{2} = 696 \text{ N}$$

Reakcija R_{A3} :

$$R_{A3} = F_{r3} = 696 \text{ N}$$

Dopuštena naprežanja za materijal vratila St 60-2 (prema [2]):

$$\sigma_{fDNdop} = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{iDIdop} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

$$M_{3I} = R_{A3} \cdot 0,05 = 34,8 \text{ Nm}$$

$$M_{3II} = R_{A3} \cdot 0,01 = 6,96 \text{ Nm}$$

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

$$M'_{3red1} = \sqrt{M_{3I}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V3})^2} =$$

$$M'_{3red1} = \sqrt{34,8^2 + 0,75 \cdot (0,736 \cdot 12,12)^2} = 35,65 \text{ Nm}$$

Faktor čvrstoće za materijal vratila St 60-2:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{DI}} = \frac{280}{1,73 \cdot 220} = 0,736$$

Okretni moment koji opterećuje vratilo 3:

$$T_{V3} = M_{S2} = 12,12 \text{ Nm}$$

$$M'_{3red2} = \sqrt{M_{3II}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V3})^2} = \sqrt{6,96^2 + 0,75 \cdot (0,736 \cdot 12,12)^2} = 10,4 \text{ Nm}$$

Promjeri vratila:

$$d_{IV3} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{M'_{3red1}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{35650}{80}} = 16,57 \text{ mm}$$

$$d_{2V3} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{M'_{3red2}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{10400}{80}} = 10,99 \text{ mm}$$

Odabrani promjeri:

$$d_{IV3} = 20 \text{ mm} \quad d_{2V3} = 17 \text{ mm}$$

Kontrola sigurnosti u presjecima:Presjek I-I (spoj perom):

$$\text{Koficijen } t \beta_{ktI} = f(\text{pero}) = 1,8$$

$$\begin{aligned} M_{3redI} &= \sqrt{(M_{3I})^2 + 0,75(\alpha_0 \cdot T_{V3} \cdot \beta_{ktI})^2} = \\ &= \sqrt{34,8^2 + 0,75(0,736 \cdot 12,12 \cdot 1,8)^2} = 37,48 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$\sigma_{3redI} = \frac{M_{redI}}{W_{3I}} = \frac{37480}{800} = 46,85 \text{ N/mm}^2$$

$$W_{3I} = 0,1 \cdot d_{IV3}^3 = 800 \text{ mm}^3$$

$$S_{3I} = \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{3redI}} = \frac{280 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{46,85} = 4,84 > S_{potr} = 1,5$$

Presjek II-II: Naslon ležaja

$$\text{Za vratilo St 60-2: } R_m = 660 \text{ N/mm}^2$$

Faktor β_{kfII}

$$\beta_{kfII} = 1 + c_1(\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,45 \cdot (2,5 - 1) = 1,68$$

$$c_1 = f(d_1/d_2 = 20/17 = 1,18) = 0,45$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d_2 = 0,3/20 = 0,015; R_m) = 2,5$$

Faktor β_{ktII}

$$\beta_{ktII} = 1 + c_2(\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,78(1,8 - 1) = 1,62$$

$$c_2 = f(d1/d2 = 20/17 = 1,18) = 0,78$$

$$\beta_{kt1,4} = f(\rho/d_2 = 0,015; R_m) = 1,8$$

$$\begin{aligned}
 M_{3redII} &= \sqrt{(M_{II} \cdot \beta_{kfII})^2 + 0,75(\alpha_0 \cdot T_{V1} \cdot \beta_{kII})^2} = \\
 &= \sqrt{(6,96 \cdot 1,68)^2 + 0,75(0,736 \cdot 12,12 \cdot 1,62)^2} = 17,13 \text{ Nm} \\
 \sigma_{3redII} &= \frac{M_{3redII}}{W_{3II}} = \frac{17130}{491} = 34,89 \text{ N/mm}^2 \\
 W_{3II} &= 0,1 \cdot d_{2V3}^3 = 491 \text{ mm}^3 \\
 S_{3II} &= \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{3redII}} = \frac{280 \cdot 0,97 \cdot 0,9}{34,89} = 7 > S_{potr} = 1,5
 \end{aligned}$$

Presjek III-III: Dosjed ležaja

$$\begin{aligned}
 \text{Faktori: } \beta_{kfIII} &= 2,0 & \beta_{kIII} &= (60..70\%) \cdot \beta_{kf} = 1,3 \\
 M_{3redIII} &= \sqrt{0,75(\alpha_0 \cdot T_{V3} \cdot \beta_{kIII})^2} = \\
 &= \sqrt{0,75(0,736 \cdot 12,12 \cdot 1,3)^2} = 10,04 \text{ Nm} \\
 \sigma_{3redIII} &= \frac{M_{3redIII}}{W_{3III}} = \frac{10040}{491} = 20,45 \text{ N/mm}^2 \\
 W_{3III} &= 0,1 \cdot d_{2V3}^3 = 491 \text{ mm}^3 \\
 S_{3III} &= \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{3redIII}} = \frac{280 \cdot 0,97 \cdot 0,9}{20,45} = 11,95 > S_{potr} = 1,5
 \end{aligned}$$

5.7.4. Vratilo 4 – ulazno vratilo planetarnog prijenosnika

Vratilo 4 je opterećeno u režimu vuče parajedriline te će biti proračunato prema tom režimu. U tom režimu je opterećeno samo torzijski.

Oblikovanje vratila: dužinske procjene prema konstrukciji.

Dopuštena naprežanja za materijal vratila St 60-2 (prema [2]):

$$\sigma_{fDNdop} = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{tIdop} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Reducirani moment:

$$M'_{4red1} = \sqrt{0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V4})^2} =$$

$$M'_{4red1} = \sqrt{0,75 \cdot (0,736 \cdot 23,7)^2} = 15,11 \text{ Nm}$$

Faktor čvrstoće za materijal vratila St 60-2:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{280}{1,73 \cdot 220} = 0,736$$

Okretni moment koji opterećuje vratilo 4:

$$T_{V4} = M_{S1} = 23,7 \text{ Nm}$$

Promjer vratila:

$$d_{IV4} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{M'_{4red1}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,17 \sqrt[3]{\frac{15110}{80}} = 12,45 \text{ mm}$$

Odabrani promjer:

$$d_{IV4} = 20 \text{ mm}$$

Kontrola sigurnosti u presjecima:

Presjek I-I (pero):

$$\text{Faktor } \beta_{ktI} = f(\text{pero}) = 1,8$$

$$M_{4redI} = \sqrt{0,75(\alpha_0 \cdot T_{V4} \cdot \beta_{ktI})^2} =$$

$$= \sqrt{0,75(0,736 \cdot 23,7 \cdot 1,8)^2} = 27,19 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{4redI} = \frac{M_{4redI}}{W_{4I}} = \frac{27190}{800} = 33,99 \text{ N/mm}^2$$

$$W_{4I} = 0,1 \cdot d_{IV4}^3 = 800 \text{ mm}^3$$

$$S_{4I} = \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{4redI}} = \frac{280 \cdot 0,9 \cdot 0,9}{33,99} = 6,67 > S_{potr} = 1,5$$

5.7.5. Vratilo 5 – vratilo bubnja

Oblikovanje vratila: dužinske procjene prema konstrukciji.

Sile koje opterećuju vratilo:

$$\text{Sila na bubnju: } F_{u \max} = 1500 \text{ N}$$

$$\text{Radijalna sila: } F_{r5} = F_{u \max} = 1500 \text{ N}$$

Radijalna sila je pomična te se reakcije u osloncima mijenjaju. Maksimalni iznosi su sljedeći:

$$\text{Reakcija } R_{A5}: \quad R_{A5} = \frac{F_{r5} \cdot 125}{200} = 937,5 \text{ N}$$

$$\text{Reakcija } R_{B5}: \quad R_{B5} = 1500 \text{ N}$$

Dopuštena naprezanja za materijal vratila St 60-2 (prema [2]):

$$\sigma_{fDNdop} = 80 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{tDIdop} = 50 \text{ N/mm}^2$$

Momenti savijanja u pojedinim presjecima:

$$M_{5I} = R_{A5} \cdot 0,2 = 187,5 \text{ Nm}$$

$$M_{5II} = R_{A5} \cdot 0,1 = 93,75 \text{ Nm}$$

Reducirani momenti u pojedinim presjecima:

$$M'_{5red1} = \sqrt{M_{5I}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V5})^2} =$$

$$M'_{5red1} = \sqrt{187,5^2 + 0,75 \cdot (0,736 \cdot 161)^2} = 213,7 \text{ Nm}$$

Faktor čvrstoće za materijal vratila St 60-2:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = \frac{280}{1,73 \cdot 220} = 0,736$$

Okretni moment koji opterećuje vratilo 5:

$$T_{V5} = M_B = 161 \text{ Nm}$$

$$M'_{5red2} = \sqrt{M_{5II}^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_{V5})^2} = \sqrt{93,75^2 + 0,75 \cdot (0,736 \cdot 161)^2} = 139 \text{ Nm}$$

Promjeri vratila:

$$d_{1V5} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{M'_{5red1}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{213700}{80}} = 30,11 \text{ mm}$$

$$d_{2V5} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{M'_{5red2}}{\sigma_{fDNdop}}} = 2,173 \sqrt[3]{\frac{139000}{80}} = 26,09 \text{ mm}$$

Odabrani promjeri:

$$D_{1V5} / d_{1V5} = 40 \text{ mm} / 22 \text{ mm} \quad - \text{ šuplje vratilo}$$

$$d_{2V5} = 35 \text{ mm}$$

Kontrola sigurnosti u presjecima:

Presjek I-I (pero):

$$\text{Koeficijent } \beta_{ktl} = f(\text{pero}) = 1,8$$

$$M_{5redI} = \sqrt{(M_{5I})^2 + 0,75(\alpha_0 \cdot T_{V5} \cdot \beta_{ktl})^2} = \\ = \sqrt{187,5^2 + 0,75(0,736 \cdot 161 \cdot 1,8)^2} = 263,2 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{5redI} = \frac{M_{5redI}}{W_{5I}} = \frac{263200}{5814} = 45,27 \text{ N/mm}^2$$

$$W_{5I} = 0,1 \cdot \frac{D_{1V5}^4 - d_{1V5}^4}{D_{1V5}} = 5814 \text{ mm}^3$$

$$S_{5I} = \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{5redI}} = \frac{280 \cdot 0,85 \cdot 0,8}{45,27} = 4,2 > S_{potr} = 1,5$$

Presjek II-II: Naslon ploče

$$\text{Za vratilo St 60-2: } R_m = 660 \text{ N/mm}^2$$

Faktor β_{kfl}

$$\beta_{kfl} = 1 + c_1(\beta_{kf2} - 1) = 1 + 0,37 \cdot (2,5 - 1) = 1,56$$

$$c_1 = f(d_1/d_2 = 40/35 = 1,14) = 0,37$$

$$\beta_{kf2} = f(\rho/d_2 = 0,5/35 = 0,014; R_m) = 2,5$$

Faktor β_{ktl}

$$\beta_{ktl} = 1 + c_2(\beta_{kt1,4} - 1) = 1 + 0,68(1,8 - 1) = 1,54$$

$$c_2 = f(d1/d2 = 40/35 = 1,14) = 0,68$$

$$\beta_{kt1,4} = f(\rho/d_2 = 0,014; R_m) = 1,8$$

$$\begin{aligned}
 M_{5redII} &= \sqrt{(M_{5II} \cdot \beta_{kfII})^2 + 0,75(\alpha_0 \cdot T_{V5} \cdot \beta_{ktII})^2} = \\
 &= \sqrt{(93,75 \cdot 1,56)^2 + 0,75(0,736 \cdot 161 \cdot 1,54)^2} = 215,3 \text{ Nm} \\
 \sigma_{5redII} &= \frac{M_{5redII}}{W_{5II}} = \frac{215300}{4288} = 50,21 \text{ N/mm}^2 \\
 W_{5II} &= 0,1 \cdot d_{2V5}^3 = 4288 \text{ mm}^3 \\
 S_{5II} &= \frac{\sigma_{fDN} \cdot b_1 \cdot b_2}{\sigma_{5redII}} = \frac{280 \cdot 0,87 \cdot 0,9}{50,21} = 4,37 > S_{potr} = 1,5
 \end{aligned}$$

5.8. Izbor ležaja

5.8.1. Ležaj vratila 2

Reakcija u osloncu ležaja: $F = R_{A2} = 288 \text{ N}$

Brzina vrtnje vratila 2: $n_{V2} = 2400 \text{ min}^{-1}$

Vijek trajanja: $L_h = 6000 \text{ h}$

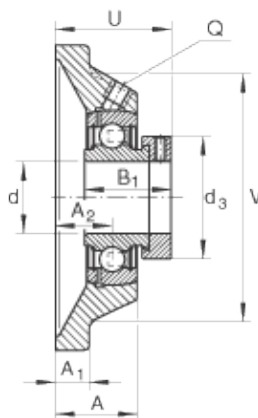
Ukupni broj okretaja: $L = L_h \cdot n_{V2} \cdot 60 = 6000 \cdot 2400 \cdot 60 = 864 \cdot 10^6 \text{ okr}$

Dinamička nosivost ležaja: $C = \sqrt[3]{\frac{L}{10^6} \cdot \frac{F}{f_H}} = \sqrt[3]{\frac{864 \cdot 10^6}{10^6} \cdot \frac{288}{1}} = 2743 \text{ N}$

Faktor tvrdoće: $f_H = 1$

Odabran jednoreadni radijalni kuglični ležaj **FAG PCJ15** za vratilo promjera $d = 15 \text{ mm}$ [13].

$$C_r = 9600 \text{ N} > C = 2743 \text{ N}$$



Slika 28. Ležaj FAG PCJ15

5.8.2. Ležaj vratila 3

Reakcija u osloncu ležaja: $F = R_{A3} = 696 \text{ N}$

Brzina vrtnje vratila 3: $n_{V3} = 2400 \text{ min}^{-1}$

Vijek trajanja: $L_h = 6000 \text{ h}$

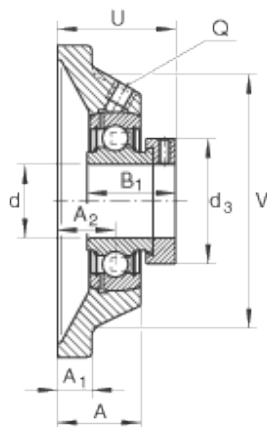
Ukupni broj okretaja: $L = L_h \cdot n_{V3} \cdot 60 = 6000 \cdot 2400 \cdot 60 = 864 \cdot 10^6 \text{ okr}$

Dinamička nosivost ležaja: $C = \sqrt[3]{\frac{L}{10^6} \cdot \frac{F}{f_H}} = \sqrt[3]{\frac{864 \cdot 10^6}{10^6} \cdot \frac{696}{1}} = 6629 \text{ N}$

Faktor tvrdoće: $f_H = 1$

Odabran jednoredni radijalni kuglični ležaj **FAG PCJ17** za vratilo promjera $d = 17 \text{ mm}$ [13].

$C_r = 9600 \text{ N} > C = 6629 \text{ N}$



Slika 29. Ležaj FAG PCJ17

5.8.3. Ležajevi bubnja

Reakcija u osloncu ležaja: $F = R_{A5} = 937,5 \text{ N}$

Prosječna brzina vrtnje bubnja: $n_{V5} = 282 \text{ min}^{-1}$

Vijek trajanja: $L_h = 6000 \text{ h}$

Ukupni broj okretaja: $L = L_h \cdot n_{V5} \cdot 60 = 6000 \cdot 282 \cdot 60 = 102 \cdot 10^6 \text{ okr}$

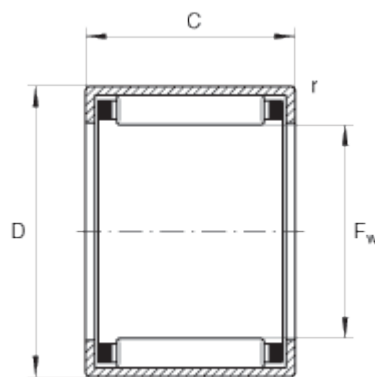
Dinamčka nosivost ležaja:
$$C = \sqrt[3]{\frac{L}{10^6} \cdot \frac{F}{f_H}} = \sqrt[3]{\frac{102 \cdot 10^6}{10^6} \cdot \frac{937,5}{1}} = 4380 \text{ N}$$

Faktor tvrdoće:
$$f_H = 1$$

Zbog konstrukcijskih razloga potreban je lijevo ležaj s tankim valjnim elementima.

Lijevo je odabran jednoredni radijalni iglični ležaj: **FAG HK5020** dimenzija $d/D \times B = 50/58 \times 20$ [13].

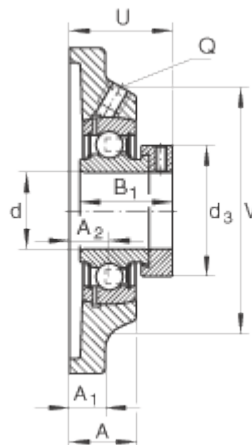
$$C_r = 31000 \text{ N} > C = 4380 \text{ N}$$



Slika 30. Ležaj FAG HK5020

Desno je odabran jednoredni radijalni kuglični ležaj: **FAG PCF30** za vratilo promjera $d = 30$ mm [13].

$$C_r = 11300 \text{ N} > C = 4380 \text{ N} \quad - \quad \text{statičko opterećenje}$$



Slika 31. Ležaj FAG PCF30

5.9. Proračun pera

5.9.1. Spoj remenice 1 i vratila 1

Bočni tlak na pero:
$$p = \frac{F_{t1}}{0,5 \cdot h_{p1} \cdot l_{t1} \cdot i}$$

Dopušteni tlak:
$$p_{pdop} = 100 \text{ N/mm}^2$$

Minimalna nosiva duljina pera:
$$l_{t1} \geq \frac{F_{t1}}{0,5 \cdot h_{p1} \cdot p_{pdop} \cdot i} = \frac{1282}{0,5 \cdot 6 \cdot 100 \cdot 1} = 4,27 \text{ mm}$$

Visina pera (uzeto iz konstrukcije):
$$h_{p1} = 6 \text{ mm}$$

Broj pera (uzeto iz konstrukcije):
$$i = 1$$

Obodna sila na vratilu:
$$F_{t1} = \frac{2 \cdot T_{V2}}{d_{V1}} = \frac{2 \cdot 12,82}{0,02} = 1282 \text{ N}$$

Odabrana nosiva duljina pera:
$$l_{t1} = 15 \text{ mm}$$

5.9.2. Spoj remenice 2 i vratila 2, spojke 2 i vratila 2 i spojke 2 i vratila 3

Minimalna nosiva duljina pera ([2] str. 112):
$$l_{t2} \geq \frac{F_{t2}}{0,5 \cdot h_{p2} \cdot p_{pdop} \cdot i} = \frac{1426}{0,5 \cdot 5 \cdot 100 \cdot 1} = 5,7 \text{ mm}$$

Visina pera (uzeto iz konstrukcije):
$$h_{p2} = 5 \text{ mm}$$

Broj pera (uzeto iz konstrukcije):
$$i = 1$$

Obodna sila na vratilu:
$$F_{t2} = \frac{2 \cdot T_{V2}}{d_{1V2}} = \frac{2 \cdot 12,12}{0,017} = 1426 \text{ N}$$

Odabrana nosiva duljina pera:
$$l_{t2} = 15 \text{ mm}$$

5.9.3. Spoj remenice 3 i vratila 3

Minimalna nosiva duljina pera:
$$l_{t3} \geq \frac{F_{t3}}{0,5 \cdot h_{p3} \cdot p_{pdop} \cdot i} = \frac{1209}{0,5 \cdot 6 \cdot 100 \cdot 1} = 4 \text{ mm}$$

Visina pera (uzeto iz konstrukcije):
$$h_{p3} = 6 \text{ mm}$$

Broj pera (uzeto iz konstrukcije):
$$i = 1$$

$$\text{Obodna sila na vratilu: } F_{t3} = \frac{2 \cdot T_{V3}}{d_{2V3}} = \frac{2 \cdot 12,09}{0,02} = 1209 \text{ N}$$

$$\text{Odabrana nosiva duljina pera: } l_{t3} = 15 \text{ mm}$$

5.9.4. Spoj spojke 1 i vratila 1 i spojke 1 i vratila 4

$$\text{Minimalna nosiva duljina pera: } l_{t4} \geq \frac{F_{t4}}{0,5 \cdot h_{p4} \cdot p_{pdop} \cdot i} = \frac{2370}{0,5 \cdot 6 \cdot 100 \cdot 1} = 7,9 \text{ mm}$$

$$\text{Visina pera (uzeto iz konstrukcije): } h_{p4} = 6 \text{ mm}$$

$$\text{Broj pera (uzeto iz konstrukcije): } i = 1$$

$$\text{Obodna sila na vratilu: } F_{t4} = \frac{2 \cdot T_{V4}}{d_{1V4}} = \frac{2 \cdot 23,7}{0,02} = 2370 \text{ N}$$

$$\text{Odabrana nosiva duljina pera: } l_{t4} = 15 \text{ mm}$$

5.10. Sustav za koaksijalno namatanje užeta

Za sustav koaksijalnog namatanja koristi se vreteno s povratnim zatvorenim navojem koji je u jednom smjeru lijevovojan, a u drugom desnovojan. Brzina se s bubnja na vreteno prenosi remenskim prijenosom što omogućuje sinkronizaciju gibanja.

5.10.1. Vreteno za namatanje

$$\text{Broj namotaja po jednom sloju užeta na bubnju: } n_u = \frac{l_B}{d_u} = \frac{250}{2,5} = 100$$

$$\text{Prijenosni omjer remenskog prijenosa između bubnja i vretena: } i_{RN} = 4$$

$$\text{Potrebni korak uspona navoja na vretenu: } P_h = \frac{i_{RN} \cdot l_b}{n_u} = \frac{4 \cdot 250}{100} = 10 \text{ mm}$$

5.10.2. Remenski prijenos

Odabran je remen s korakom $t_{R3} = 5 \text{ mm}$ (HTD 5M)

$$\text{Modul: } m_{R3} = \frac{t_{R3}}{\pi} = \frac{5}{\pi} = 1,592 \text{ mm}$$

Broj zubi remenice 5: $z_5 = 18$

Broj zubi remenice 6: $z_6 = i_{RN} \cdot z_5 = 4 \cdot 18 = 72$

Promjer diobene kružnice remenice 5: $d_5 = m_{R3} \cdot z_5 = 1,592 \cdot 18 = 28,65 \text{ mm}$

Promjer diobene kružnice remenice 6: $d_6 = m_{R3} \cdot z_6 = 1,59 \cdot 72 = 114,59 \text{ mm}$

Početni osni razmak: $a_{RN} = 249 \text{ mm}$

Obuhvatni kut: $\cos \frac{\beta_3}{2} = \frac{d_6 - d_5}{2 \cdot a_{RN}} = \frac{114,59 - 28,65}{2 \cdot 249} = 0,1725 \quad \beta_3 = 2,7948 \text{ rad}$

Aktivna duljina remena 3: $L_{a3} = \beta_3 \cdot \frac{d_5}{2} + (2 \cdot \pi - \beta_3) \cdot \frac{d_6}{2} + 2 \cdot (a + 0,005) \cdot \sin \frac{\beta_3}{2}$

$$L_{a3} = 2,7948 \cdot \frac{28,65}{2} + (2 \cdot \pi - 2,7948) \cdot \frac{114,59}{2} + 2 \cdot (249 + 0,005) \cdot \sin \frac{2,7948}{2} = 730,58 \text{ mm}$$

Odabrani remen 3 (prema [16]): 735-5M-09

Stvarni osni razmak: $a'_{RN} = \frac{L'_{a3} - \beta_3 \cdot \frac{d_5}{2} + (2 \cdot \pi - \beta_3) \cdot \frac{d_6}{2}}{2 \cdot \sin \frac{\beta_3}{2}} - 0,005$

$$a'_{RN} = \frac{735 - 2,7948 \cdot \frac{28,65}{2} - (2 \cdot \pi - 2,7948) \cdot \frac{114,59}{2}}{2 \cdot \sin \frac{2,7948}{2}} - 0,005 = 251,3 = \dots = 249 \text{ mm}$$

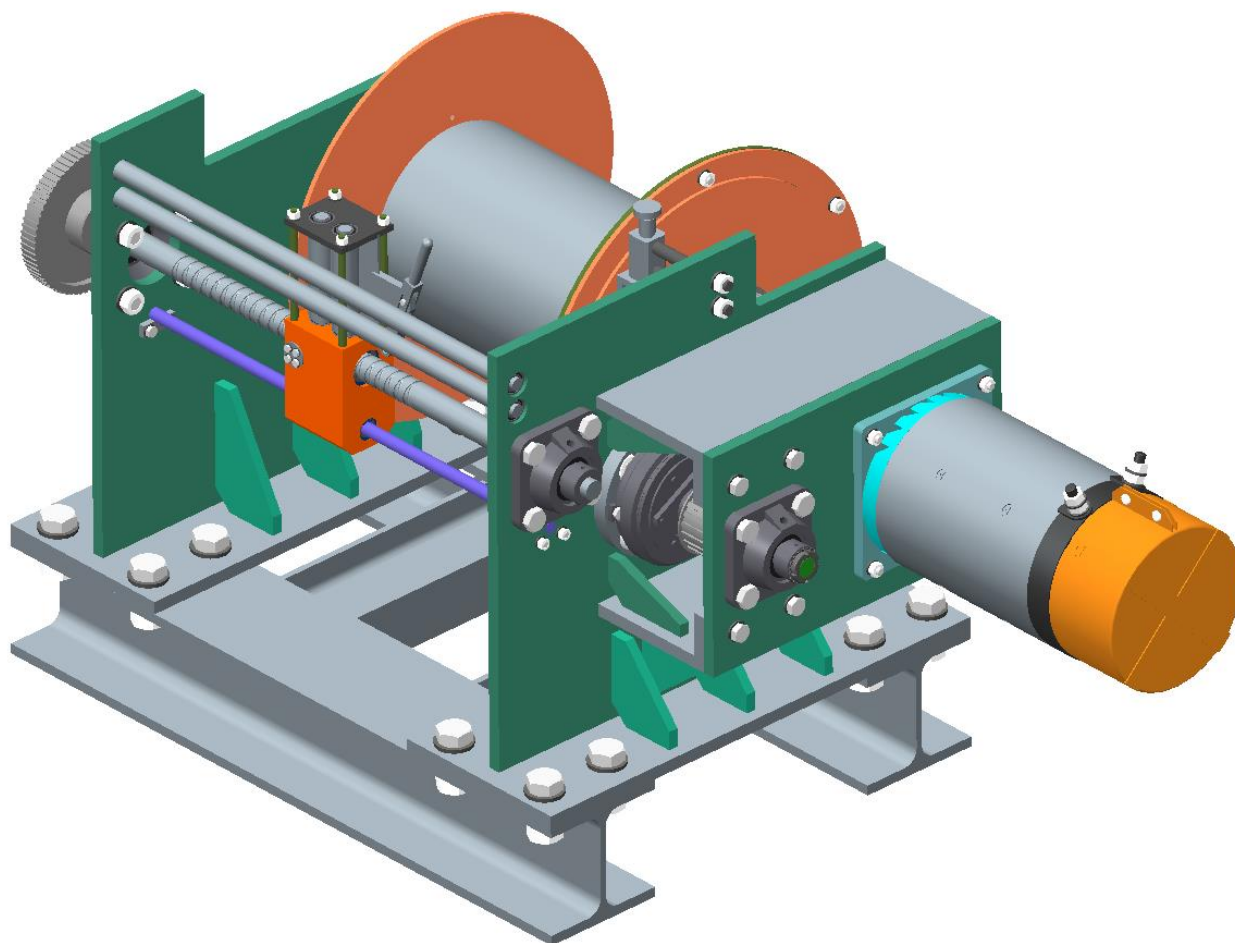
6. ZAKLJUČAK

Statička vitla za vuču parajedrilica su uglavnom konstruirana na temelju iskustvenih podataka te u pojedinačnim izvedbama ili malim serijama za specifične potrebe. Iako je i ovaj rad krenuo s manjim brojem iskustvenih podataka koristeći područja koja se preklapaju u vuči parajedrilica poput aerodinamike i klasične mehanike i dinamike razvijen je fizikalni model vuče parajedrilice, primarno za statičku vuču koji se može uz minimalne preinake koristiti i za pay-out vuču. Model je dao odnose sila i brzina vuče te rezultirajuće potrebe za snagom tijekom svih faza leta, od polijetanja do otpuštanja, i u oba režima rada (vuča parajedrilice i namatanje užeta s malim padobranom).

U fazi koncipiranja odabran je sustav s istosmjernim elektromotorom s frekvencijskim pretvaračem što omogućuje finu regulaciju brzine vuče, što s klasičnim benzinskim rješenjima nije bilo moguće postići. Smještanjem glavnog prijenosnika unutar bubnja smanjene su dimenzije uređaja, zaobilaznim remenskim prijenosom omogućeno je prebacivanje u režim rada namatanja užeta bez potrebe za korištenjem drugog manjeg motora na suprotnoj strani bubnja.

U radu je dana kompletna konstrukcijska razrada te tehnički proračun svih relevantnih dijelova.

U sljedećoj fazi razrade ovakvih uređaja mogla bi se vršiti precizna mjerenja sile i brzine vuče na terenu. Ovakvi podaci omogućili bi kvalitetnije modeliranje cjelokupnog procesa što bi dalo preciznije potrebe za maksimalnom snagom. Također bi bila omogućena izrada numeričkog modela s ciljem kvalitetne mogućnosti regulacije cijelog procesa vuče.



Slika 32. Vitlo za vuču parajedrilice

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Axiom Zagreb, 1997.
- [2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [3] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [4] Ščap, D.: Transportni uređaji (prenosila i dizala), Zagreb, 2004.
- [5] Ščap, D.: Prenosila i dizala – Podloga za konstrukciju i proračun, Zagreb, 1990.
- [6] Opalić., M; Kljajin, M.; Sebastijanović, S.: Tehničko crtanje, Zagreb, 2002.
- [7] Petrin, D.: Padobransko jedrenje, Zagreb, 1998.
- [8] Hang Gliding Federation of Australia: Towing Procedures Manual, 1999.
- [9] New Zealand Hang Gliding and Paragliding Association: Paragliding Tow Manual, 2006.
- [10] Gibson, J.: The Mechanics of the Winch Launch, British Gliding Association
- [11] Opalić, M.; Rakamarić, P.: Reduktor – Proračun i konstrukcija jednostupanjskog zupčanog prijenosnika, FSB Zagreb, 1991.
- [12] Horvat Z.: Vratilo (Proračun), FSB Zagreb
- [13] FAG – Katalog valjnih ležajeva: <http://medias.schaeffler.de/medias/>
- [14] Mayr – Katalog elektromagnetskih spojki:
<http://www.mayr.com/en/products/electromagnetic-clutches-brakes/robatic/>
- [15] Apex Dynamics – Katalog planetarnih prijenosnika:
<http://www.apexdyna.com/download/catalog/AEAER-Eng.pdf>
- [16] Michaud Chailly – Katalog remena i remenica: <http://www.michaud-chailly.fr/>
- [17] Letrika – Katalog električnih motora i dodataka: <http://www.letrika.com/>
- [18] SIT-LOCK – Katalog steznih ljuski: <http://www.sitspa.com/>
- [19] Strojopromet – Katalog metalnih poluproizvoda: <http://www.strojopromet.com/>
- [20] Cousin Trestec – Katalog užadi: <http://www.cousin-trestec.com/>

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija