

ANALIZA SIŁ I PRĘDKOŚCI PODCZAS STARTU SZYBOWCA ZA WYCIĄGARKĄ

WITOLD KURSKI

LISIE KĄTY – SIERPIEŃ 2002

Opracowanie dla instruktorów szybowcowych.
Na prawach rękopisu.

1 Wstęp

Holowane obiekty, zarówno te które poruszają się po wodzie jak łodzie, pontony, barki, narciarze wodni, czy też po lądzie jak przyczepy, sanki lub inne holowane pojazdy, czy też poruszające się w powietrzu szybowce holowane przez samoloty lub startujące za wyciągarką, wszystkie one podlegają opisowi w kategoriach pojęć mechaniki technicznej. Dzięki wykorzystaniu praw Newtona w najprostszej postaci lub po modyfikacjach (zasada zachowania energii, równania Lagrange'a, równania Boltzmana–Hamela) możemy napisać układy równań ruchu aby po ich rozwiązaniu wyznaczyć trajektorie obiektów oraz siły występujące w czasie ruchu. Rozwiązywanie tych zagadnień wymaga wiedzy inżynierskiej i nie należy do zadań personelu lotniczego. Natomiast rozumienie zjawisk występujących w lotach holowanych jest obowiązkiem personelu lotniczego, a zwłaszcza kadry instruktorskiej, bowiem muszą być rozumiane istniejące w lotach holowanych zagrożenia, a to celem uniknięcia przesłanek do wypadków.

Zarówno instruktorzy jak i piloci dosyć dobrze rozumieją zagadnienia teorii lotu swobodnie latających samolotów i szybowców. Jednakże w lotach holowanych występują nowe elementy jakimi są więzy kinematyczne, a więc relacje pomiędzy prędkościami obiektu holowanego i holującego wymuszone poprzez linę. Wymuszanie przez więzy prędkości obiektu holowanego jest związane z dodatkowymi siłami powstającymi w linie i obciążającymi szybowiec. Powstają dodatkowe obciążenia dynamiczne, które są największe w fazie przechodzenia szybowca na wznoszenie.

W tym opracowaniu zostaną określone, na podstawie analizy prędkości obiektu holowanego i warunków równowagi, siły w fazie wznoszenia zarówno w przypadku braku wiatru jak również, gdy wieje wiatr. Natomiast siły w linie, działające podczas przechodzenia szybowca na wznoszenie, zostaną wyznaczone na podstawie zasady energii. Wszystkie analizy zostaną przeprowadzone w sposób uproszczony, a potrzebne do zrozumienia wiadomości w zakresie trygonometrii i fizyki mieszczą się w programie szkoły średniej.

Poniżej podano oznaczenia użyte w opisie problemów mechaniki lotu w tym opracowaniu:

PRĘDKOŚCI

V_{sz} - prędkość po torze holowanego szybowca względem ziemi

V_{naw} - prędkość nawijania liny wyciągarkowej.

V_{ap} - prędkość przepływu strug powietrza względem szybowca.

V_{Th} - prędkość wiatru na wysokości szybowca.

V_{apzr} - prędkość w locie poziomym szybowca dla wskazanej wartości C_z

KĄTY

β - kąt nachylenia liny do poziomu.

τ - kąt wznoszenia. Kąt między poziomem a torem lotu szybowca.

δ - kąt pomiędzy kierunkiem napływających strug powietrza a torem lotu szybowca. W warunkach bez wiatru jest on równy zeru.

ϵ - kąt pomiędzy poziomem a napływającymi strugami powietrza

$$\epsilon = \tau - \delta$$

β_1 - kąt pomiędzy liną a torem lotu obiektu holowanego.

$$\beta_1 = \beta + \tau$$

β_2 - kąt pomiędzy liną a kierunkiem napływu strug powietrza na szybowiec.

$$\beta_2 = \beta + \epsilon = \beta_1 + \tau - \delta$$

SIŁY

N - siła w linie.

P - wypadkowa siła aerodynamiczna.

P_x - siła oporu. Jest to rzut wypadkowej siły aerodynamicznej na kierunek przepływających strug powietrza.

P_z - siła nośna. Jest to rzut wypadkowej siły aerodynamicznej na kierunek prostopadły do kierunku przepływających strug powietrza.

T - składowa pozioma siły w linie.

G - siła ciężkości.

MOCE

L - moc potrzebna do lotu szybowca

L_H - moc przekazywana przez wyciągarkę na linę holującą i oddawana na obiekt holowany.

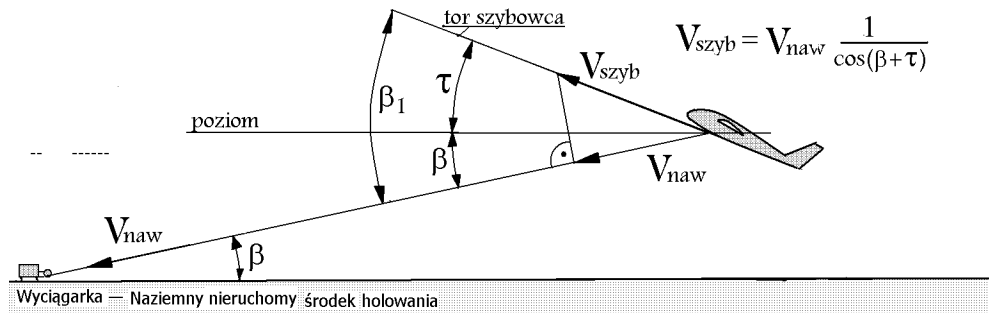
L_V - moc dostarczona przez wiatr.

INNE

d - doskonałość aerodynamiczna. Wartość siły nośnej podzielona przez siłę oporu.

C_z - współczynnik siły nośnej.

C_x - współczynnik siły oporu.



Rysunek 1: Prędkości w locie wznoszącym szybowca w warunkach bez wiatru.

2 Prędkości podczas startu

2.1 Prędkości w warunkach bezwietrznych

Na rysunku 1 przedstawiono prędkości dla wznoszącego się szybowca w warunkach bez wiatru.

Koniec liny zaczepiony do szybowca przemieszcza się razem z nim i ma prędkość szybowca V_{sz} . Lina jest nawijana na bęben wyciągarki i wszystkie punkty liny a więc również jej koniec przyczepiony do szybowca przemieszczają się w kierunku wyciągarki z prędkością V_{naw} . Dla ciała sztywnego a tak traktujemy odcinek liny pomiędzy wyciągarką a szybowcem, obowiązuje warunek dla dwóch dowolnie wybranych punktów, że rzuty prędkości tych punktów na prostą łączącą te punkty są takie same. Tak więc rzut prędkości szybowca V_{sz} na kierunek liny musi być równy prędkości nawijania. To są właśnie więzy kinematyczne, co zapiszemy:

$$V_{sz} \cdot \cos(\beta + \tau) = V_{naw}$$

lub

$$V_{sz} = \frac{V_{naw}}{\cos(\beta + \tau)} = \frac{V_{naw}}{\cos \beta_1}$$

W warunkach bez wiatru prędkość szybowca V_{sz} jest równa prędkości napływu strug powietrza V_{ap} i tę prędkość wskazuje prędkościomierz w szybowcu.

Przykład 1:

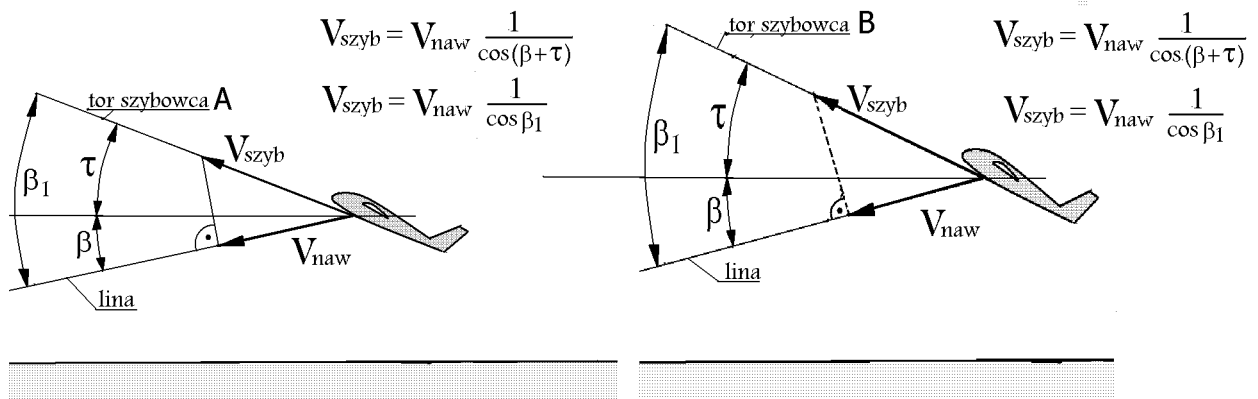
Dane: Prędkość szybowca $V_{sz} = 108 \text{ km/godz}$, kąt liny do poziomu $\beta = 30^\circ$, kąt wznoszenia $\tau = 30^\circ$ tak więc kąt $\beta_1 = 60^\circ$.

Wynik: Prędkość nawijania $V_{naw} = 108 \cdot \cos 60^\circ = 54 \text{ km/godz}$.

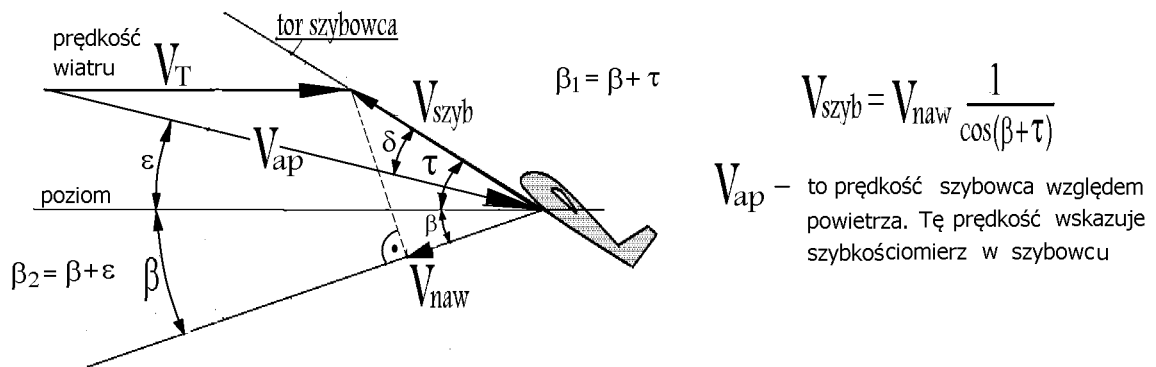
Przykład 2:

Na rysunku 2 przedstawiono sytuację kinematyczną dla dwóch szybowców. W obydwu przypadkach wyciągarka nawija linę z prędkością 54 km/godz . Szybowiec A wymusił kąt $\beta_1 = 60^\circ$ a szybowiec B wymusił kąt $\beta_1 = 65^\circ$. Wymuszenie tak dużego kąta β_1 nie zawsze może być możliwe ze względu na ograniczenia:

1. Ze strony wyciągarki – ograniczona moc wyciągarki lub ograniczony moment obrotowy silnika.



Rysunek 2: Wpływ toru lotu szybowca na jego prędkości.



Rysunek 3: Prędkości w locie wznoszącym szybowca w warunkach gdy wieje wiatr

2. Ze strony liny – ograniczona wytrzymałość liny.
3. Ze strony szybowca – grozi przekroczenie dopuszczalnej prędkości lotu lub krytycznych kątów natarcia.

Korzystamy ze wzoru $V_{sz} = V_{naw} / \cos \beta_1$

Wynik:

Szybowiec A rozwinie prędkość $V_{sz} = 54 / 0.5 = 108 \text{ km/godz.}$

Szybowiec B rozwinie prędkość $V_{sz} = 54 / \cos 65^\circ = 128 \text{ km/godz.}$, a więc większą od dopuszczalnej (110 km/godz dla szybowca Bocian i 120 km/godz dla szybowca PW-5). Należy zmniejszyć kąt wznoszenia lub zmniejszyć szybkość nawijania liny.

2.2 Prędkości w przypadku wiejącego wiatru

Na rysunku 3 przedstawiono prędkości dla wznoszącego się szybowca w warunkach gdy wieje wiatr a szybowiec startuje pod wiatr.

Dla prędkości szybowca V_{sz} oraz prędkości nawijania przez wyciągarke V_{naw} obowiązują te same zależności kinematyczne jak w przypadku braku wiatru. Rzut prędkości szybowca V_{sz} na kierunek liny musi być równy prędkości nawijania, co zapiszemy:

$$V_{sz} \cdot \cos(\beta + \tau) = V_{naw}$$

lub

$$V_{sz} = \frac{V_{naw}}{\cos(\beta + \tau)} = \frac{V_{naw}}{\cos \beta_1}$$

Oczywiście w warunkach wiejącego wiatru prędkość napływających strug powietrza V_{ap} , którą wskazuje prędkościomierz w szybowcu, nie jest równa prędkości szybowca V_{sz} względem ziemi. Ta sytuacja jest przedstawiona na rysunku 3.

W przypadku trójkąta płaskiego, jeśli znamy jego trzy elementy, to związki geometryczne pozwalają wyznaczyć pozostałe elementy.

Przyjmijmy jako dane:

1. Prędkość wiatru na wysokości lotu V_{Th}
2. Prędkość napływających strug powietrza V_{ap} (wskazuje prędkościomierz).
3. Kąt wznoszenia τ .

Wielkości wynikowe określamy ze wzorów trygonometrii:

1. Kąt odchylenia prędkości strug od toru szybowca δ :

$$\sin \delta = \frac{V_{Th}}{V_{ap}} \cdot \sin \tau$$

2. Kąt między poziomem a napływającymi strugami powietrza ϵ :

$$\epsilon = \tau - \delta$$

3. Prędkość szybowca względem ziemi:

$$V_{sz} = V_{ap} \cdot \frac{\sin \epsilon}{\sin \tau}$$

Wykorzystując następnie podany wcześniej warunek kinematyczny znajdujemy prędkość nawijania liny na bęben wyciągarki V_{naw} .

$$V_{naw} = V_{sz} \cdot \cos(\beta + \tau) = V_{ap} \cdot \frac{\sin \epsilon}{\sin \tau} \cdot \cos(\beta + \tau)$$

Przykład:

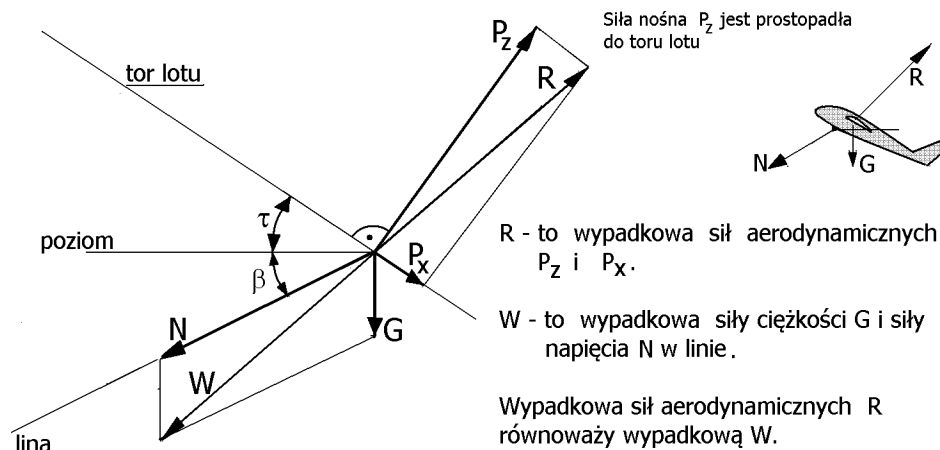
Dane: Prędkość napływających strug powietrza $V_{ap} = 108 \text{ km/godz}$, kąt liny do poziomu $\beta = 30^\circ$, kąt wznoszenia $\tau = 30^\circ$ tak więc kąt $\beta_1 = 60^\circ$.

W przypadku braku wiatru wynik już znamy:

Prędkość nawijania $V_{naw} = 108 \cdot \cos 60^\circ = 54 \text{ km/godz}$.

W przypadku wiatru o prędkości 36 km/godz:

Prędkość nawijania jest tylko $V_{naw} = 37.7 \text{ km/godz}$ a kąt odchylenia strug powietrza od kierunku ruchu szybowca wynosi $\delta = 9.6^\circ$.



Rysunek 4: Siły działające w locie wznoszącym szybowca w warunkach bez wiatru

3 Warunki równowagi sił

3.1 Warunki równowagi sił w przypadku braku wiatru

Poniżej przeprowadzono analizę sił i mocy podczas lotu za wyciągarką dla szybowca wznoszącego się w warunkach braku wiatru patrz rysunek 4. Miarą wznoszenia jest kąt τ nachylenia toru lotu do poziomemu. Warunki równowagi sił napisano przy założeniu, że szybowiec porusza się po prostej i bez przyśpieszeń. Jest to dosyć dobre przybliżenie przy ustalonym wznoszeniu, bowiem promień łuku po którym wznosi się szybowiec jest bardzo duży.

W wyniku analizy warunków równowagi otrzymujemy dla siły w linie :

$$N = G \cdot \frac{\cos \tau + d \cdot \sin \tau}{d \cdot \cos(\beta + \tau) - \sin(\beta + \tau)}$$

i moc L_H przekazywaną przez linę na szybowiec

$$L_H = N \cdot \cos(\beta + \tau) \cdot V_{sz} = G \cdot \frac{\cos \tau + d \cdot \sin \tau}{d \cdot \cos(\beta + \tau) - \sin(\beta + \tau)} \cdot \cos(\beta + \tau) \cdot V_{sz}$$

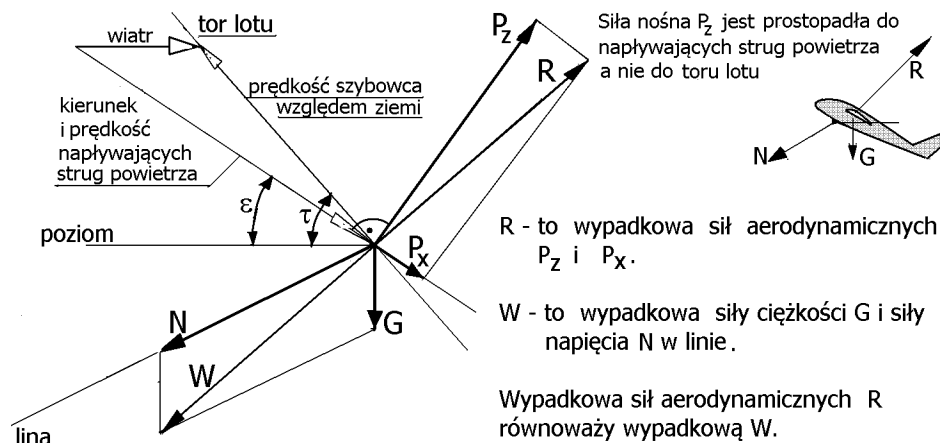
Wytwarzanie siły N w linie i nawijanie dolnego końca liny jest zadaniem wyciągarki. Moc przekazywana przez wyciągarkę na linę holującą szybowiec L_H jest równa:

$$L_H = N \cdot V_{naw} = G \cdot \frac{\cos \tau + d \cdot \sin \tau}{d \cdot \cos(\beta + \tau) - \sin(\beta + \tau)} \cdot V_{naw}$$

Oczywiście zgodnie z zasadami mechaniki moc dostarczona przez wyciągarkę na linę jest równa mocy przekazanej przez linę na szybowiec, lina bowiem nie wytwarza mocy. Można łatwo sprawdzić, że obydwa wzory na moc L_H otrzymane w odmienny sposób dają ten sam wynik, po wykorzystaniu w jednym ze wzorów warunku, że rzut prędkości szybowca na kierunek liny jest równy prędkości nawijania to jest znanej już nam relacji kinematycznej:

$$V_{sz} \cdot \cos(\tau + \beta) = V_{naw}$$

zwanej również równaniem więzów.



Rysunek 5: Siły działające w locie wznoszącym szybowca w warunkach wiejącego wiatru

3.2 Warunki równowagi sił podczas wiejącego wiatru

Poniżej przeprowadzono analizę sił i mocy podczas lotu za wyciągarką dla szybowca wznoszącego się w warunkach wiejącego wiatru patrz rysunek 5. Miarą wznoszenia jest kąt τ nachylenia toru lotu do poziomu, ale nie jest to kierunek napływających strug powietrza, bowiem zmienia się on wskutek wiejącego wiatru. Strugi powietrza napływają z prędkością V_{ap} i są odchyłone od toru lotu o kąt δ . Prędkość V_{ap} i kąt delta δ wynikają z aktualnej prędkości szybowca względem ziemi V_s , prędkości wiatru V_{Th} i kąta wznoszenia τ . Zachodzi tutaj pełna analogia do wiatru pozornego działającego na żaglówkę, którego prędkość i kierunek wynikają z ruchu żaglówki i wiejącego wiatru.

Porównując rysunek 4 i rysunek 5 łatwo stwierdzić, że w warunkach równowagi w miejsce kąta τ należy teraz podstawić kąt $\epsilon = \tau - \delta$. W ten prosty sposób otrzymujemy siły w linie w warunkach wiejącego wiatru, które są takie jak gdyby szybowiec wznosił się w warunkach bez wiatru ale pod mniejszym kątem wznoszenia.

$$N = G \cdot \frac{\cos(\tau - \delta) + d \cdot \sin(\tau - \delta)}{d \cdot \cos(\beta + \tau - \delta) - \sin(\beta + \tau - \delta)}$$

Wyrażenie ogólne na moc L_H przekazywaną przez linę na szybowiec nie ulega zmianie

$$L_H = N \cdot \cos(\beta + \tau) \cdot V_{sz}$$

Wytwarzanie siły N w linie i nawijanie dolnego końca liny jest zadaniem wyciągarki. Wprawdzie wzór na moc L_H nie zmienił się, ale przecież maleją siły N w linie przy jednakowym kącie wznoszenia. Jest to korzystny efekt działania wiatru.

Moc przekazywana przez wyciągarkę na linę holującą szybowiec L_H jest równa:

$$L_H = N \cdot V_{naw} = G \cdot \frac{\cos(\tau - \delta) + d \cdot \sin(\tau - \delta)}{d \cdot \cos(\beta + \tau - \delta) - \sin(\beta + \tau - \delta)} \cdot V_{naw}$$

Oczywiście w warunkach wiatru moc ta jest mniejsza niż w warunkach bezwietrznych, bowiem nie tylko siła N w linie jest mniejsza, ale również mniejsza jest potrzebna szybkość nawijania V_{naw} .

Moc L_H jest zużyta na pracę pokonania siły ciężkości szybowca oraz na pokonanie oporów aerodynamicznych, które dzięki działaniu wiatru zmniejszają się. Moc pobierana przez siły ciężkości oraz opory aerodynamiczne, którą oznaczamy przez L wyraża się wzorem:

$$L = G \cdot V_{sz} \cdot \sin \tau + P_x \cdot V_{sz} \cdot \cos \delta - P_z \cdot V_{sz} \sin \delta$$

Odchylenie kierunku napływającego powietrza od kierunku lotu o kąt δ powoduje że tak samo odchyła się siła nośna, której rzut na kierunek ruchu szybowca $P_z \cdot \sin \delta$ ciągnie szybowiec do góry i wykonuje znaczącą co do wartości pracę i dlatego moc L_H potrzebna do lotu maleje. Zużycie paliwa do wzniesienia szybowca maleje, a pojawiający się nadmiar mocy może być wykorzystany do wzniesienia szybowca wyżej. Wykorzystywanie wiatru do wznoszenia latawców znane było Chińczykom już tysiące lat temu, a szybowiec wznoszący się za wyciągarką w warunkach wiatru to latawiec ale o doskonałości aerodynamicznej wielokrotnie większej niż najlepsze chińskie latawce.

Moc L_V jest oddawana przez wiatr gdyż składowa pozioma siły N oznaczona przez T i równa $T = N \cdot \cos \beta$ przemieszcza się względem powietrza z prędkością V_{Th} . Stąd moc L_V :

$$L_V = T \cdot V_{Th} = N \cdot \cos \beta \cdot V_{Th}$$

Poniżej w tablicach przedstawiono wyniki obliczeń dla wznoszącego się szybowca w warunkach bezwietrznych i w warunkach wiatru o prędkości 36 km/godz przy parametrach lotu:

Masa szybowca wraz z załogą – 500 kg.

Doskonałość aerodynamiczna – 20

Prędkość napływających strug powietrza – 108 km/godz.

Kąt liny do poziomu β – 30 stopni

Kąt wznoszenia τ – 30 stopni i 35 stopni

Tablica 1

	wiatr 0.0 km/godz	
	$\tau = 30$ stopni	$\tau = 35$ stopni
Siła w linie N kG	594.8	814.4
Prędkość nawijania km/godz	54.0	45.6
Moc wyciągarki L_H KM	119.0	137.7
Moc dostarczona przez wiatr L_V KM	0.0	0.0
Kąt δ stopni	0.0	0.0

Dokonane kolejne obliczenia dla wznoszącego się szybowca w warunkach wiatru o prędkości 10 m/s ale przy różnych kątach wznoszenia τ są przedstawione w tablicy 2 poniżej przy parametrach lotu:

Masa szybowca wraz z załogą – 500 kg.

Doskonałość aerodynamiczna – 20

Prędkość napływających strug powietrza – 108 km/godz.

Kąt liny do poziomu β – 30 stopni

Kąt wznoszenia τ – 40 stopni i 45 stopni

Tablica 2

	wiatr 36.0 km/godz	
	$\tau = 40$ stopni	$\tau = 45$ stopni
Siła w linie N kG	515	647
Prędkość nawijania km/godz	26.6	20.5
Moc wyciągarki L_H KM	50.8	49.3
Moc dostarczona przez wiatr L_V KM	59.4	74.7
Kąt δ stopni	12.4	13.0

Na podstawie wyników obliczeń podanych w tablicach stwierdzamy, że szybowiec startujący za wyciągarką w warunkach wiatru może wznosić się bardziej stromo pod kątem τ o ponad 10 stopni większym, niż gdy nie wieje wiatr, przy mniejszych siłach w linie i mocy wyciągarki o połowę mniejszej. Wiatr wykonuje znaczącą pracę.

4 Zjawiska fizyczne w fazie przejścia na wznoszenie

4.1 Wpływ zjawiska gradientu prędkości wiatru

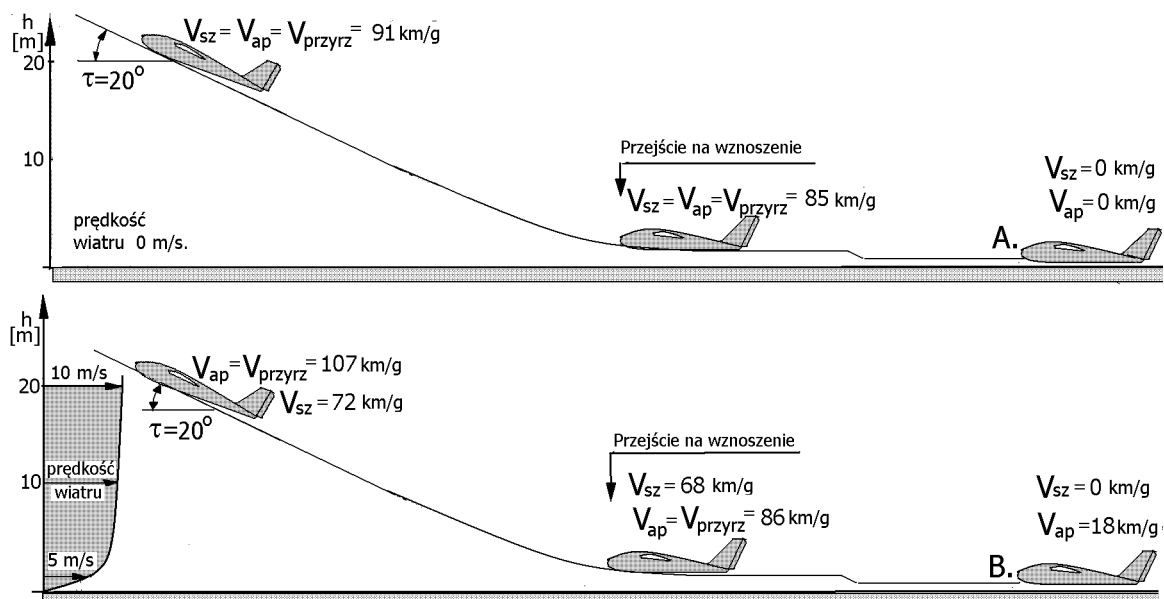
Rozpatrzmy prędkości podczas startu dla szybowca A, który startuje w warunkach bezwietrznych i dla szybowca B, który startuje pod wiatr o prędkości 5 m/sek przy ziemi. Szybkość nawijania w chwili przejścia na wznoszenie gdy startuje szybowiec A wynosi 85 km/godz a przy starcie szybowca B wystarcza 68 km/godz. Jeśli szybkości nawijania pozostaną niezmienione, to po wzniesieniu się szybowców na wysokość 20 metrów przy jednakowych kątach wznoszenia, prędkości względem powietrza będą się dla nich znacznie różniły. W obydwu przypadkach są one większe od prędkości nawijania, ale dla szybowca B trzeba uwzględnić jeszcze zjawisko gradientu prędkości wiatru. Przyjmijmy, że na wysokości 20 metrów wiatr wieje z prędkością 10 m/sek. Wyniki obliczeń dla podanych parametrów lotu przedstawiono podano na rysunku 6.

Komentarz:

Obydwa szybowce w chwili przechodzenia na wznoszenie mają praktycznie tę samą prędkość względem powietrza (odpowiednio 85 km/godz i 86 km/godz). Po wzniesieniu się na wysokość 20 m przy jednakowych kątach wznoszenia $\tau = 20^\circ$ dla szybowca A $V_{sz} = V_{ap} = 91$ km/godz, zaś dla szybowca B $V_{sz} = 72$ km/godz lecz prędkość względem powietrza wskazywana przez prędkościomierz wzrosła do $V_{ap} = 107$ km/godz.

4.2 Zjawiska dynamiczne w fazie przejścia na wznoszenie

Podczas przechodzenia na wznoszenie prędkość szybowca wzrasta. Wzrasta jego energia kinetyczna, a w linie powstają dodatkowe obciążenia dynamiczne. Przyjmijmy, że prędkość nawijania liny na bęben wyciągarki $V_{naw} = 72$ km/godz i pozostaje stała podczas fazy przechodzenia na wznoszenie, która kończy się, gdy tor lotu nachylił się pod kątem



Rysunek 6: Wpływ gradientu prędkości wiatru na parametry lotu

$\tau = 45^\circ$ do poziomiu. Tę sytuację przedstawiono na rysunku 7.

Energia kinetyczna szybowca po przejściu na wznoszenie:

$$Ek_2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{naw}^2 / \cos^2 \tau$$

Energia kinetyczna szybowca przed przejściem na wznoszenie:

$$Ek_1 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{naw}^2$$

Zgodnie z zasadą energii przyrost energii kinetycznej ΔEk

$$\Delta Ek = Ek_2 - Ek_1 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{naw}^2 \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \tau} - 1 \right)$$

jest równy pracy L wykonanej przez siły zewnętrzne. Tą siłą jest dodatkowe obciążenie dynamiczne w linii ΔN , pracujące na przemieszczeniu Δs wynikającym z nawijania liny na bęben wyciągarki.

$$L = \Delta N \cdot \Delta s = \Delta N \cdot V_{naw} \cdot \Delta t$$

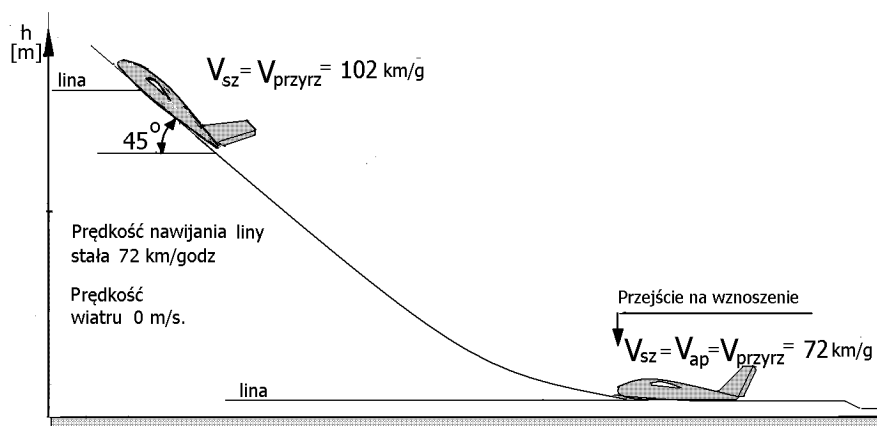
Porównując ΔEk do pracy L wyznaczamy dodatkowe obciążenie dynamiczne w linii:

$$\Delta N = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{naw} \cdot \frac{1}{\Delta t} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \tau} - 1 \right)$$

dla $\tau = 45^\circ$

$$\Delta N = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V_{naw} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Czym krótszy jest czas przejścia na wznoszenie, tym większe obciążenia ΔN działają w linii.



Rysunek 7: Prędkości w fazie przejścia na wznoszenie

Przykład:

Masa szybowca $M = 500 \text{ kg}$

Prędkość nawijania liny $V_{naw} = 72 \text{ km/godz} = 20 \text{ m/sek}$

Czas przejścia na wznoszenie $\Delta t = 4 \text{ sek}$

$$\Delta N = \frac{1}{2} \cdot 500 \cdot 20 \cdot \frac{1}{4} = 1250N$$

a więc około 125 kilogramów. Jest to wartość średnia w czasie przechodzenia na wznoszenie, a wartość szczytowa jest około 50 procent większa czyli wynosi około 188 kilogramów.

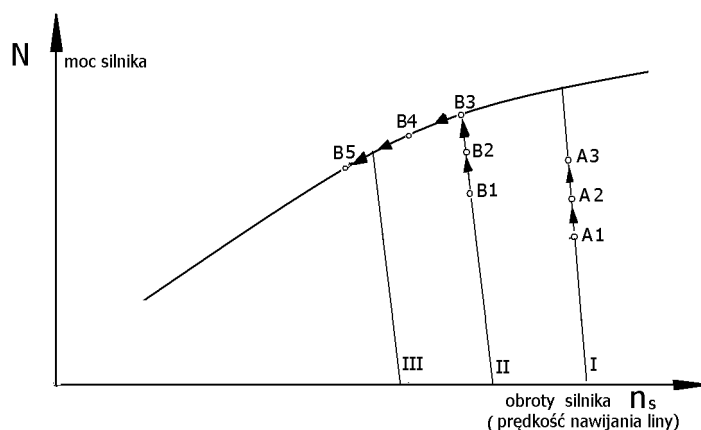
Przy czasie przejścia na wznoszenie $\Delta t = 2 \text{ sek}$ obciążenia dynamiczne będą dwukrotnie większe a więc dodatkowe obciążenie dynamiczne będzie bliskie 380 kilogramów.

To są bardzo duże obciążenia i przy starcie jeszcze bardziej wyrwanym lina z pewnością zerwie się.

5 Wpływ technicznych parametrów wyciągarki na obciążenie szybowca podczas startu

Siła dynamiczna ΔN w fazie przechodzenia na wznoszenie została wyliczona przy założeniu, że prędkość nawijania $V_{naw} = const$ to znaczy pozostaje stała. W rzeczywistości zwiększone o ΔN obciążenie liny i dodatkowe obciążenia związane z nowymi położeniami równowagi spowodują przyhamowanie liny i obroty bębna wyciągarki zaczną spadać aż do ustalenia się warunków równowagi.

W przypadku wyciągarki z silnikiem benzynowym obroty bębna pod zwiększonym obciążeniem szybko spadają, bo taka jest charakterystyka silnika benzynowego. Utrzymanie obrotów pod zwiększonym obciążeniem wymaga świadomego działania mechanika, który będąc przeszkolonym w holowaniu szybowców naogół działa prawidłowo i dodaje gazu.



Rysunek 8: Charakterystyka silnika Diesla i nastawy I,II,III.

5.1 Wpływ typu silnika na obciążenie szybowca podczas startu

Odmienna sytuacja ma miejsce gdy wyciągarka jest wyposażona w silnik wysokoprężny. Silniki wysokoprężne z racji ich charakterystyk muszą być wyposażone w regulatory prędkości obrotowej. Na wyciągarce znajduje się wielozakresowy regulator prędkości obrotowej, co oznacza, że pomiędzy mechanikiem a silnikiem jest jeszcze dodatkowy człon działający niezależnie. Ponieważ jest to automat to działa bardzo szybko. Taka charakterystyka silnika Diesla jest przedstawiona na rysunku 8. Przy pomocy tzw. pedału gazu mechanik ustawia naciąg sprężyny regulatora i wybiera charakterystykę np. I lub II lub III i pośrednie.

Przyjmijmy, że mechanik wybrał nastawę II a obciążenie jest przedstawione przez punkt B1 patrz rys.8. Jeżeli obciążenie silnika się zwiększy (np pilot wybierze bardziej stromy tor wznoszenia) to bez woli mechanika regulator przejdzie natychmiast na punkt pracy B2 przy minimalnym spadku obrotów. Przy dalszym zwiększaniu obciążenia osiągnięta zostanie granica dymienia, wtrzyśnięta dawka paliwa z braku tlenu nie ulega całkowitemu spaleni i obroty zaczną spadać (punkt B3 na charakterystyce i kolejne B4 i B5). Ani mechanik ani regulator nie mogą temu zapobiec. Należy zmniejszyć obciążenie.

Jeżeli nie przekroczono możliwości silnika a więc granicy dymienia to regulator wymusza punkty pracy na stromej części charakterystyki, przy minimalnym spadku obrotów. Tak więc założenie przyjęte w analizie obciążeń dynamicznych o stałej prędkości nawijania liny jest w pełni uzasadnione.

Właściwości techniczne wyciągarki mają wpływ na sposób pilotowania szybowca na wznoszeniu. Rozpatrzmy dwa przypadki:

START SZYBOWCA A – Szybowiec lekki z jednym pilotem np. Mucha-Standard lub PW-5.

Mechanik wybrał nastawę „I” regulatora i przy przejściu na wznoszenie regulator wybrał punkt pracy A1 patrz rysunek 8. Zwiększenie obciążenia na wznoszeniu oznacza wybranie przez regulator prędkości punktu pracy A2. Dalsze ściąganie drążka spowo-

duje wzrost szybkości szybowca i wybranie przez regulator punktu pracy A3. Ponieważ możliwości silnika wyciągarki są wykorzystane tylko częściowo to silnik nie zmniejszy obrotów lecz przejmie zwiększone obciążenie. W takiej sytuacji jeśli prędkość szybowca jest zbyt duża, to celem jej zmniejszenia pilot winien zmniejszyć kąt wznoszenia przez oddanie drążka.

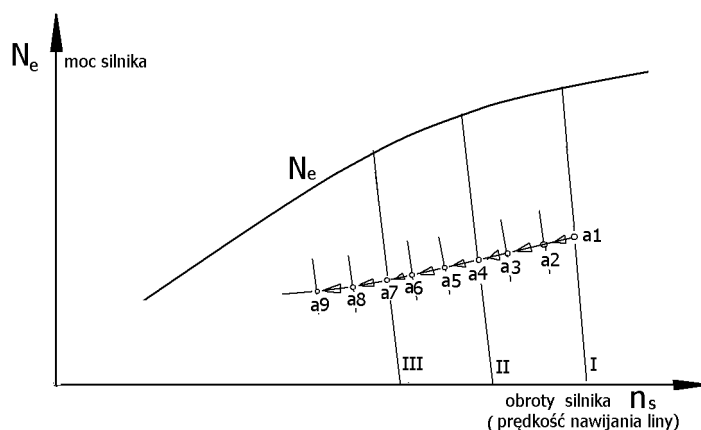
START SZYBOWCA B – szybowiec ciężki z dwoma pilotami np. Bocian, Puchacz, PW-6. Mechanik wybrał nastawę „II” regulatora i przy przejściu na wznoszenie regulator ustalił punkt pracy B1 patrz rysunek 8. Zwiększenie obciążenia na wznoszeniu oznacza wybranie przez regulator prędkości punktu pracy B2. Dalsze ściągnięcie drążka spowoduje wzrost obciążenia i osiągnięcie granicy dymienia punkt B3. Ponieważ możliwości silnika zostały wykorzystane, to obroty zaczną spadać i silnik osiągnie na swej charakterystyce punkt pracy B4. Jeśli obciążenie nie zmniejszy się to silnik osiągnie punkt pracy B5 i dalej obroty będą maleć, a szybkość szybowca niebezpiecznie zmaleje i szybowiec zwali się. Właściwa reakcja pilota to oddanie drążka i przejście na mniejszy kąt wznoszenia.

To są rozważania teoretyczne, ale taka sytuacja może się zdarzyć. Jak podaje J.Gedeon [3] przy prawidłowym holowaniu rezerwa mocy silnika wyciągarki wynosi od 60 procent do 80 procent, i sytuację taką uznaje się za prawidłową, wręcz wzorcową, bowiem przy małych prędkościach ciągnięcia, gdy w linii rozwija się duża siła ciągu, silnik jest obciążony bardzo dużym momentem obrotowym i dlatego rezerwa mocy jest potrzebna. J.Gedeon przeprowadzał pomiary obciążeń przy wykorzystaniu wyciągarki Herkules z silnikiem o mocy 120 KM. Przy użyciu wyciągarki o większej mocy rezerwy będą jeszcze większe.

Z analiz przeprowadzonych prędkości wynika, zwłaszcza jeśli wieje wiatr, że prędkości nawijania liny w fazie wznoszenia powinny być znacznie mniejsze niż na początku startu. Jeśli mechanik nie zmniejszy prędkości nawijania to szybowiec wznosi się stromo i bardzo szybko. Aby nie przekroczyć dopuszczalnych prędkości lotu pilot jest zmuszony do zmniejszenia kąta wznoszenia i oddania drążka. Wprawdzie szybkość lotu zmniejsza się, lecz wznoszenie staje się nieefektywne.

W tej sytuacji zasadniczą rolę powinien przejąć mechanik, który wykorzystując możliwości regulatora wielozakresowego zmienia płynnie nastawę i przechodzi z punktu pracy a1 do punktu pracy a9 przez punkty pośrednie a2, a3, a4, a5, a6 i.t.d. bez zwiększania obciążenia silnika (patrz rysunek 9), a pilot może zwiększyć kąt wznoszenia nie przekraczając prędkości dopuszczalnych.

J.Gedeon [3] zwraca uwagę na nagminne, rozpowszechnione wśród mechaników wyciągarkowych, zbyt szybkie holowanie w warunkach wiatru, co uniemożliwia efektywne wznoszenie szybowca. Szybowiec leci zbyt szybko a pilot aby zmniejszyć prędkość lotu musi zmniejszyć kąt wznoszenia. J.Gedeon zaleca dawanie sygnałów przez pilota do mechanika z żądaniem zmniejszenia szybkości holowania przez naprzemienne wychylenie steru kierunku. J.Gedeon pisał ten artykuł przed pięćdziesięciu laty, obecnie mamy łączność radiową.



Rysunek 9: Punkty pracy silnika przy prawidłowym holowaniu przypadku w przekraczaniu przez szybowiec prędkości dopuszczalnych.

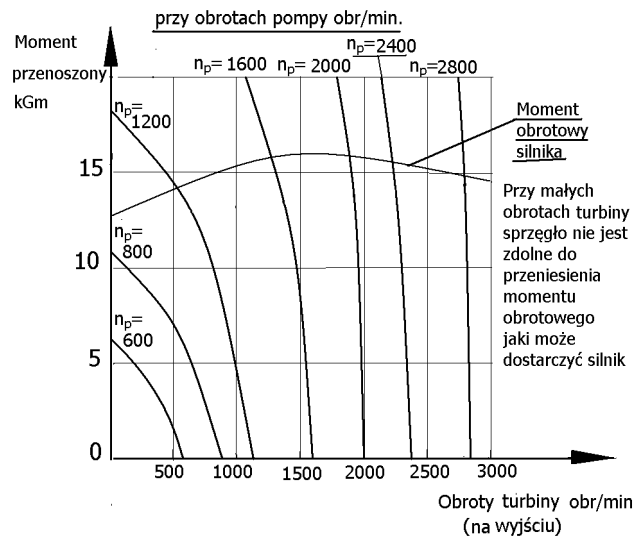
5.2 Wpływ rozwiązań przeniesienia napędu na efektywność wznoszenia szybowca

Większość wyciągarek szybowcowych jest wyposażona w sprzęgła cierne. Sprzęgło takie po załączeniu pracuje bez poślizgu. Jednakże spotyka się wyciągarki wyposażone w sprzęgło hydrokinetyczne. Możliwe jest również wyposażenie wyciągarki w przekładnię hydrokinetyczną.

Zastosowanie sprzęgła hydrokinetycznego posiadającego wiele zalet może jednakże w wyciągarce szybowcowej sprawiać poważne trudności eksploatacyjne przy bardzo małych szybkościach nawijania liny, które należy stosować przy starcie w warunkach silniejszego wiatru, gdyż sprzęgło pracuje z dużym poślizgiem a moment przenoszony przez sprzęgło może okazać się mniejszy niż moment silnika patrz krzywe $n_p = 600 \text{ obr/min}$ i $n_p = 800 \text{ obr/min}$ na uniwersalnej charakterystyce sprzęgła rys.10. Zwiększenie obrotów silnika pozwala na przeniesienie większego momentu i skutkuje zmniejszeniem poślizgu sprzęgła, ale szybkości nawijania liny wzrastają co w warunkach wiatru prowadzi wprost do przekroczenia szybkości dopuszczalnych przez szybowiec. Ta wada sprzęgła hydrokinetycznego w zastosowaniu do wyciągarki szybowcowej wynika z charakterystyki takiego sprzęgła, które specjalnie projektuje się tak aby przy małych obrotach silnika miało małą sprawność, co jest potrzebne ze względów ruchowych samochodu [4].

6 Uwagi końcowe

Na temat obciążeń szybowca w locie za wyciągarką jest obecnie mało dostępnych opracowań. W Polsce w okresie międzywojennym wykonano szereg prac w Instytucie Techniki Szybownictwa we Lwowie, ale są one poświęcone obciążeniom szybowca w zależności od miejsca umieszczenia zaczepu holowniczego np.[2]. W okresie powojennym na temat obciążeń przy starcie za wyciągarką pisał inż. Nowakowski z Bielska Białej. Problem



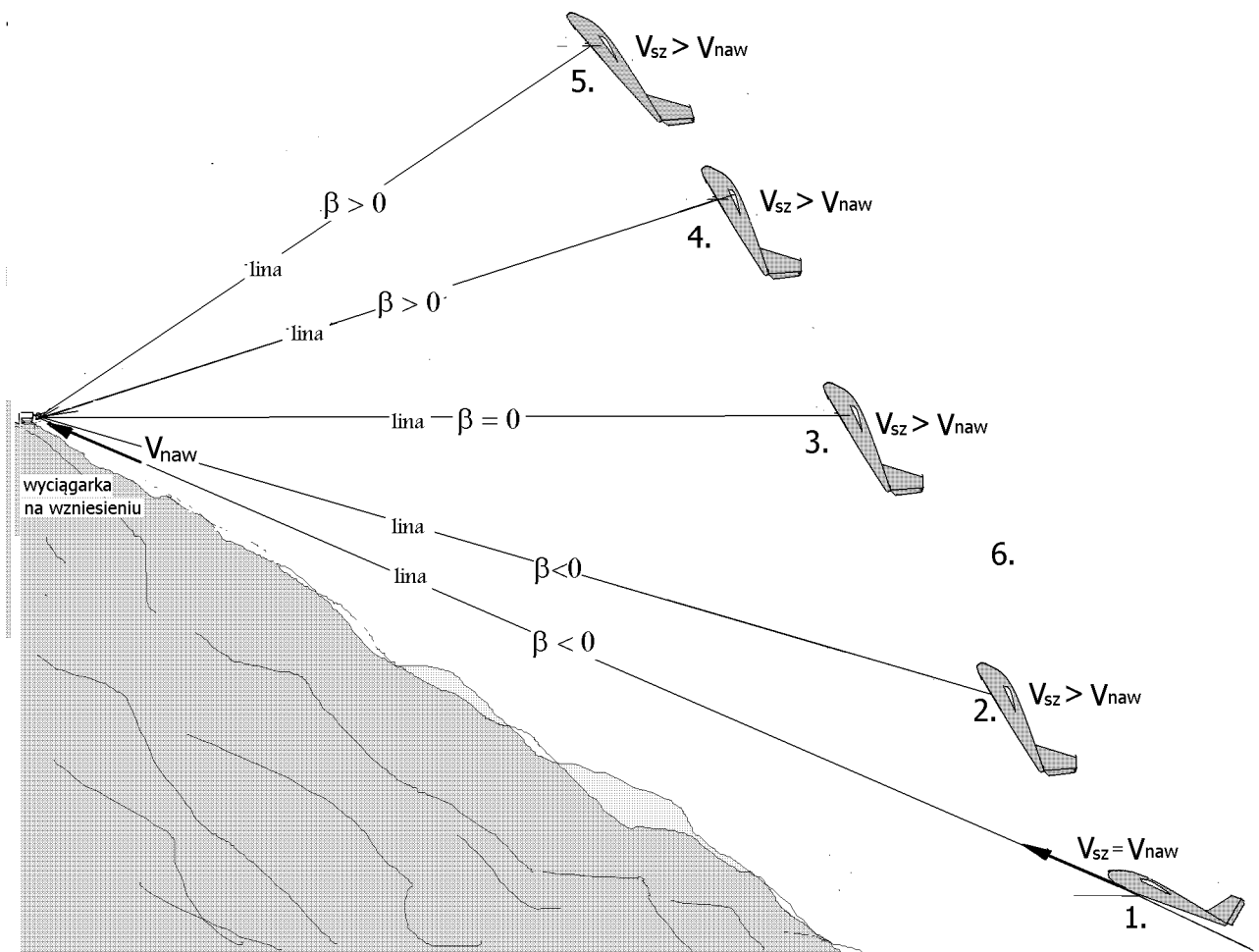
Rysunek 10: Charakterystyka uniwersalna sprzęgła hydrokinetycznego wg. [4]

obciążeń i sił w lotach holowanych za wyciągarką jest oczywiście poruszony w Przepisach dotyczących sprzętu lotniczego. Jednakże Przepisy nie zajmują się mechaniką lotu a jedynie podają wymagania, którym musi sprostać sprzęt lotniczy.

Bardzo przydatny w szkoleniu szybowcowym jest wspomniany już artykuł J.Gedeona [3], bowiem są tam nie tylko wskazania dla pilotów, lecz przede wszystkim dla mechaników na temat prawidłowych szybkości holowania.

Przedstawione w tym opracowaniu wzory dla prędkości i sił w czasie holowania szybowca za wyciągarką zostały wyprowadzone przez autora podczas przygotowywania opracowania [1] zamówionego przez Polski Związek Motorowodny i Narciarstwa Wodnego. Postawione tam zagadnienie było bardzo ogólne, bowiem środek holujący to jest motorówka porusza się a bęben wyciągarki jeśli jest w nią wyposażona, może linę nawijać lub odwijać. To jest takie samo zagadnienie jak holowanie paralotni za samochodem przy odwijającej się linie z bębna. Można dodać, że takie holowanie ma bardzo dużo zalet.

Przedstawione w opracowaniu rozważania wskazują, że oprócz znanych pilotom czynników występujących w locie trzeba w lotach holowanych rozumieć wpływ więzów to jest liny na prędkości i na działające siły. Znaczący jest wpływ technicznych parametrów wyciągarki na zachowanie się szybowca w locie, stąd kilka wniosków dla konstruktorów wyciągarek. Rozumienie tych czynników zmniejszy niewątpliwie liczbę przesłanek do wypadków.



Rysunek 11:
Sytuacje podczas wznoszenia za wyciągarką znajdującą się na wzniesieniu

7 Uzupelnienia do opracowania ważne dla konstruktorów wyciągarek szybowcowych-wrzesień 2009

Uwagi o holowaniu gdy wyciągarka znajduje się na wzniesieniu a szybowiec w dolinie. Wbrew opiniom nawet wielu pilotów, że jest to sytuacja korzystna i nieskomplikowana, holowanie takie stawia przed wyciągarką i mechanikiem bardzo wysokie wymagania bowiem (patrz rys.11) w trakcie takiego holowania jest zawsze sytuacja, że kąt wznoszenia τ dodany do ujemnego kąta β daje wartość równą zero (pozycja 1 szybowca na rys.11)!. A to oznacza, że prędkość nawijania liny jest równa prędkości lotu a więc bardzo duża. Trzeba ciągnąć bardzo szybko i z pełną mocą.

W początkowej fazie startu kąt τ między poziomem a osią podłużną wznoszącego się szybowca jest bardzo duży, o kilkanaście stopni więcej niż na terenie nizinnym, o czym pilot powinien być zawczasu uprzedzonym (patrz pozycja szybowca 2 i 3.

Uwagi o zastosowaniu przeniesienia napędu Sprzęgło hydrokinetyczne stwarza problemy gdy holowanie jest w warunkach silniejszego wiatru, bo przy małej szybkości ciągnięcia nie można przenieść wystarczającego momentu, a więc nie wytworzy się potrzebna siła w linie. Tak więc potrzebna jest skrzynka przekładniowa i instrukcja jak jej używać.

Uwagi o idealnym napędzie wyciągarek W czasie jednego ciągnięcia pożądana prędkość holowania może zmieniać się od maksymalnej bliskiej 100 km/godz do bardzo małej rzędu 20 km/godz. Nie znam konstrukcji automatycznych skrzynek biegów, czy dają się przełączać pod obciążeniem? Pozostaje więc przeanalizować możliwości napędu elektrycznego i celowości jego zastosowania.

Uwaga o wyposażeniu miejsca pracy mechanika Mechanik ciągnący szybowiec powinien otrzymywać niopóźnioną (natychmiastową) informację o prędkości przyrządowej holowanego szybowca. To nie może być korespondencja radiowa, ani jakiś wizualny wskaźnik, który wymagałby jakiegokolwiek dodatkowej obserwacji. Uwaga mechanika jest skupiona na wznoszonym szybowcu i nic nie powinno rozpraszać jego uwagi. Może dobry byłby sygnał akustyczny o zmiennej wysokości tonu i słuchawki.

Literatura

- [1] Kurski W.: Holowanie obiektów latających za motorówką, Polski Związek Motorowodny i Narciarstwa Wodnego, Warszawa 1997.
- [2] Nowotny.A.: O obciążeniach szybowca w locie, Lwowskie Czasopismo Lotnicze Rok II Nr.1 Lwów 25 marca 1934 r.
- [3] Gedeon.J.: Pomiar obciążeń podczas startu szybowca za wyciągarką. Technika Lotnicza Nr.2 z 1959 r.
- [4] Samochody od A do Z, praca zbiorowa pod redakcją Witolda Leśniaka, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1961.

S t r e s z c z e n i e

Omówiono zależności pomiędzy prędkościami liny, szybowca i wiejącego wiatru przy wznoszeniu szybowca za wyciągarką. Lina łącząca szybowiec z wyciągarką wprowadza więzy kinematyczne i ich opis matematyczny jest podstawą wyznaczania podanych prędkości. Następnie wykorzystując warunki równowagi wyznaczono siły w czasie wznoszenia w warunkach bezwietrznych jak i wiatru. Wyznaczone siły i prędkości stały się podstawą do wyznaczenia mocy wyciągarki potrzebnej do startu, która jest mniejsza gdy szybowiec startuje pod wiatr. W warunkach eksploatacyjnych moc dostarczona przez wiatr może przewyższać moc wyciągarki. Wielkie, co do siły i prędkości holowania wymagania stawia przypadek ustawienia wyciągarki na wzniesieniu.

Następnie na podstawie zasady energii wyznaczono dodatkowe obciążenia dynamiczne w linie w fazie przechodzenia na wznoszenie. Przy skracaniu czasu przejścia rośnie ono znacząco osiągając nawet 30 procent wytrzymałości liny. Artykuł zakończono omówieniem wpływu technicznych właściwości wyciągarki na technikę pilotowania szybowca na wznoszeniu. W uzupełnieniu podano wnioski do doboru właściwego dla wyciągarek silnika napędowego i przeniesienia napędu.

8 Wyniki obliczeń sił i mocy przy starcie za wyciągar- ką

8.1 Kąt Beta = -15 stopni (wyciągarka na wzniesieniu) wiatr 0 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= -15.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 476.7 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 86.6 km/godz
LH= 152.9 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 93.3 km/godz Cz= 0.643 n=Pz/G = 1.15 N/G= 0.88
Vwzn = 19.64 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.82

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= -15.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 545.3 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 81.9 km/godz
LH= 165.4 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 90.5 km/godz Cz= 0.684 n=Pz/G = 1.22 N/G= 1.01
Vwzn = 21.28 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.94

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= -15.0 stopni tau= 55.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 623.8 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 76.6 km/godz
LH= 177.0 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 87.2 km/godz Cz= 0.737 n=Pz/G = 1.32 N/G= 1.16
Vwzn = 22.75 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.07

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= -15.0 stopni tau= 60.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 716.3 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 70.7 km/godz
LH= 187.6 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 83.4 km/godz Cz= 0.805 n=Pz/G = 1.44 N/G= 1.33
Vwzn = 24.06 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.22

8.2 Kąt Beta = 0 stopni (Wyciągarka na wzniesieniu), Wiatr 0 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= 0.0 stopni tau= 40.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 501.1 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 76.6 km/godz
LH= 142.2 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 85.7 km/godz Cz= 0.763 n=Pz/G = 1.36 N/G= 0.93
Vwzn = 17.86 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.84

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= 0.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 596.8 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 70.7 km/godz
LH= 156.3 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 82.0 km/godz Cz= 0.833 n=Pz/G = 1.49 N/G= 1.11
Vwzn = 19.64 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= 0.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 713.0 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 64.3 km/godz
LH= 169.8 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 77.7 km/godz Cz= 0.926 n=Pz/G = 1.65 N/G= 1.32
Vwzn = 21.28 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.19

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 100.0 km/godz beta= 0.0 stopni tau= 55.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 859.6 kG Vsz= 100.0 km/godz Vnaw= 57.4 km/godz
LH= 182.6 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 73.0 km/godz Cz= 1.051 n=Pz/G = 1.88 N/G= 1.59
Vwzn = 22.75 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.43

8.3 Kąt Beta 20 stopni, Wiatr 0.0 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 20.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 286.2 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 84.3 km/godz
LH= 89.3 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 97.2 km/godz Cz= 0.59 n=Pz/G = 1.28 N/G= 0.53
Vwzn = 10.5 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.45

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 25.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 376.2 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 77.8 km/godz
LH= 108.4 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 93.0 km/godz Cz= 0.65 n=Pz/G = 1.40 N/G= 0.70
Vwzn = 12.9 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.60

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 30.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 485.3 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 70.7 km/godz
LH= 127.1 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 88.2 km/godz Cz= 0.72 n=Pz/G = 1.55 N/G= 0.90
Vwzn = 15.3 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.78

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 35.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 623.1 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 63.1 km/godz
LH= 145.6 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 82.8 km/godz Cz= 0.82 n=Pz/G = 1.76 N/G= 1.15
Vwzn = 17.5 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 40.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 805.3 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 55.0 km/godz
LH= 164.0 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni

Vapzr= 76.7 km/godz Cz= 0.95 n=Pz/G = 2.06 N/G= 1.49
Vwzn = 19.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.29

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 1062.6 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 46.5 km/godz
LH= 183.0 KM LV = 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 69.7 km/godz Cz= 1.15 n=Pz/G = 2.49 N/G= 1.97
Vwzn = 21.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.67

8.4 Kąt Beta = 20 stopni, Wiatr 4 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 25.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 317.3 kG Vsz= 96.8 km/godz Vnaw= 68.4 km/godz
LH= 80.4 KM LV = 15.9 KM delta= 3.2 stopni
Vapzr= 95.7 km/godz Cz= 0.61 n=Pz/G = 1.32 N/G= 0.59
Vwzn = 11.4 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.60

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 30.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 401.3 kG Vsz= 97.3 km/godz Vnaw= 62.5 km/godz
LH= 93.0 KM LV = 20.1 KM delta= 3.8 stopni
Vapzr= 91.9 km/godz Cz= 0.66 n=Pz/G = 1.43 N/G= 0.74
Vwzn = 13.5 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.78

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 35.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 502.5 kG Vsz= 97.9 km/godz Vnaw= 56.1 km/godz
LH= 104.5 KM LV = 25.2 KM delta= 4.3 stopni
Vapzr= 87.5 km/godz Cz= 0.73 n=Pz/G = 1.58 N/G= 0.93
Vwzn = 15.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 40.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 628.5 kG Vsz= 98.6 km/godz Vnaw= 49.3 km/godz
LH= 114.7 KM LV = 31.5 KM delta= 4.8 stopni
Vapzr= 82.6 km/godz Cz= 0.82 n=Pz/G = 1.77 N/G= 1.16
Vwzn = 17.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.29

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 792.2 kG Vsz= 99.3 km/godz Vnaw= 42.0 km/godz
LH= 123.2 KM LV = 39.7 KM delta= 5.3 stopni
Vapzr= 77.1 km/godz Cz= 0.94 n=Pz/G = 2.04 N/G= 1.47
Vwzn = 19.5 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.67

DLA DANYCH

VTh= 4.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N =1017.0 kG Vsz= 100.2 km/godz Vnaw= 34.3 km/godz
LH= 129.1 KM LV = 51.0 KM delta= 5.8 stopni
Vapzr= 70.8 km/godz Cz= 1.12 n=Pz/G = 2.41 N/G= 1.88
Vwzn = 21.3 m/sek Vwzn/Vnaw = 2.24

8.5 Kąt Beta 20 stopni, Wiatr 8 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 30.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 328.8 kG Vsz= 84.1 km/godz Vnaw= 54.1 km/godz
LH= 65.8 KM LV = 33.0 KM delta= 7.5 stopni
Vapzr= 95.2 km/godz Cz= 0.62 n=Pz/G = 1.34 N/G= 0.61
Vwzn = 11.7 m/sek Vwzn/Vnaw = 0.78

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 35.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 403.7 kG Vsz= 85.2 km/godz Vnaw= 48.8 km/godz
LH= 73.0 KM LV = 40.5 KM delta= 8.6 stopni
Vapzr= 91.8 km/godz Cz= 0.66 n=Pz/G = 1.44 N/G= 0.75
Vwzn = 13.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 40.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 493.0 kG Vsz= 86.4 km/godz Vnaw= 43.2 km/godz
LH= 78.8 KM LV = 49.4 KM delta= 9.7 stopni
Vapzr= 87.9 km/godz Cz= 0.72 n=Pz/G = 1.57 N/G= 0.91
Vwzn = 15.4 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.29

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 602.5 kG Vsz= 87.7 km/godz Vnaw= 37.1 km/godz
LH= 82.7 KM LV = 60.4 KM delta= 10.7 stopni
Vapzr= 83.6 km/godz Cz= 0.80 n=Pz/G = 1.73 N/G= 1.12
Vwzn = 17.2 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.67

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 741.9 kG Vsz= 89.3 km/godz Vnaw= 30.5 km/godz
LH= 83.9 KM LV = 74.4 KM delta= 11.6 stopni
Vapzr= 78.7 km/godz Cz= 0.90 n=Pz/G = 1.95 N/G= 1.37
Vwzn = 19.0 m/sek Vwzn/Vnaw = 2.24

DLA DANYCH

VTh= 8.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 55.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 927.6 kG Vsz= 90.9 km/godz Vnaw= 23.5 km/godz
LH= 80.8 KM LV = 93.0 KM delta= 12.4 stopni
Vapzr= 73.2 km/godz Cz= 1.05 n=Pz/G = 2.26 N/G= 1.72
Vwzn = 20.7 m/sek Vwzn/Vnaw = 3.16

8.6 Kąt Beta 20 stopni, Wiatr 12 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 35.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 320.0 kG Vsz= 71.8 km/godz Vnaw= 41.2 km/godz
LH= 48.8 KM LV = 48.1 KM delta= 13.0 stopni
Vapzr= 95.6 km/godz Cz= 0.61 n=Pz/G = 1.32 N/G= 0.59
Vwzn = 11.4 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 40.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 383.7 kG Vsz= 73.3 km/godz Vnaw= 36.7 km/godz
LH= 52.1 KM LV = 57.7 KM delta= 14.6 stopni
Vapzr= 92.7 km/godz Cz= 0.65 n=Pz/G = 1.41 N/G= 0.71
Vwzn = 13.1 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.29

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 458.7 kG Vsz= 75.1 km/godz Vnaw= 31.7 km/godz
LH= 53.9 KM LV = 69.0 KM delta= 16.1 stopni
Vapzr= 89.4 km/godz Cz= 0.70 n=Pz/G = 1.52 N/G= 0.85
Vwzn = 14.8 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.67

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 549.6 kG Vsz= 77.1 km/godz Vnaw= 26.4 km/godz
LH= 53.7 KM LV = 82.6 KM delta= 17.5 stopni
Vapzr= 85.6 km/godz Cz= 0.76 n=Pz/G = 1.65 N/G= 1.02
Vwzn = 16.4 m/sek Vwzn/Vnaw = 2.24

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 55.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 663.1 kG Vsz= 79.4 km/godz Vnaw= 20.5 km/godz
LH= 50.4 KM LV = 99.7 KM delta= 18.8 stopni
Vapzr= 81.4 km/godz Cz= 0.85 n=Pz/G = 1.83 N/G= 1.23
Vwzn = 18.1 m/sek Vwzn/Vnaw = 3.16

DLA DANYCH

VTh= 12.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 20.0 stopni tau= 60.0 stopni
G = 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 810.3 kG Vsz= 81.8 km/godz Vnaw= 14.2 km/godz
LH= 42.7 KM LV = 121.8 KM delta= 19.9 stopni
Vapzr= 76.5 km/godz Cz= 0.96 n=Pz/G = 2.07 N/G= 1.50
Vwzn = 19.7 m/sek Vwzn/Vnaw = 4.99

8.7 Kąt Beta = 30 stopni; Wiatr 0 m/sek, 5 m/sek, 10 m/sek, 14 m/sek

DLA DANYCH

VTh= 0.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 30.0 stopni
G= 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S= 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N= 642.4 kG Vsz= 110.0 km/godz Vnaw= 55.0 km/godz
LH= 130.9 KM LV= 0.0 KM delta= 0.0 stopni
Vapzr= 79.9 km/godz Cz= 0.88 n=Pz/G = 1.90 N/G= 1.19
Vwzn= 15.3 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 5.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 30.0 stopni
G= 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S= 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N= 483.3 kG Vsz= 94.0 km/godz Vnaw= 47.0 km/godz
LH= 84.2 KM LV= 27.9 KM delta= 4.7 stopni
Vapzr= 85.9 km/godz Cz= 0.76 n=Pz/G = 1.64 N/G= 0.90
Vwzn= 13.1 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.00

DLA DANYCH

VTh= 10.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 35.0 stopni
G= 540.0 kG doskonalosc d= 20.0 S= 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N= 451.3 kG Vsz= 78.6 km/godz Vnaw= 33.2 km/godz
LH= 55.5 KM LV= 52.1 KM delta= 10.8 stopni
Vapzr= 87.2 km/godz Cz= 0.74 n=Pz/G = 1.59 N/G= 0.84

Vwzn= 12.5 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.36

DLA DANYCH

VTh= 10.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 40.0 stopni
G= 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S= 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N= 564.0 kG Vsz= 80.0 km/godz Vnaw= 27.3 km/godz
LH= 57.1 KM LV= 65.1 KM delta= 12.1 stopni
Vapzr= 82.7 km/godz Cz= 0.82 n=Pz/G = 1.77 N/G= 1.04
Vwzn= 14.3 m/sek Vwzn/Vnaw = 1.88

DLA DANYCH

VTh= 10.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 45.0 stopni
G = 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 709.7 kG Vsz= 81.6 km/godz Vnaw= 21.1 km/godz
LH= 55.5 KM LV = 81.9 KM delta= 13.4 stopni
Vapzr= 77.6 km/godz Cz= 0.93 n=Pz/G = 2.01 N/G= 1.31
Vwzn = 16.0 m/sek Vwzn/Vnaw = 2.73

DLA DANYCH

VTh= 10.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 907.7 kG Vsz= 83.3 km/godz Vnaw= 14.5 km/godz
LH= 48.7 KM LV = 104.8 KM delta= 14.5 stopni
Vapzr= 71.9 km/godz Cz= 1.08 n=Pz/G = 2.34 N/G= 1.68
Vwzn = 17.7 m/sek Vwzn/Vnaw = 4.41

DLA DANYCH

VTh= 14.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 50.0 stopni
G = 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 621.3 kG Vsz= 70.6 km/godz Vnaw= 12.3 km/godz
LH= 28.2 KM LV = 100.4 KM delta= 20.5 stopni
Vapzr= 80.6 km/godz Cz= 0.86 n=Pz/G = 1.86 N/G= 1.15
Vwzn = 15.0 m/sek Vwzn/Vnaw = 4.41

DLA DANYCH

VTh= 14.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 55.0 stopni
G = 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 771.5 kG Vsz= 73.1 km/godz Vnaw= 6.4 km/godz
LH= 18.2 KM LV = 124.7 KM delta= 22.0 stopni
Vapzr= 75.7 km/godz Cz= 0.98 n=Pz/G = 2.11 N/G= 1.43
Vwzn = 16.6 m/sek Vwzn/Vnaw = 9.40

DLA DANYCH

VTh= 14.0 m/sek Vap= 110.0 km/godz beta= 30.0 stopni tau= 60.0 stopni
G = 540.0 kG doskonałosc d= 20.0 S = 20.0 m.kw

WYNIKI OBLICZEN

N = 979.8 kG Vsz= 75.8 km/godz Vnaw= -0.0 km/godz
LH= -0.0 KM LV = 158.4 KM delta= 23.4 stopni
Vapzr= 70.0 km/godz Cz= 1.14 n=Pz/G = 2.47 N/G= 1.81
Vwzn = 18.2 m/sek