

**Algorytm obliczania parametrów pracy poprzecznych
łożysk ślizgowych pracujących w warunkach smarowania
hydrodynamicznego**



Przygotował:
dr inż. Wojciech Horak

AGH, WIMiR, KKiEM

Wersja: LS_v2-3

Kraków 2015

Program umożliwia obliczanie parametrów pracy poprzecznych łożysk ślizgowych według normy DIN 31 652

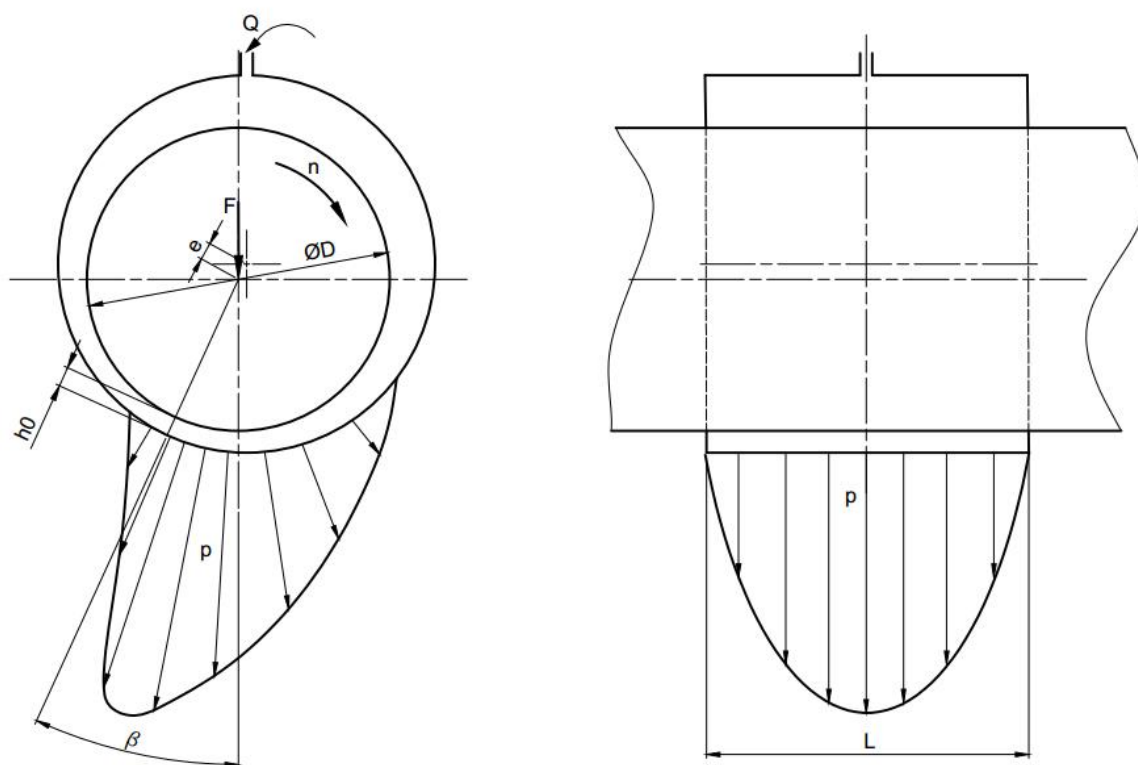
Zostały przygotowane dwie wersje programu:

1. Obliczanie poprzecznych łożysk ślizgowych smarowanych za pomocą pierścienia (plik: LS-pierśc_v2-3.xmcdz)
2. Obliczanie poprzecznych łożysk ślizgowych z wymuszonym obiegiem środka smarnego (plik: LS-wym_v2-3.xmcdz)

Do w/w plików przygotowano opis (plik: Opis-LS_v2-3.pdf)

1. Wykaz symboli i zmiennych

NAZWA ZMIENNEJ	SYMBOL	JEDNOSTKA
Średnica wału	D	mm
Długość panwi	L	mm
Obciążenie łożyska	F	N
Prędkość oborowa wału	n	obr/min
Parametr chropowatości wału	Rz _w	μm
Parametr chropowatości panwi	Rz _p	μm
Lepkość dynamiczna oleju	η	Pa·s
Luz promieniowy	δ	mm
Ekscentryczność	e	mm
Ekscentryczność względna	ε	-
Najmniejsza grubość warstewki smaru	h ₀	mm
Liczba Sommerfelda	So	-
Prędkość liniowa wału	v	m/s
Względny luz promieniowy	ψ	-
Względny luz efektywny	ψ _{eff}	-
Średni luz skuteczny	L _{srSk}	μm
Współczynnik tarcia	μ	-
Natężenie przepływu środka smarnego	Q	m ³ /s
Średnie naciski powierzchniowe	p _{sr}	MPa
Dopuszczalne naciski powierzchniowe	p _{dop}	MPa
Kąt najmniejszej grubości filmu smarnego	β	°
Temperatura smaru na dopływie	t ₁	°C
Temperatura smaru na wypływie	t ₂	°C
Temperatura otoczenia	t _{ot}	°C
Przyjęta wartość temperatury łożyska	t _{B0}	°C
Obliczona wartość temperatury łożyska	t _{B1}	°C
Moc tarcia	N _T	W
Moment tarcia	M _T	Nm
Prędkość opływu korpusu łożyska przez powietrze	v _{pow}	m/s
Współczynnik obl. powierzchni korpusu łożyska	W _{korp}	-
Całkowita powierzchnia wymiany ciepła	A _{wym}	m ²
Pole powierzchni wymiany ciepła korpusu	A _{korp}	m ²
Pole powierzchni wymiany ciepła wału	A _{wał}	m ²
Współczynnik przejmowania ciepła	k	W/ m ² ·K
Współczynnik rozszerzalności temperaturowej wału	α _w =11·10 ⁻⁶	1/K
Współczynnik rozszerzalności temperaturowej panwi	α _p =23·10 ⁻⁶	1/K
Ciepło właściwe smaru	c _p =2000	J/kg·K
Mechaniczny równoważnik ciepła	Jm	J/cal



Rys. 1. Wymiary charakterystyczne łożyska oraz przykład konstrukcji łożyska ślizgowego smarowanego pierścieniowo

2. Uwagi odnośnie działania programu:

1. Do uruchomienia plików z rozszerzeniem *.XMCD konieczne jest zainstalowanie programu MathCad 14 (Bezpłatną, 30-dniową wersję testową programu można pobrać ze strony producenta (PTC))
2. Ułamki dziesiętne należy wprowadzać używając symbolu kropki
3. Poszczególne pola programu zostały wyróżnione kolorami:
 - Kolorem niebieskim wyróżniono pola do których należy wprowadzić parametry zadane w temacie projektu, oraz pola w których wyświetlane są wyniki obliczeń.
 - Kolorem żółtym wyróżniono pola w które należy wprowadzić dobrane wartości parametrów
 - Kolorem pomarańczowym wyróżniono pola zawierające podpowiedzi i informacje
 - Kolorem zielonym wyróżniono wyniki obliczeń
 - Kolorem czerwonym wyróżniono pola zawierające uwagi.
4. Możliwe jest obliczanie parametrów pracy łożysk o kącie opasania 360° o dowolnej wartości parametru L/D.
5. Możliwe jest obliczanie parametrów pracy łożysk w których przepływ środka smarnego jest laminarny. Warunek ten jest sprawdzany przez algorytm, w przypadku jego nie spełnienia Użytkownik jest informowany stosownym komunikatem.
6. Algorytm umożliwia wybór lepkości środka smarnego poprzez wskazanie klasy lepkości oleju. Dostępnych jest 12 klas lepkości od ISO VG10 do ISO VG1000.
7. Algorytm uwzględnia zmianę lepkości środka smarnego w funkcji temperatury.
8. Algorytm uwzględnia zmianę gęstości środka smarnego w funkcji temperatury.
9. Algorytm uwzględnia korekcję luzu ze względu na rozszerzalność temperaturową materiału wału i panewki
10. Algorytm uwzględnia zmianę wymiaru najmniejszej grubości filmu smarnego ze względu na rozszerzalność temperaturową materiału wału i panewki
11. Algorytm pozwala na wstępne określenie luzu promieniowego, przez podanie szacunkowego zakresu tego parametru
12. Algorytm umożliwia przeprowadzenie bilansu cieplnego węzła łożyskowego

13. Algorytm pozwala na określenie parametru chropowatości powierzchni roboczych panewki i czopa poprzez wybranie dla każdej z nich sposobu obróbki
14. Algorytm pozwala na dobór materiału panwi, poprzez wskazanie z rozwijanego menu odpowiedniej pozycji.
15. Wynikiem przeprowadzanej analizy pracy węzła łożyskowego jest wyświetlenie przez algorytm parametrów pracy układu tj:
 - średnia temperatura pracy łożyska ($^{\circ}\text{C}$)
 - lepkość dynamiczna smaru ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)
 - współczynnik tarcia (-)
 - moment tarcia (Nm)
 - moc tarcia (W)
 - ekscentryczność (mm)
 - średni luz skuteczny (mm)
 - natężenie przepływu środka smarnego (l/min)
 - średnica panwi (mm)
 - średnica wału (mm)
 - kąt najmniejszej grubości filmu smarnego ($^{\circ}$)
 - prędkość obwodowa (m/s)
 - liczba Sommerfelda (-)
 - efektywny luz względny (-)

3. Algorytm obliczeń dla łożyska smarowanego pierścieniowo

3.1. Założenia

1. Osie wału i panewki są wzajemnie równoległe
2. Rozkład nacisków wzdłuż panwi jest równomierny
3. Lepkości oleju zmienia się pod wpływem temperatury
4. Wał wykonany jest z materiału o wyższych parametrach wytrzymałościowych niż panewka.
5. W łożysku nie występuje zewnętrzna cyrkulacja smaru lub jest na tyle mała że nie wpływa na bilans cieplny łożyska
6. Temperatura oleju na wlocie do łożyska jest równa temperaturze oleju w misce olejowej.
7. Ciepło z łożyska odprowadzane jest wyłącznie przez konwekcję.

3.2. Struktura programu

I. Wprowadzenie parametrów geometrycznych oraz warunków pracy wężła łożyskowego

Należy wprowadzić wartości parametrów zadanych w temacie projektu. Na Rys.2 przedstawiono widok ogólny okna programu.

WPROWADZENIE PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH ORAZ WARUNKÓW PRACY ŁOŻYSKA		
I. Średnica wału (D) [mm]	<input type="text" value="80"/>	
II. Długość panwi (L) [mm]	<input type="text" value="40"/>	$\frac{L}{D} = 0.5$
III. Obciążenie łożyska (F) [N]	<input type="text" value="9000"/>	
IV. Prędkość obrotowa wału (n) [obr/min]	<input type="text" value="3600"/>	
V. Temperatura otoczenia (t_{ot}) [°C]	<input type="text" value="25"/>	
VI. Olej	<input type="text" value="ISO VG68"/>	
VII. Materiał panwi	<input type="text" value="PbSb15SnAs"/>	
VIII a. Sposób obróbki wału (Rz_w) [μm]	<input type="text" value="Toczenie b.dokładne"/>	$Rz_w = 2.5$
VIII b. Sposób obróbki panwi (Rz_p) [μm]	<input type="text" value="Szlifowanie"/>	$Rz_p = 1.25$
IX a. Współczynnik obl. powierzchni korpusu łożyska W_{korp} (20-30)	<input type="text" value="25"/>	
IX b. lub podaj pole powierzchni oddawania ciepła A_{wym} [m^2]	<input type="text" value="2"/>	
X. Prędkość opływu korpusu łożyska przez powietrze v_{pow} [m/s]	<input type="text" value="2"/>	
XI. Luz łożyskowy (δ) [mm]	<input type="text" value="0.06"/>	
XII. Temperatura oleju w misce olejowej (t_{B0}) [°C]	<input type="text" value="88"/>	

Rys. 2. Okno wprowadzania zadanych parametrów łożyska

Poz.I. Wprowadzić zadaną średnicę wału

Poz.II. Dobrać długość panwi

Po wprowadzeniu danych zwracana jest wartość parametru L/D

Poz.III. Podać obciążenie łożyska

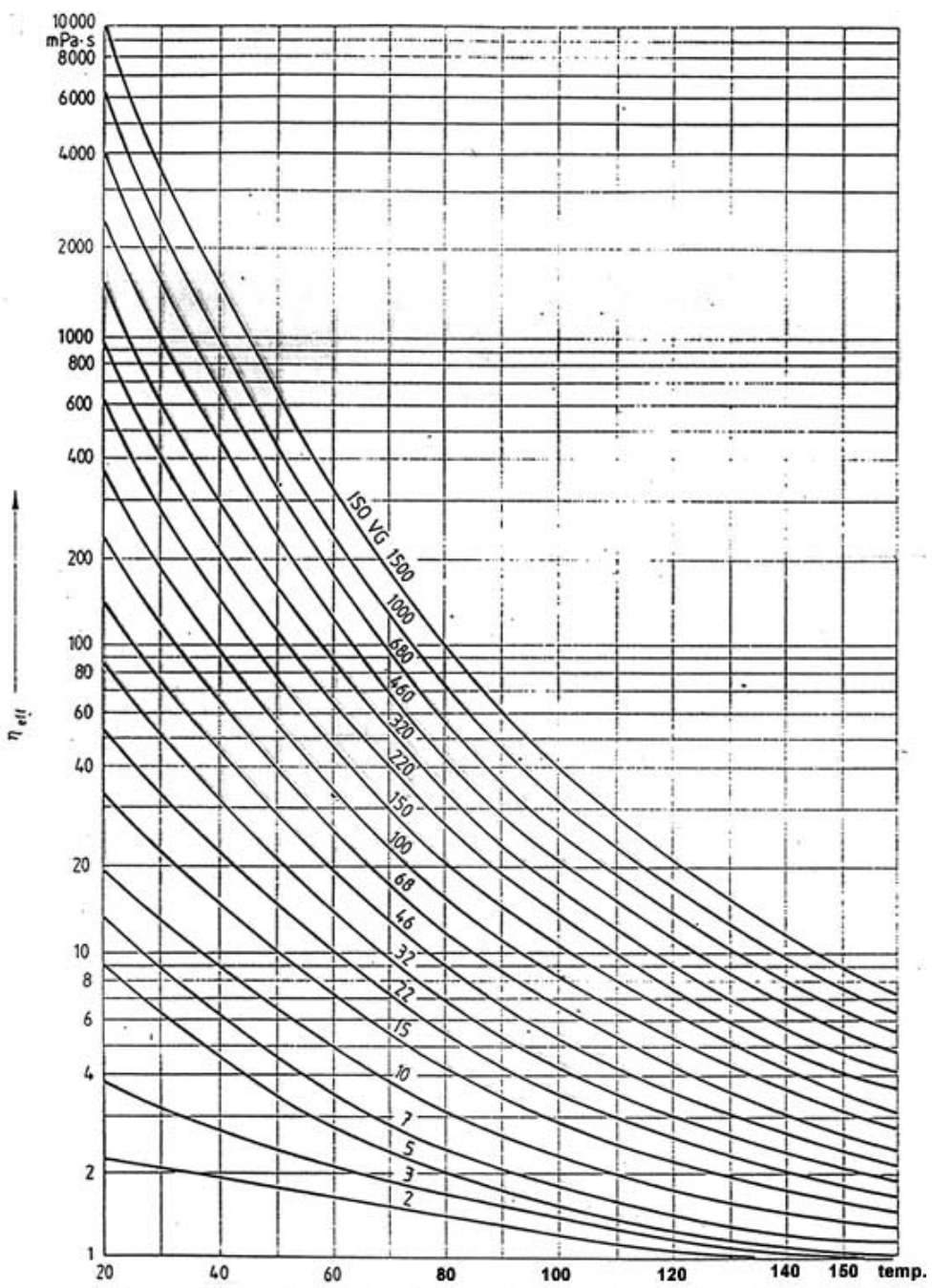
Poz.IV. Podać prędkość obrotową wału

Poz.V. Wprowadzić wartość temperatury otoczenia.

Poz.VI. Wybrać z menu rozwijanego klasę lepkości oleju. Do wyboru jest 12 klas lepkości; od VG10 do VG1000. Widok rozwiniętego menu przedstawiono na Rys. 3. Na Rys. 4 przedstawiono charakterystyki temperaturowe lepkości olejów.

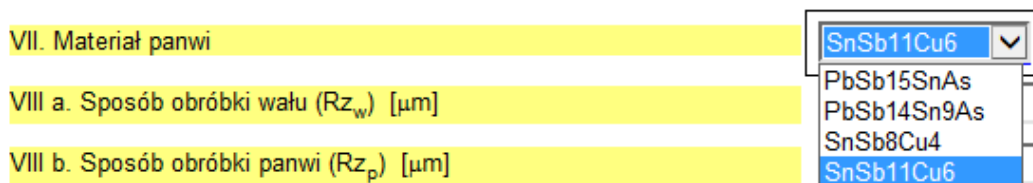
VI. Olej	ISO VG100
VII. Materiał panwi	
VIII a. Sposób obróbki wału (Rz_w) [μm]	
VIII b. Sposób obróbki panwi (Rz_p) [μm]	
IX a. Współczynnik obl. powierzchni korpusu łożyska W_{corp} (20-30)	
IX b. lub podaj pole powierzchni oddawania ciepła A_{wym} [m^2]	
X. Prędkość opływu korpusu łożyska przez powietrze v_{pow} [m/s]	

Rys. 3 Widok rozwiniętego menu do wyboru klasy lepkości oleju



Rys. 4. Charakterystyki temperaturowe olei wg klasyfikacji ISO

Poz.VII. Wybrać z menu rozwijanego materiał z panwi. Widok rozwiniętego menu przedstawiono na Rys. 5. Do wyboru są 4 materiały.



Rys. 5. Widok rozwiniętego menu do wyboru materiału panwi

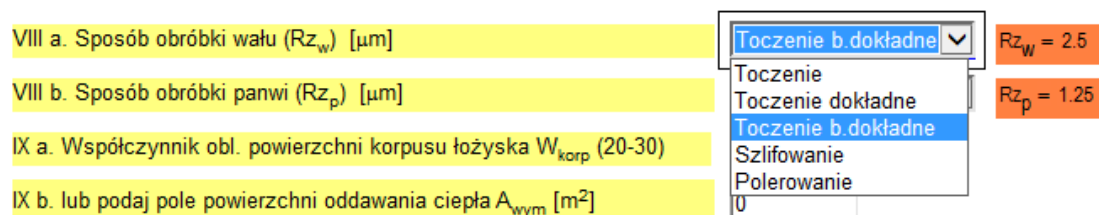
Parametry wytrzymałościowe oraz typowe obszary zastosowań proponowanych stopów łożyskowych podano w Tab 2.

Nazwa gatunku	Symbol	Dane orientacyjne warunków pracy	Zastosowanie
Ołowiowo-cynowo-antymonowo-miedziowy	PbSb15SnAs	$P_{dop}=10\text{MPa}$, $v>15\text{ m/s}$, $(pv)_{dop}<15\text{ MPa m/s}$, $t_{dop}<120\text{ }^{\circ}\text{C}$	panwie łożysk ślizgowych pracujących przy średnim natężeniu pracy, obciążeniu statycznym i dużych prędkościach obwodowych czopa.
	PbSb14Sn9As	$P_{dop}=10\text{MPa}$, $v>1,5\text{ m/s}$, $(pv)_{dop}<30\text{ MPa m/s}$, $t_{dop}<130\text{ }^{\circ}\text{C}$	panwie łożysk ślizgowych pracujących przy średnich obciążeniach udarowych lub przy dużych obciążeniach statycznych i średnich prędkościach obwodowych
Cynowo-antymonowo-miedziowy	SnSb8Cu4	$P_{dop}=10\text{MPa}$, $v>5\text{ m/s}$, $(pv)_{dop}<50\text{ MPa m/s}$, $t_{dop}<110\text{ }^{\circ}\text{C}$	panwie łożysk ślizgowych pracujących w ruchu ciągłym przy obciążeniach statycznych i dynamicznych oraz bardzo dużych prędkościach obwodowych czopa
	SnSb11Cu6	$P_{dop}=20\text{MPa}$, $v<70\text{ m/s}$, $(pv)_{dop}<80\text{ MPa m/s}$, $t_{dop}<110\text{ }^{\circ}\text{C}$	panwie łożysk ślizgowych pracujących przy dużych obciążeniach uderzeniowych lub statycznych, przy dużym natężeniu pracy i przy znacznych prędkościach obwodowych

Tab.2. Stopy łożyskowe cyny i ołowiu wg PN-ISO 4381:1997

Poz.VIII a. oraz **Poz.VIII b.** Wybrać z menu rozwijanego sposób obróbki powierzchni roboczej wału i panwi. Widok rozwiniętego menu przedstawiono na Rys. 6. Zwracana jest wartość parametru $Rz[\mu\text{m}]$

W Tab. 3 przedstawiono wartości parametru Rz przypisane do danego sposobu obróbki.



Rys. 6. Rys. 7. Widok rozwiniętego menu do wyboru sposobu obróbki powierzchni roboczych łożyska

Rodzaj obróbki	Rz [μm]
Toczenie	20
Toczenie dokładne	10
Toczenie bardzo dokładne	2,5
Szlifowanie	1,25
Polerowanie	0,63

Tab.3. Wartości parametru Rz przypisane do danego sposobu obróbki

Poz. IX a. lub Poz. IX b. Należy wprowadzić parametry określające pole powierzchni oddawania ciepła przez węzeł łożyskowy

Możliwe jest wprowadzenie współczynnika obliczeniowego powierzchni korpusu łożyska W_{korp} (**Poz. IX a.**), dla typowych korpusów łożysk parametr ten przyjmuję wartość w zakresie 20-30.

Całkowita powierzchnia wymiany ciepła węzła łożyskowego jest sumą powierzchni korpusu łożyska oraz powierzchni części wału przez którą odprowadzanie jest ciepło z układu.

$$A_{\text{wym}} = A_{\text{korp}} + A_{\text{wal}} \quad (1)$$

Przybliżone pole powierzchni korpusu łożyska określane jest na podstawie uproszczonej zależności:

$$A_{\text{korp}} = W_{\text{korp}} \cdot L \cdot D \quad (2)$$

gdzie: W_{korp} jest współczynnikiem wielkości korpusu przybierającym wartości w zakresie (20-30).

Przybliżone pole powierzchni wału przez które oddawane jest ciepło do otoczenia określane jest na podstawie uproszczonej zależności:

$$A_{\text{wal}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + 6 \cdot L \cdot D \quad (3)$$

Możliwe jest również bezpośrednie podanie powierzchni oddawania ciepła (**Poz. IX b**) jeżeli wartość tego parametru jest równa 0 algorytm do obliczeń wykorzystuje parametr W_{korp} , w innym przypadku pod uwagę jest brana podana powierzchnia oddawania ciepła.

Poz. X. Należy wprowadzić szybkość opływu powierzchni łożyska przez powietrze. Temperatura powietrza opływającego łożysko wynosi t_{ot} (patrz **Poz. V**)

Poz. XI. Należy wprowadzić wartość luzu promieniowego (Rys.8). Możliwe jest podanie dowolnej wartości, jednak ze względu na ułatwienie zadania projektowego algorytm podaje szacowana wartość tego parametru przez wskazanie wartości δ_{min} i δ_{max} luzu.

Rys. 8. Dobór wartości luzu promieniowego

Wartość luzu musi być tak dobrana, aby minimalna grubość filmu smarnego zapewniała zachowanie tarcia płynnego.

Należy wprowadzić wartość luzu promieniowego (Rys.4). W polu wyróżnionym na pomarańczowo podano **sugerowany** zakres średniego luzu promieniowego określony na podstawie z zależności empirycznej:

$$\delta = D \cdot 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[4]{v} \pm 30\% \quad (4)$$

Przy doborze wartości luzu należy kierować się zaleceniami zawartymi w tabeli 43

CECHA ŁOŻYSKA	MNIEJSZE WARTOŚCI LUZU	WIĘKSZE WARTOŚCI LUZU
Wartość L/D	$\leq 0,8$	$> 0,8$
Prędkość obrotowa	mała	duża
Wartość obciążenia	mała	duża
Wartość modułu Younga E	małe E	duże E

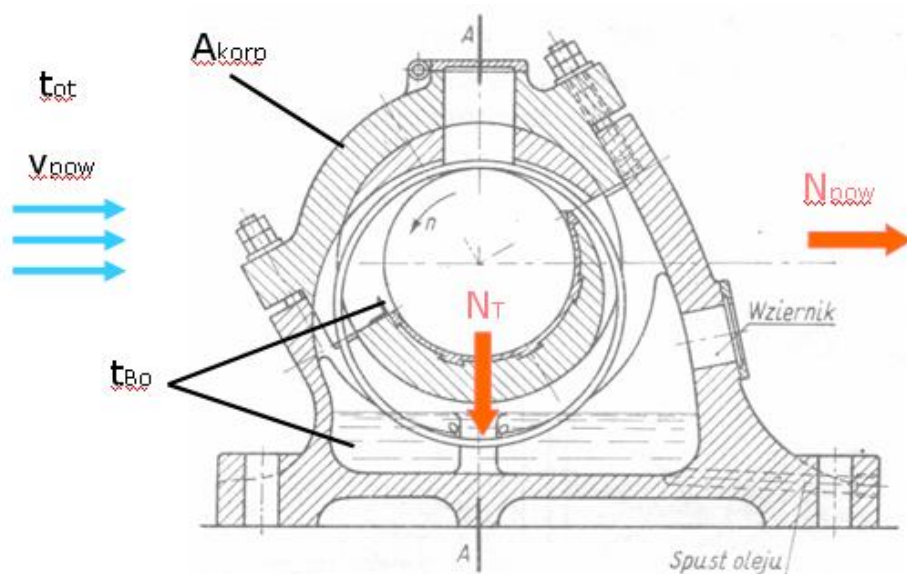
Tab.4. . Wpływ cech łożyska na dobór wartości luzu promieniowego

Poz. XII. Należy wprowadzić wartość temperatury oleju w misce olejowej. W pierwszej kolejności należy wprowadzić wartość dowolną (odgadniętą). Następnie wartość ta będzie korygowana w celu przeprowadzenia bilansu cieplnego węzła łożyskowego.

II. Obliczenia

Sprawdzenie bilansu cieplnego łożyska

Źródłem ciepła generowanego w łożysku (Rys. 9) są straty związane z oporami tarcia w filmie olejowym (N_T - moc tarcia). Energia cieplna oddawana jest do otoczenia przez konwekcję (patrz założenie 5). Ilość energii odprowadzanej z łożyska jest zależna do powierzchni wymiany ciepła oraz szybkości opływania korpusu przez powietrze.



Rys. 9a. Źródła oraz sposób odprowadzania ciepła z łożyska smarowanego za pomocą pierścienia

W celu przeprowadzenia bilansu cieplnego łożyska należy wprowadzić wartość temperatury oleju w misce olejowej oraz parametrów szybkości opływu korpusu łożyska przez powietrze oraz współczynnika wielkości korpusu.

W pierwszym kroku obliczeń należy wprowadzić wartość temperatury w misce olejowej t_{B0} równą zadanej temperaturze otoczenia t_{ot} ,

Na Rys. 10 przedstawiono widok okna w którym zwracane są wyniki obliczeń oraz komunikaty.



Rys. 10b. Przykład konstrukcji łożyska ślizgowego smarowanego pierścieniowo [5]

1. Szacowana wartości luzu	$\delta_{\min} = 0.0633$	$\delta_{\max} = 0.1175$	
2. Liczba Reynoldsa		$Re = 64.3$	$Re_{dop} = 1.4307 \times 10^3$
	<input type="text" value="OK"/>		
3. Sprawdzenie warunku wytrzymałości panwi na dociski powierzchniowe $p_{sr} < p_{dop}$	$p_{sr} = 3.75 \text{ MPa}$		$p_{dop} = 20 \text{ MPa}$
	<input type="text" value="OK"/>		
4. Sprawdzenie ilocznu nacisków jednostkowych i prędkości $p_{sr} v < p_{v_{dop}}$		$p v = 47.12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{MPa}$	$p v_{dop} = 80 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \text{MPa}$
	<input type="text" value="OK"/>		
5. Najmniejsza grubość filmu smarnego ($h_0 > R_{z_w} + R_{z_p}$)		$h_0 = 11.6314 \mu\text{m}$	$R_{z_w} + R_{z_p} = 2.5 \mu\text{m}$
	<input type="text" value="OK"/>		
6. Ekscentryczność względna ϵ		$\epsilon = 0.8592$	$\epsilon_{\min} = 0.6$ $\epsilon_{\max} = 0.9$
	<input type="text" value="OK"/>		
7. Temperatura obliczona na podstawie bilansu cieplnego	$t_{B1} = 151.6 \text{ }^\circ\text{C}$		
		$t_{B0_Nowe} = 125.8 \text{ }^\circ\text{C}$	
	<input type="text" value="Założona wartość temperatury w misce olejowej różni się od obliczonej"/>		

Rys. 11. Okno wyników obliczeń

Poz.1 – szacowana wartość luzu promieniowego (sugestia/podpowiedź do wprowadzenia parametru Poz. XII)

Poz.2 – obliczenie liczby Reynoldsa (sprawdzenie czy przepływ środka smarnego w łożysku jest laminarny)

$$Re = \frac{\rho v \delta}{\eta} \quad (5)$$

Wartość ta jest porównywana z wartością dopuszczalną Re_{dop} , obliczoną zgodnie z DIN 31 652 jako:

$$Re_{dop} = 41.3 \sqrt{\frac{D}{2 \cdot \delta}} \quad (6)$$

Jeżeli $Re > Re_{dop}$ zwracana jest informacja, że przepływ w łożysku jest nielaminarny i należy wprowadzić korektę (zmienić luz promieniowy lub wybrać olej o wyższej klasie lepkości).

Poz.3 – sprawdzany jest warunek nacisków doduszanych.

Długość łożyska należy dobrać z warunku wytrzymałości panwi na naciski powierzchniowe:

$$p_{sr} = \frac{F}{L \cdot D} \leq p_{dop} \quad (7)$$

W przypadku niespełnienia warunku należy zmienić długość panwi lub dobrać materiał panwi o wyższych parametrach wytrzymałościowych.

Poz.4 – sprawdzany jest warunek dopuszczalnej intensywności pracy łożyska

Warunek dopuszczalnej intensywności pracy łożyska:

$$p_{sr} v \leq p v_{dop} \quad (8)$$

W przypadku niespełnienia warunku należy zmienić długość panwi **lub dobrać materiał panwi o wyższych parametrach wytrzymałościowych.**

Optymalna wartość parametru L/D ze względu na moc tarcia, temperaturę pracy, graniczną nośność i mały przepływ smaru powinna mieścić się w zakresie od 0,3 do 1,0. Łożyska krótkie charakteryzują się lepszymi warunkami chłodzenia, ale na skutek wzrostu wpływów bocznych smaru ich nośność jest mniejsza. Łożyska takie są mniej wrażliwe na ugięcia i zukosowania czopa i związany z tym nierównomierny rozkład nacisków wzdłuż osi panwi.

Poz.5 – sprawdzany jest warunek najmniejszej grubości filmu smarnego

Spełnienie warunku grubości filmu smarnego oznacza, że w miejscu najmniejszej grubości filmu nie dochodzi do styku wierzchołków nierówności powierzchni ślizgowej czopa i panwi.

$$h_{\min} \geq Rz_w + Rz_p \quad (9)$$

W przypadku nie spełnienia tego warunku, należy zmienić sposób obróbki wału i/lub panewki lub zmienić luz promieniowy lub lepkość oleju. W pomarańczowym polu wyświetlana jest sumaryczna wartość wysokości chropowatości wału i panewki.

Poz.6 – sprawdzany jest warunek wartości ekscentryczności względnej

Dla zapewnienia stabilnej pracy łożyska wymaga się aby ekscentryczność względna ε w projektowanym łożysku miała wartość $0,6 \leq \varepsilon \leq 0,9$.

Przy małych wartościach ekscentryczności względnej ($\varepsilon < 0,6$) istnieje możliwość występowania niestabilnego ruchu czopa w łożysku wywołanego turbulentnym przepływem smaru w filmie olejowym. Ponadto przy przekroczeniu wartości $\varepsilon > 0,9$ film olejowy staje się bardzo cienki i zaczynają odgrywać rolę zjawiska nie uwzględnione w przyjętym modelu obliczeniowym łożyska.

6. Ekscentryczność względna ε

$\varepsilon = 0.9839$

$\varepsilon_{\min} = 0.6$

$\varepsilon_{\max} = 0.9$

Zbyt wysoka wartość ekscentryczności względnej (wprowadź korektę)

Rys. 12. Sprawdzenie warunku wartości ekscentryczności względnej

W ramce po prawej stronie (Rys.7) przedstawiono zależność na podstawie której wyznaczana jest wartość ekscentryczności względnej. W celu zmienienia wartości tego parametru należy doprowadzić do zmiany grubości filmu smarnego przez zmianę lepkości środka smarnego, zmianę parametrów pracy, zmianę długości łożyska lub zmienić wartość luzu promieniowego.

Poz.7 – Temperatura obliczona na podstawie bilansu cieplnego

Na podstawie wprowadzonych danych algorytm wyznacza temperaturę oleju w misce olejowej na podstawie bilansu cieplnego.

Jeżeli różnica pomiędzy temperaturą t_{B0} (założoną w poz. XIII) a temperaturą obliczona (poz.7) jest większa niż 2°C zostanie zwrócony stosowny komunikat.

W takim przypadku w poz. XII należy wprowadzić nową wartość temperatury. Sugerowana wartość temperatury podawana jest w polu t_{B0_Nowe} .

Należy wprowadzić nową wartość temperatury oleju w misce olejowej t_{B0} , aż do wyświetlenia komunikatu „OK”. Zmianę temperatury łożyska można uzyskać również przez zmianę szybkości opływającego korpus łożyska powietrza, oraz przez zmianę wielkości korpusu (parametr W_{korp}) lub zmianę pola powierzchni oddawania ciepła A_{wym} .

Jeżeli zostanie wyświetlony komunikat „OK” procedura obliczeniowa została zakończona powodzeniem. Wartości parametrów pracy łożyskowego węzła tarcia wyświetlane są w oknie programu

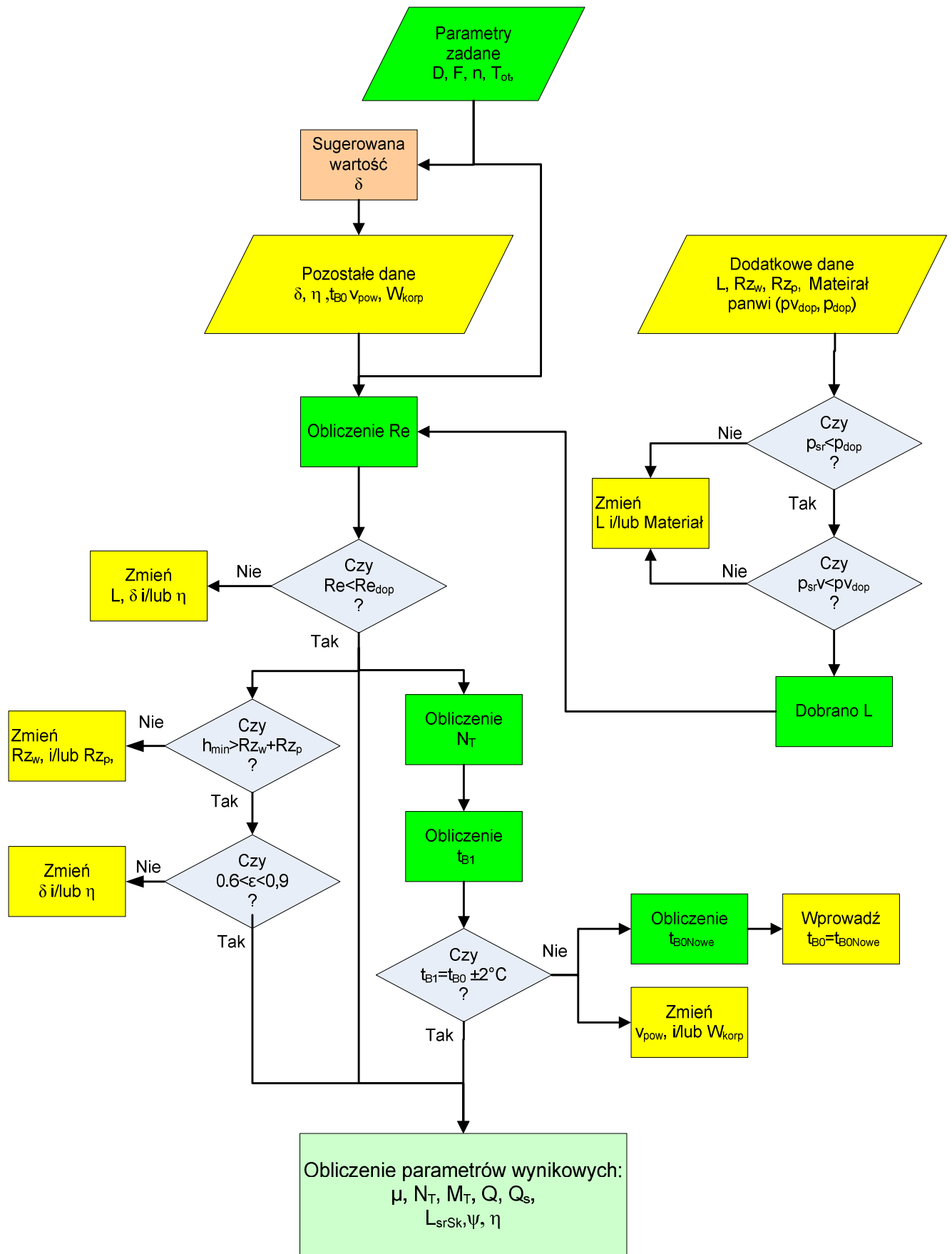
WARTOŚCI PARAMETRÓW PRACY ŁOŻYSKA

$t_{\text{red}} = 64 \text{ } ^\circ\text{C}$	--- Średnia temperatura pracy łożyska
$\eta = 10.575 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	--- Lepkość dynamiczna smaru
$\mu = 0.005$	--- Współczynnik tarcia
$M_T = 1.827 \text{ N}\cdot\text{m}$	--- Moment tarcia
$N_T = 688.8 \text{ W}$	--- Moc tarcia
$e = 0.024 \text{ mm}$	--- Ekscentryczność
$\varepsilon = 0.7964$	--- Ekscentryczność względna
$L_{\text{srSk}} = 132.78 \text{ }\mu\text{m}$	--- Średni luz skuteczny
$\psi_{\text{eff}} = 0.0016$	--- Względny luz efektywny
$\beta = 31.43 \text{ deg}$	--- Kąt minimalnej grubości filmu smarnego
$S_o = 1.7301$	--- Liczba Sommerfelda
$v = 15.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	--- Prędkość obwodowa
$Q = 1.7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$	--- Natężenie przepływu środka smarnego

KONIEC PROCEDURY OBLICZENIOWEJ

Rys. 13. Okno wyników obliczeń

Algorytm przeprowadzania obliczeń przestawiono na schemacie blokowym (Rys.13)



Rys. 14. Algorytm przeprowadzania obliczeń łożyska ślizgowego smarowanego pierścieniowo

4. Algorytm obliczeń dla łożyska z wymuszonym obiegiem smaru

4.1. Założenia

1. Osie wału i panewki są wzajemnie równoległe
2. Rozkład nacisków wzdłuż panwi jest równomierny
3. Lepkości oleju zmienia się pod wpływem temperatury
4. Wał wykonany jest z materiału o wyższych parametrach wytrzymałościowych niż panewka.
5. W łożysku występuje zewnętrzna cyrkulacja
6. W zewnętrznym obwodzie obiegu smaru znajduje się chłodnica oleju, która schładza olej do temperatury otoczenia (temperatura oleju na wlocie do łożyska jest zawsze równa temperaturze otoczenia).
7. Energia cieplna odprowadzana jest z łożyska jedynie przez przepływający przez łożysko olej

4.2. Struktura programu

I. Wprowadzenie parametrów geometrycznych oraz warunków pracy wężła łożyskowego

WPROWADZENIE PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH ORAZ WARUNKÓW PRACY ŁOŻYSKA		
I. Średnica wału (D) [mm]	<input type="text" value="120"/>	
II. Długość panwi (L) [mm]	<input type="text" value="80"/>	$\frac{L}{D} = 0.6667$
III. Obciążenie łożyska (F) [N]	<input type="text" value="10000"/>	
IV. Prędkość obrotowa wału (n) [obr/min]	<input type="text" value="2000"/>	
V. Temperatura otoczenia (t_{ot}) [°C]	<input type="text" value="25"/>	
VI. Olej	<input type="text" value="ISO VG46"/>	
VII. Materiał panwi	<input type="text" value="SnSb11Cu6"/>	
VIII a. Sposób obróbki wału (Rz_w) [μm]	<input type="text" value="Toczenie b.dokładne"/>	$Rz_w = 2.5$
VIII b. Sposób obróbki panwi (Rz_p) [μm]	<input type="text" value="Szlifowanie"/>	$Rz_p = 1.25$
IX. Luz łożyskowy (δ) [mm]	<input type="text" value="0.12"/>	
X. Założona temperatura oleju na wylocie z łożyska ($t_{2,0}$) [°C]	<input type="text" value="27"/>	

Rys. 15. Okno wprowadzania zadanych parametrów łożyska

Poz.I. Wprowadzić zadaną średnicę wału

Poz.II. Dobrać długość panwi (patrz str.8)

Poz.III. Podać obciążenie łożyska

Poz.IV. Podać prędkość obrotową wału

Poz.V. Wprowadzić wartość temperatury otoczenia

Poz.VI. Wybrać z menu rozwijanego klasę lepkości oleju (patrz str.8-9)

Poz.VII. Wybrać z menu rozwijanego materiał z panwi (patrz str.10)

Poz.VIII a. oraz **Poz.VIII b.** Wybrać z menu rozwijanego sposób obróbki powierzchni roboczej wału i panwi (patrz str.10-11)

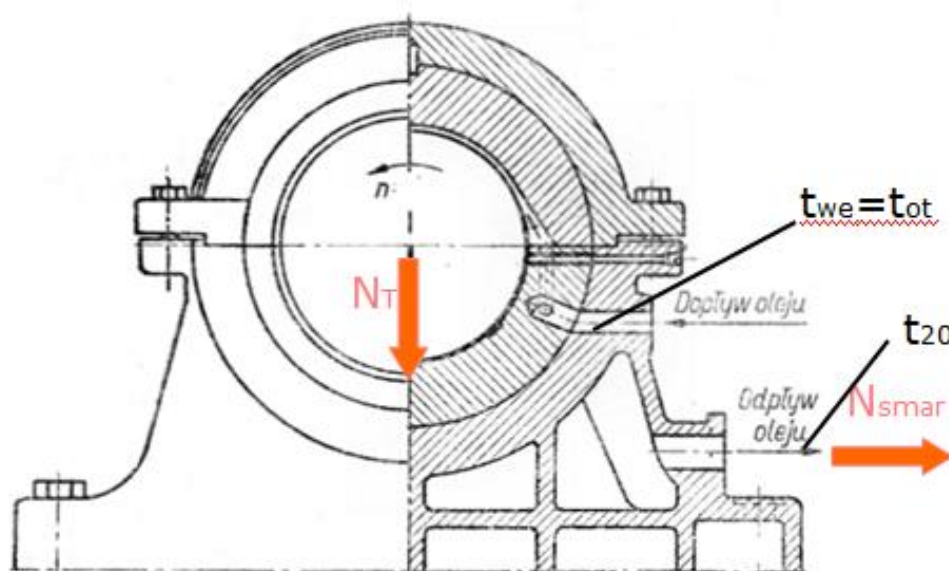
Poz. IX. Należy wprowadzić wartość luzu promieniowego (patrz str.12)

Poz. X. Należy wprowadzić wartość temperatury oleju na wylocie z łożyska (Rys.14). W pierwszej kolejności należy wprowadzić wartość dowolną (odgadniętą). Następnie wartość ta będzie korygowana w celu przeprowadzenia bilansu cieplnego węzła łożyskowego.

II. Obliczenia

Sprawdzenie bilansu cieplnego łożyska

Źródłem ciepła generowanego w łożysku (Rys. 15) są straty związane z oporami tarcia w filmie olejowym (N_T - moc tarcia). Cała energia cieplna oddawana jest do oleju i wyprowadzana z łożyska wraz ze smarem. Ilość energii odprowadzanej z łożyska jest funkcją natężenia przepływu środka smarowego w łożysku.



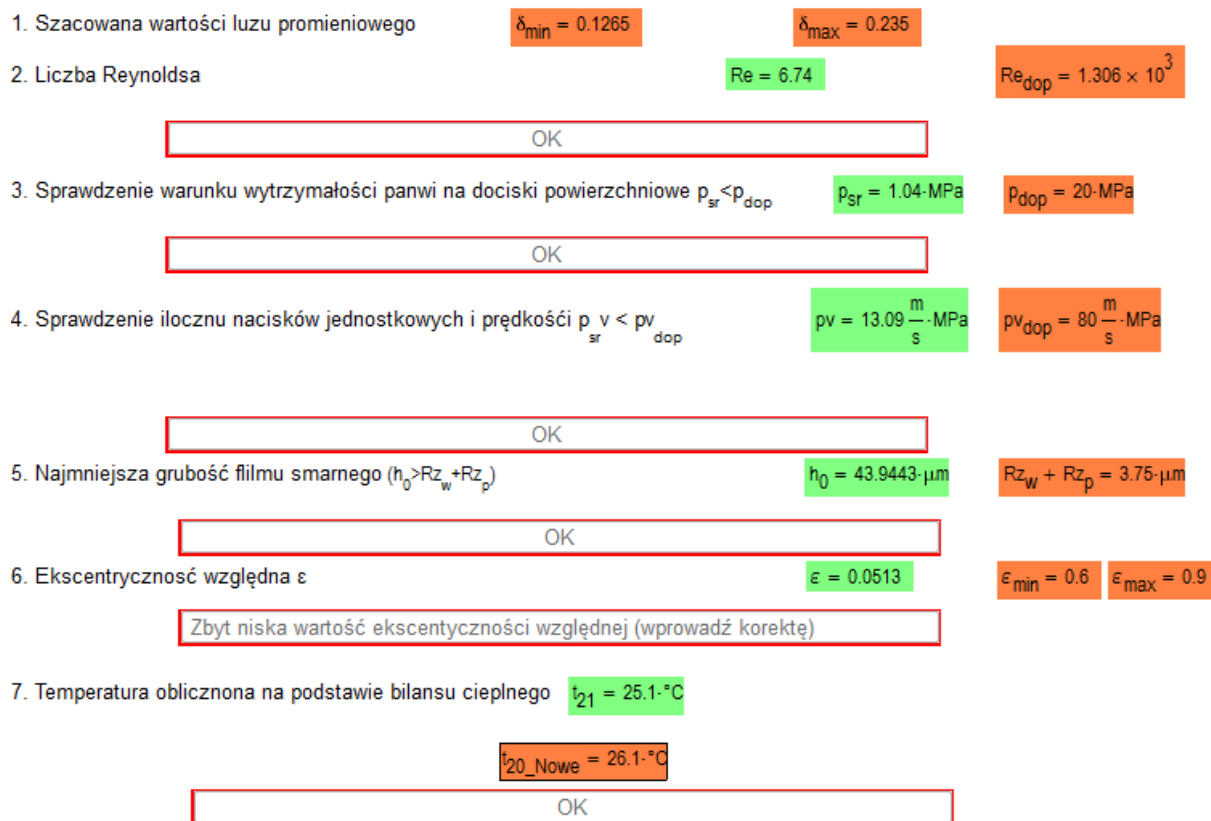
Rys. 16. Źródła oraz sposób odprowadzania ciepła z łożyska smarowanego obiegowo

W celu przeprowadzenia bilansu cieplnego łożyska należy wprowadzić wartość temperatury na wyjściu z łożyska $t_{2,0}$.

Program oblicza bilans cieplny łożyska przy założeniu, że cała energia cieplna z łożyska oddawana jest do środka smarowego.

Na podstawie wprowadzonych parametrów przeprowadzany jest bilans cieplny łożyska. Program zwraca obliczoną wartość parametru t_{20} (Rys.16). Jeżeli wartość obliczona t_{21} różni się o więcej niż 2°C od temperatury przyjętej wcześniej, wyświetlany jest odpowiedni komunikat. Należy wprowadzić nową wartość temperatury oleju na wyjściu z łożyska t_{21} , aż do wyświetlenia komunikatu „OK”. Zmianę temperatury łożyska można uzyskać przez zmianę natężenia przepływu smaru. Natężenie przepływu smaru jest funkcją parametrów (η , δ).

Jeżeli zostanie wyświetlony komunikat „OK” procedura obliczeniowa została zakończona powodzeniem. Wartości parametrów pracy łożyskowego węzła tarcia wyświetlane są w oknie programu



Rys. 17. Okno wyników obliczeń

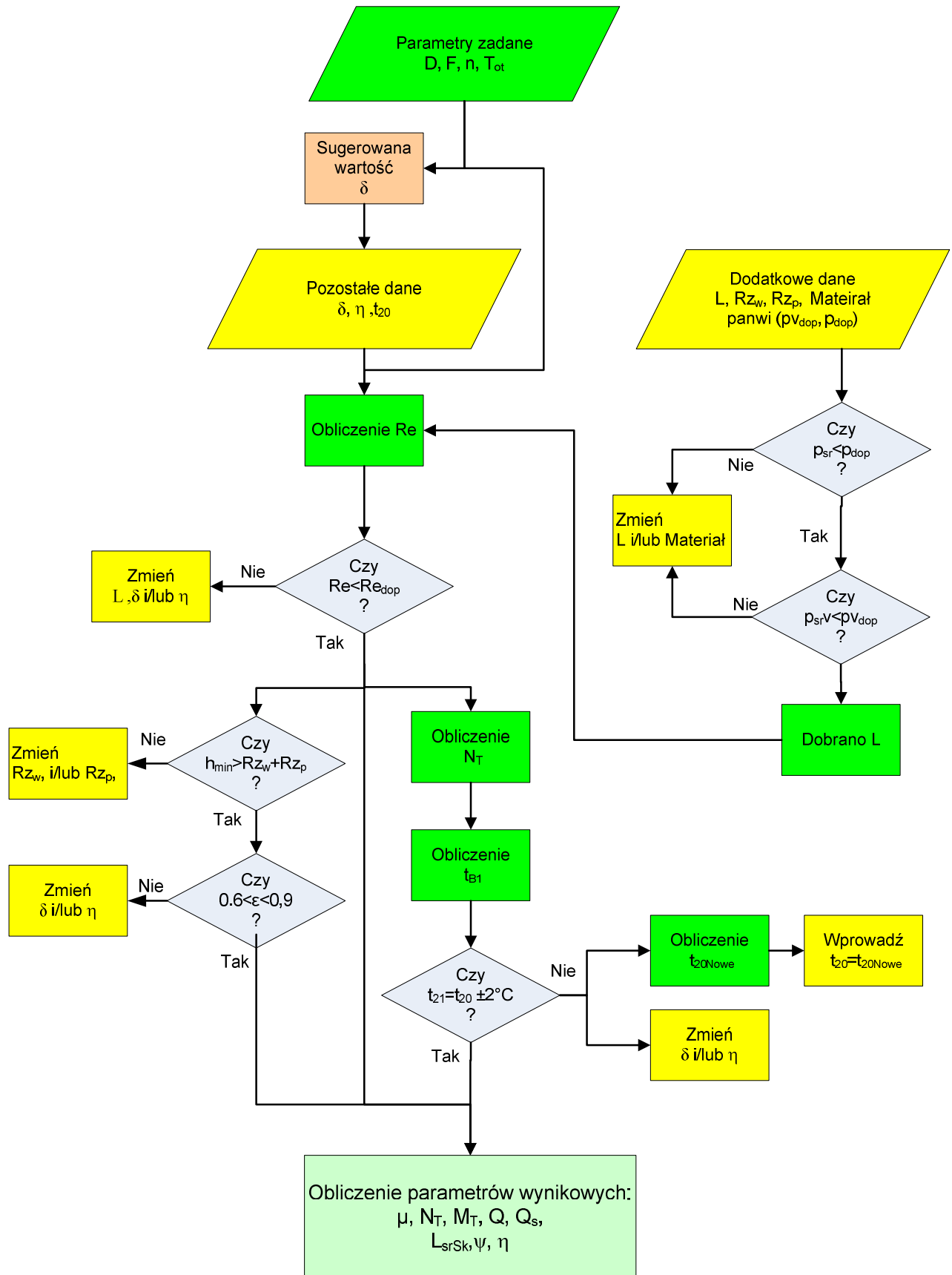
WARTOŚCI PARAMETRÓW PRACY ŁOŻYSKA

$t_{\text{śred}} = 26.1 \text{ }^\circ\text{C}$	--- Średnia temperatura pracy łożyska
$\eta = 99.897 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	--- Lepkość dynamiczna smaru
$\mu = 0.085$	--- Współczynnik tarcia
$M_T = 51.007 \text{ N}\cdot\text{m}$	--- Moment tarcia
$N_T = 10683 \text{ W}$	--- Moc tarcia
$e = 0.003 \text{ mm}$	--- Ekscentryczność
$\epsilon = 0.0513$	--- Ekscentryczność względna
$L_{srSk} = 100.14 \text{ }\mu\text{m}$	--- Średni luz skuteczny
$\psi_{\text{eff}} = 0.0008$	--- Względny luz efektywny
$\beta = 87.62 \text{ deg}$	--- Kąt minimalnej grubości filmu smarnego
$S_0 = 0.0297$	--- Liczba Sommerfelda
$v = 12.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	--- Prędkość obwodowa
$Q = 0.13 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$	--- Natężenie przepływu środka smarnego

KONIEC PROCEDURY OBLICZENIOWEJ

Rys. 18. Okno wyników obliczeń

Algorytm przeprowadzania obliczeń przestawiono na schemacie blokowym (Rys.18)



Rys. 19. Algorytm przeprowadzania obliczeń łożyska ślizgowego ze smarowaniem wymuszonym

6. Literatura:

1. Korewa, W.; Zygmunt, K.: Podstawy konstrukcji maszyn.T.2.Warszawa: WNT, 1969.
2. Reguła, J.; Ciana, W.: Podstawy konstrukcji maszyn. Materiały pomocnicze do projektowania. Olsztyn, ART., 1987.
3. Norma DIN-Taschenbuch 198. Gleitlager 2. Werkstoffe, Prüfung, Berechnung, Begriffe,1984
4. Norma DIN: Hydrodynamische Radial-Gleitlager im stationiiren. Betrieb, T1-T3,1983
5. Rockwell APS.: Dodge Sleeveoil Hydrodynamic Bearings. Rockwell International Corporation 199
6. <http://machinedesign.com/bearings/detect-oil-film-bearing-failure>, dostęp 15.03.2014