

# **Modelowanie i symulacja urządzeń mechatronicznych**

## **Ćwiczenie 3**

### **Badanie zjawisk cieplnych w mikrosilniku elektrycznym z radiatorem**

**Instrukcja laboratoryjna**

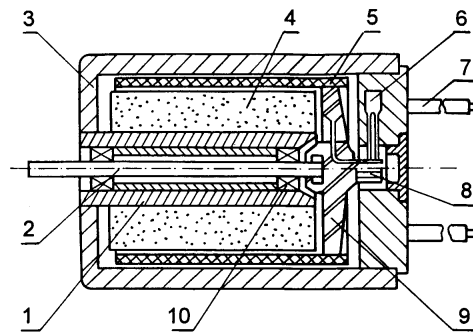
Warszawa 2013

### 3. Badanie zjawisk cieplnych w mikrosilniku elektrycznym z radiatorem

#### 3.1. WPROWADZENIE

##### 3.1.1. Model dwuelementowy

Cieplną strukturę mikrosilnika prądu stałego z wirnikiem bezrdzeniowym (rys. 3.1) dobrze opisuje model dwuelementowy, w którym jedno ciało cieplne jednorodne charakteryzuje zespół wirnika, a drugie - zespół stojana [3, 7].



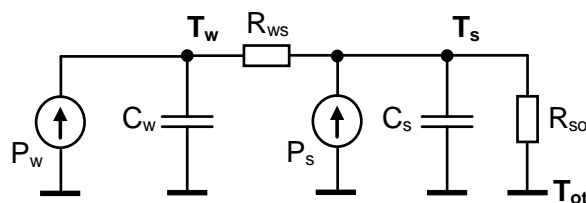
Rys. 3.1. Przekrój silnika z wirnikiem kubkowym wg [11]  
1 - oprawa łożysk, 2 - wałek, 3 - obudowa, 4 - magnes, 5 - twornik, 6 - szczotka,  
7 - wyprowadzenie, 8 - komutator, 9 - piasta, 10 - panewka

Przyjęcie założenia, że nie zachodzi bezpośrednia wymiana ciepła między wirnikiem i otoczeniem, prowadzi do zastępczego schematu przedstawionego na rys. 3.2. Dodatkowo zakłada się że moc cieplna  $P_w$  wydzielana w wirniku jest równa mocy  $P_v$  strat uzwojeniowych

$$P_w = P_v = i^2 R_t, \quad (3.1)$$

gdzie:  $i$  – prąd silnika,  $R_t$  – rezystancja uzwojeń wirnika, a w stojanie nie występują źródła ciepła [5]

$$P_s = 0. \quad (3.2)$$



Rys. 3.2. Schemat cieplnej struktury mikrosilnika z wirnikiem bezrdzeniowym;  
 $C_w$  - pojemność cieplna wirnika,  $C_s$  - pojemność cieplna stojana,  $P_w$  - moc cieplna  
wydzielana w wirniku,  $P_s$  - moc cieplna wydzielana w stojanie,  $R_{ws}$  - opór cieplny między  
wirnikiem i stojaniem,  $R_{so}$  - opór cieplny między stojaniem i otoczeniem,  $T_w$  - temperatura  
wirnika,  $T_s$  - temperatura stojana,  $T_{ot}$  - temperatura otoczenia

Szeregowy charakter powyższego układu pozwala na wprowadzenie zastępczych parametrów dynamicznych w postaci cieplnych stałych czasowych:  $\tau_s$  stojana i  $\tau_w$  wirnika

$$\tau_s = C_s R_{so}, \quad (3.3)$$

$$\tau_w = C_w R_{ws}, \quad (3.4)$$

a także na obliczanie chwilowej mocy  $W$  oddawanej z wirnika do stojana jako

$$W = \frac{(T_w - T_s)}{R_{ws}}. \quad (3.5)$$

Po uwzględnieniu powyższych zależności układ równań opisujących analizowany model przyjmuje postać

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + (T_w - T_s) = R_{ws} P_w, \quad (3.6)$$

$$\tau_s \frac{dT_s}{dt} + (T_s - T_{ot}) = R_{so} W. \quad (3.7)$$

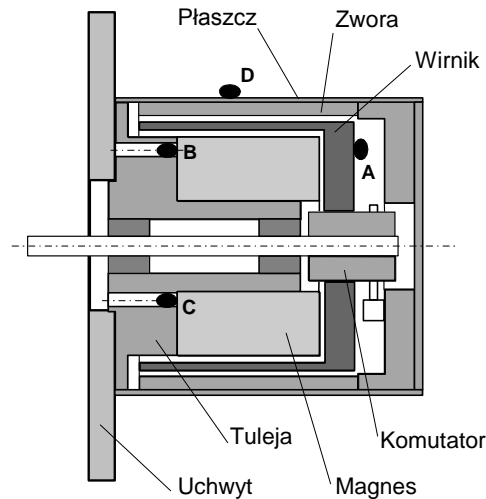
Znajomość czterech współczynników cieplnych: stałych czasowych  $\tau_w$  i  $\tau_s$  oraz oporów  $R_{ws}$  i  $R_{so}$ . pozwala na korzystanie z powyższego modelu, a tym samym przewidywanie na drodze obliczeniowej przyrostów temperatury elementów silnika występujących w czasie jego pracy. Wówczas możliwe jest także wyznaczanie bieżących wartości tych parametrów silnika, które w istotny sposób zależą od temperatury.

W katalogach renomowanych producentów [9, 10] zamieszczane są szacunkowe wartości parametrów przedstawionego modelu odnoszące się do wyidealizowanego przypadku tzw. silnika „zawieszonego w powietrzu” tj. umieszczonego w nieruchomym powietrzu o praktycznie nieograniczonej objętości [3]. Jednak w rzeczywistym układzie napędowym warunki odprowadzania ciepła z silnika do otoczenia są odmienne od warunków odniesienia [4, 5, 6]. Te zmienione warunki mogą oznaczać zarówno poprawienie, jak i pogorszenie wymiany ciepła z otoczeniem.

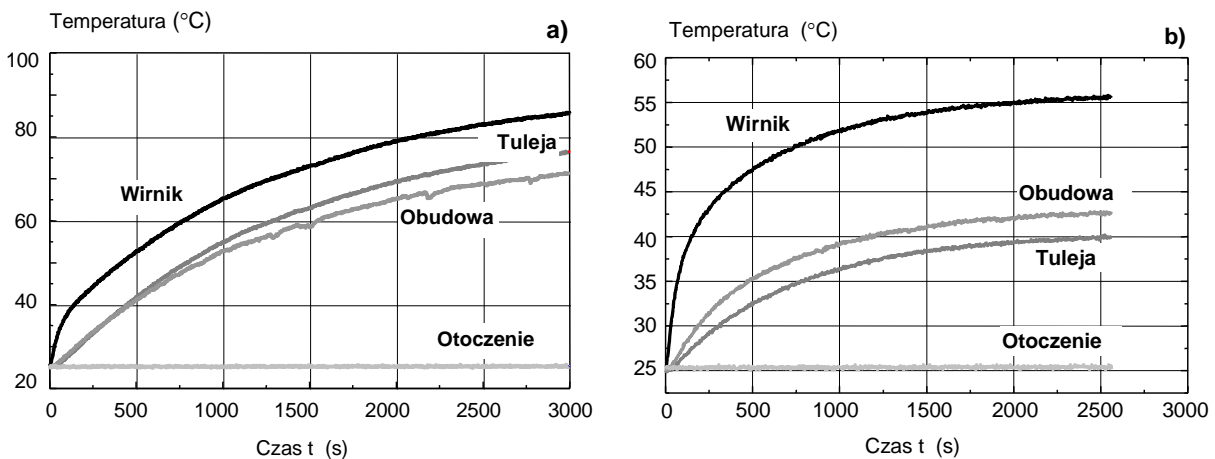
### **3.1.2. Badania doświadczalne**

Zarejestrowano temperaturowe odpowiedzi silnika *PBM-40* [1] na wymuszenie w postaci skoków mocy cieplnej o różnych wartościach, wydzielającej się w uzwojeniu jego nieruchomionego wirnika [7]. Badania przeprowadzono dla dwóch przypadków zamocowania silnika (rys. 3.3).

W pierwszym przypadku, odpowiadającym „silnikowi zawieszonemu w powietrzu”, zastosowano uchwyt praktycznie nie zakłócający odprowadzania ciepła z silnika do otoczenia, w drugim - silnik zamocowano do usytuowanego pionowo radiatora w postaci znormalizowanej płyty duraluminiowej o wymiarach (130 x 130 x 5) mm barwionej na czarno. Na rys. 3.4 zamieszczono przykładowe odpowiedzi silnika uzyskane w stanowisku badawczym.



Rys. 3.3. Silnik *PBM-40* przygotowany do badań; czujniki temperatury: A – wirnika, B, C – magnesu, D – płaszcz



Rys. 3.4. Temperaturowe odpowiedzi silnika *PBM-40* zarejestrowane w stanowisku badawczym przy wymuszeniu mocą cieplną  $P_w = 6,2 \text{ W}$  wydzielającą się w wirniku; a) silnik „zawieszony w powietrzu”, b) silnik zamocowany do radiatora

Korzystając z uzyskanych wyników sprawdzono możliwość użycia modelu dwuelementowego do opisu silnika z radiatorem. W koncepcji tej obok ciała cieplnego reprezentującego wirnik występuje ciało powstałe z połączenia stojana z radiatorem. Oznacza to zmianę parametrów charakteryzujących stojan, przy jednoczesnym założeniu, że współczynniki związane z wirnikiem nie ulegają zmianie. Jednak matematyczne opracowanie temperaturowych odpowiedzi silnika z radiatorem daje w wyniku wartości  $R_{ws}$  i  $\tau_w$  w istotny sposób różniące się od wyznaczonych dla silnika „zawieszony w powietrzu”:

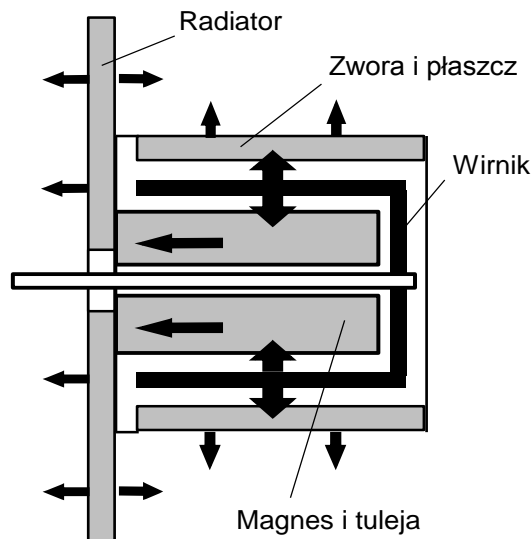
- rezystancja cieplna układu wirnik-stojan  $R_{ws} = 1,77 \text{ K/W}$  zamiast  $3,2 \text{ K/W}$ ,
- stała czasowa wirnika  $\tau_w = 80 \text{ s}$  zamiast  $50 \text{ s}$ .

Wyniki tych doświadczeń wykazały, że model dwuelementowy nie odzwierciedla w zadowalający sposób zjawisk cieplnych w silniku zamocowanym do radiatora.

### 3.1.3. Rozszerzony model zjawisk

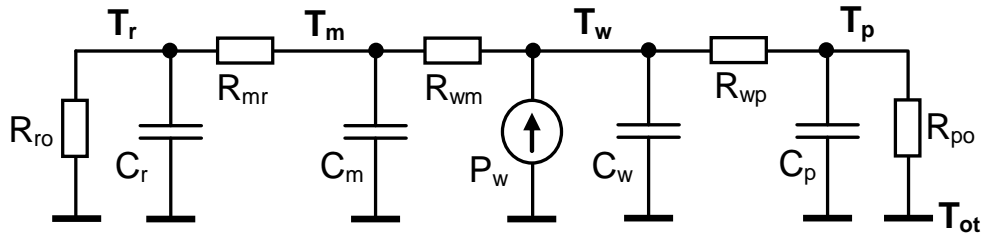
Przeprowadzono dodatkową analizę zjawisk wydzielania i rozptyłu ciepła w silniku z wirnikiem bezrdzeniowym z dołączonym radiatorem. Na tej podstawie sformułowano następujące założenia:

1. W obrębie całego wirnika występuje jednakowa temperatura;
2. Stojan silnika można opisać jako układ dwóch ciał cieplnych: wewnętrznego (magnes) i zewnętrznego (płaszcz i zwora), między którymi nie zachodzi wymiana ciepła (rys. 3.5);
3. Moc cieplna wydzielająca się w uzwojeniu wirnika jest oddawana zarówno do zewnętrznej, jak i wewnętrznej części stojana;
4. Radiator odprowadza ciepło do otoczenia z wewnętrznej lub zewnętrznej części stojana, zależnie od przyjętej konstrukcji układu napędowego;
5. Każdy z 4 wyróżnionych zespołów można zamodelować jako ciało cieplne jednorodne.



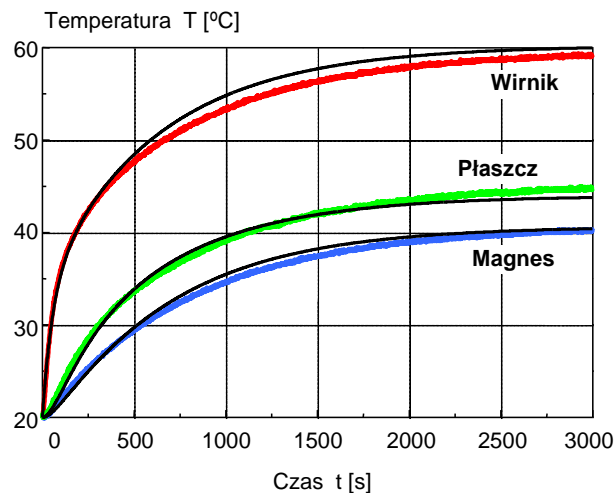
Rys. 3.5. Drogi przepływu ciepła w silniku przyjęte do modelowania

Model obwodowy zbudowany według powyższych założeń, w sytuacji gdy radiator styka się z tuleją stojana, przedstawiono w postaci zastępczego schematu na rys. 3.6. Zgodnie z tym opisem obliczanie ustalonych przyrostów temperatury silnika w radiatorze wymaga znajomości wartości pięciu oporów cieplnych, a analiza stanów nieustalonych dodatkowo znajomości czterech pojemności cieplnych wyróżnionych ciał.



Rys. 3.6. Model cieplnej struktury mikrosilnika prądu stałego z wirnikiem bezrdzeniowym zamocowanego do radiatora;  
 $C_m$  - pojemność cieplna magnesu,  $C_p$  - pojemność cieplna płaszczu,  $C_r$  - pojemność cieplna radiatora,  $C_w$  - pojemność cieplna wirnika,  $P_w$  - moc cieplna wydzielana w wirniku,  $R_{wm}$  - opór cieplny między wirnikiem i magnesem,  $R_{wp}$  - opór cieplny między wirnikiem i płaszczem,  $R_{so}$  - opór cieplny między stojanem i otoczeniem,  $R_{mr}$  - opór cieplny między magnesem i radiatorem,  $R_{ro}$  - opór cieplny między radiatorem i otoczeniem,  $T_w$  - temperatura wirnika,  $T_p$  - temperatura płaszczu,  $T_{ot}$  - temperatura otoczenia,  $T_r$  - temperatura radiatora

Dodatkowe badania wykazały bardzo dobrą zgodność wyników doświadczalnych z rezultatami symulacji komputerowej, uzyskiwanymi przy użyciu przedstawionego modelu czteroelementowego (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Zestawienie temperaturowych odpowiedzi silnika *PBM-40* z radiatorem zarejestrowanych w stanowisku badawczym z wynikami symulacji komputerowej (linie czarne); (skok mocy cieplnej wydzielającej się w wirniku  $P_w = 7,6 \text{ W}$ )

Radiatory, czyli zespoły konstrukcyjne służące do rozpraszania mocy cieplnej, z reguły charakteryzują się znacznymi rozkładami temperatury. Rozkłady te można badać numerycznie metodami polowymi, dzieląc objętość rozpatrywanego elementu na możliwie dużą, ale skończoną liczbę elementów.

### 3.1.3.1. Model obwodowy cieplnej struktury mikrosilnika

Matematyczny opis cieplnej struktury silnika prądu stałego z radiatorem dołączonym do czołowej powierzchni silnika składa się z czterech równań równowagi cieplnej:

- wirnika

$$C_w \frac{dT_w}{dt} + \frac{1}{R_{wp}}(T_w - T_p) + \frac{1}{R_{wm}}(T_w - T_m) = P_w, \quad (3.8)$$

- wewnętrznej części stojana („magnesu”)

$$C_m \frac{dT_m}{dt} + \frac{1}{R_{wm}}(T_m - T_w) + \frac{1}{R_{mr}}(T_m - T_r) = 0, \quad (3.9)$$

- zewnętrznej części stojana („płaszczka”)

$$C_p \frac{dT_p}{dt} + \frac{1}{R_{wp}}(T_p - T_w) + \frac{1}{R_{po}}(T_p - T_{ot}) = 0. \quad (3.10)$$

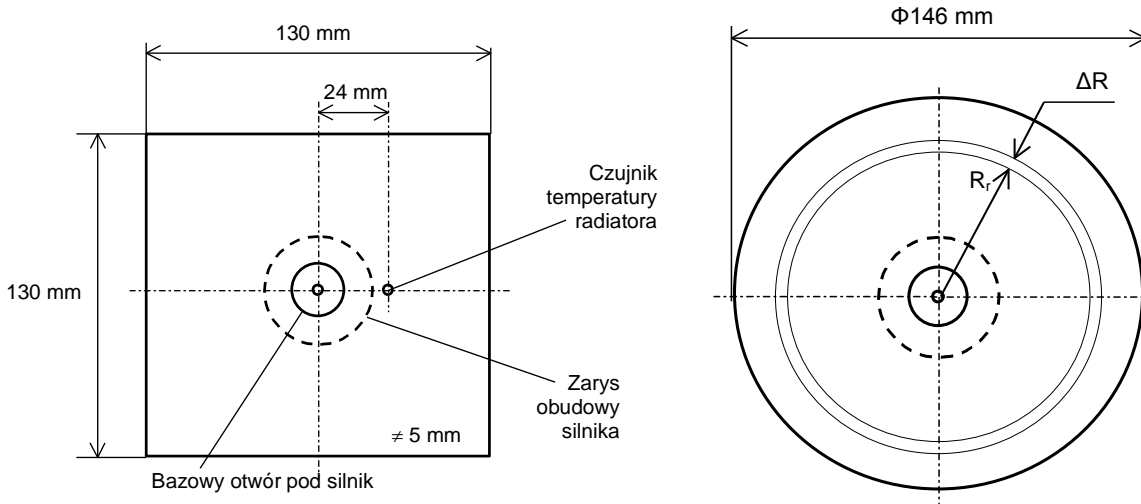
- radiatora

$$C_r \frac{dT_r}{dt} + \frac{1}{R_{ro}}(T_r - T_{ot}) + \frac{1}{R_{mr}}(T_r - T_m) = 0, \quad (3.11)$$

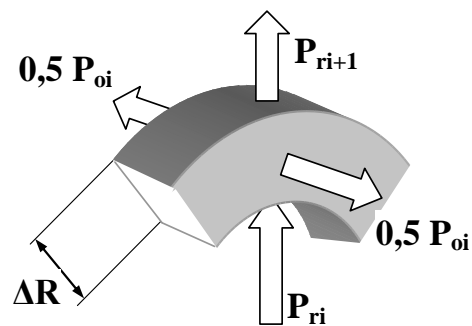
przy czym oznaczenia są zgodne z użytymi na rys. 3.6.

### 3.1.3.2. Polowy model radiatora

Jednoelementowy model radiatora można zastąpić modelem polowym. W celu uproszczenia obliczeń korzystne jest sprowadzenia tego modelu do obiektu jednowymiarowego. Dlatego kwadratowy radiator zastępuje się modelem okrągłej płyty z jedną współrzędną w postaci bieżącego promienia  $R_r$  (rys. 3.6). Grubość płyty przyjmuje się równą grubości radiatora, a jej średnicę oblicza tak, aby całkowita powierzchnia oddawania ciepła była równa powierzchni radiatora. Symulacyjny model radiatora składa się z  $n$  współosiowych warstw o jednakowej wysokości  $\Delta R$ . W obrębie każdej z nich zakłada się brak rozkładu temperatury. Transmisję ciepła między kolejnymi warstwami i oddawanie ciepła z bocznych powierzchni radiatora przedstawiono schematycznie na rys. 3.7.



Rys. 3.6. Radiator silnika *PBM-40* (a) i jego modelowy odpowiednik (b):  
 $R_r$  – bieżący promień radiatora,  $\Delta R$  – grubość warstwy



Rys. 3.7. Modelowanie zjawisk cieplnych w radiatorze  
 $P_{ri}$  – moc cieplna dopływająca do  $i$ -tej warstwy,  $P_{ri+1}$  – moc cieplna przekazywana do  $i+1$ -ej warstwy,  $P_{oi}$  – moc cieplna oddawana do otoczenia z  $i$ -tej warstwy,  $\Delta R$  – grubość warstwy

Równowagę cieplną warstwy opisuje równanie

$$P_{ri} = P_{ri+1} + P_{oi} + m_i c \frac{dT_i}{dt} \quad (3.12)$$

w którym:  $P_{ri}$  – moc cieplna doprowadzana z poprzedniej warstwy,  $P_{ri+1}$  – moc cieplna oddawana do następnej warstwy,  $m_i$  – masa warstwy,  $c$  – ciepło właściwe materiału radiatora,  $P_{oi}$  – moc cieplna oddawana do otoczenia,  $T_i$  – temperatura  $i$ -tej warstwy. Moc cieplna oddawana do otoczenia obliczana jest ze wzoru [3]

$$P_{oi} = \alpha S_i (T_i - T_{ot}) \quad (3.13)$$

przy czym:  $S_i$  – pole bocznej powierzchni warstwy,  $T_{ot}$  – temperatura otoczenia,  $\alpha$  – współczynnik oddawania ciepła.



Moc przekazywana do następnej warstwy wyrażona jest zależnością

$$P_{ri+1} = \frac{\lambda(T_i - T_{i+1})}{\Delta R} \cdot 2\pi R_i h, \quad (3.14)$$

gdzie:  $h$  – grubość radiatora,  $R_i$  – promień  $i$ -tej warstwy radiatora,  $\lambda$  - przewodność cieplna właściwa materiału radiatora.

### 3.1.4. Cel ćwiczenia

1. Praktyczne zapoznanie się z zasadami obwodowego modelowania zjawisk cieplnych w układach napędowych.
2. Poznanie prostej metody modelowania polowego na przykładzie radiatora silnika.

## 3.2. PRZEDMIOT ĆWICZENIA I POMOCE

### 3.2.1. Przedmiot ćwiczenia

Przedmiotem ćwiczenia jest matematyczny model cieplnej struktury silnika *PBM-40* [1] z radiatorem. Matematyczny opis cieplnej struktury silnika prądu stałego umożliwiający połączenie z modelem radiatora składa się z następujących równań:

- równowagi cieplnej wirnika

$$C_w \frac{dT_w}{dt} + \frac{I}{R_{wp}} (T_w - T_p) + \frac{I}{R_{wm}} (T_w - T_m) = P_w, \quad (3.15)$$

- równowagi cieplnej wewnętrznej części stojana („magnesu”)

$$C_m \frac{dT_m}{dt} + \frac{1}{R_{wm}} (T_m - T_w) + \frac{1}{R_{mr}} (T_m - T_l) = 0, \quad (3.16)$$

- równowagi cieplnej zewnętrznej części stojana („obudowy”)

$$C_p \frac{dT_p}{dt} + \frac{1}{R_{wp}} (T_p - T_w) + \frac{1}{R_{po}} (T_p - T_{ot}) = 0. \quad (3.17)$$

- mocy cieplnej oddawanej z magnesu do radiatora

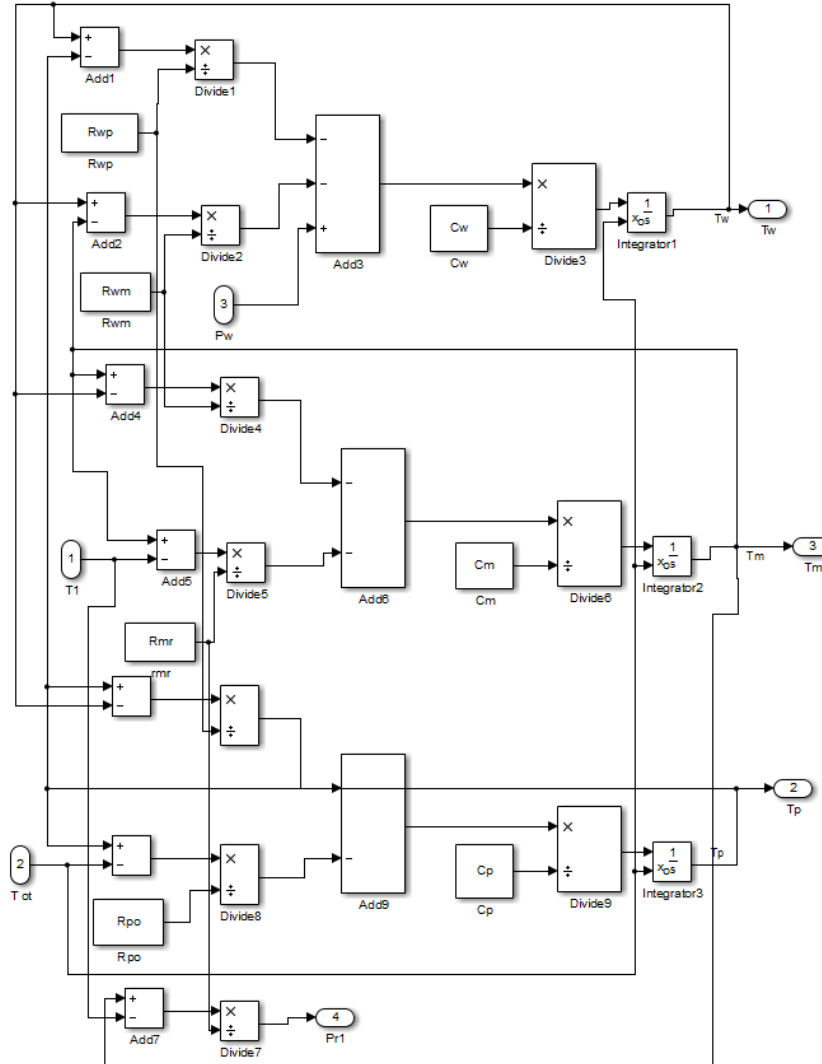
$$\frac{I}{R_{mr}} (T_m - T_l) = P_{rl}, \quad (3.18)$$

gdzie:  $P_{rl}$  – moc cieplna oddawana z magnesu do radiatora,  $T_l$  – temperatura radiatora w miejscu styku z silnikiem, a pozostałe oznaczenia są zgodne z użytymi na rys. 3.6.

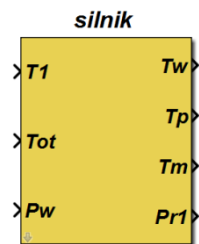
### 3.2.2. Symulacyjny model silnika

Symulacyjny model cieplnej struktury silnika opracowany w języku *Simulink* bazuje na równaniach (3.15) – (3.18). Schemat blokowy modelu przedstawiono na rys. 3.8. Wielkościami wejściowymi są:  $T_{ot}$  – temperatura otoczenia,  $T_l$  – temperatura radiatora w miejscu styku z silnikiem,  $P_w$  – moc cieplna wydzielana w wirniku. Wyjścia odpowiadają następują-

cym wielkościom:  $T_w$  - temperatura wirnika,  $T_p$  - temperatura płaszcza (obudowy),  $T_m$  - temperatura magnesu,  $P_{r1}$  - moc cieplna oddawana z magnesu do radiatora (rys. 3.9).



Rys. 3.8. Model symulacyjny cieplnej struktury silnika



Rys. 3.9. Widok ikony podsystemu cieplnej struktury silnika przygotowanego do dołączenia modelu radiatora

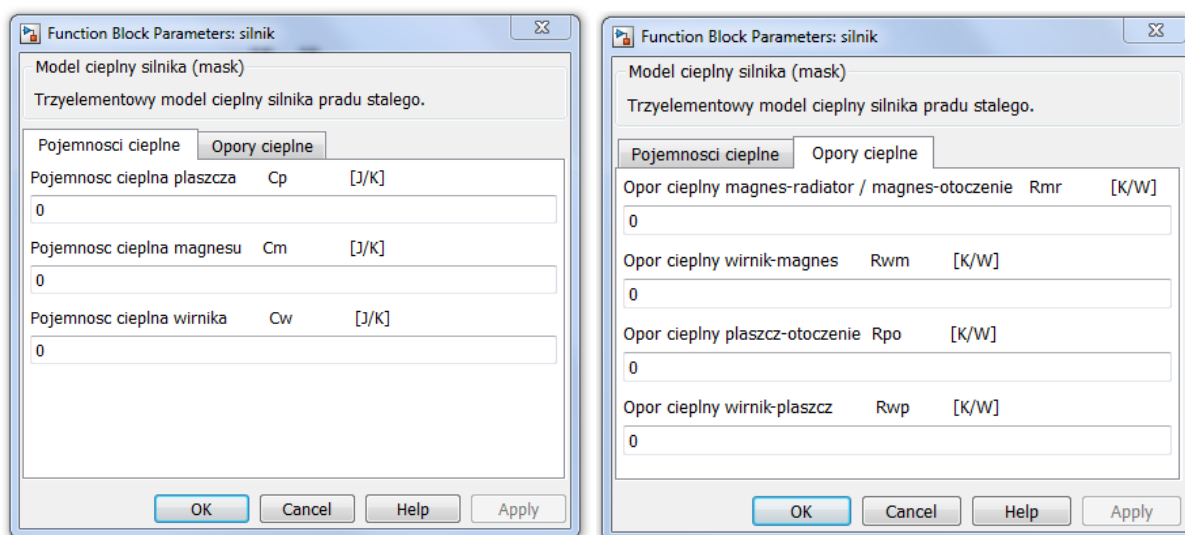
### 3.3. WYKONANIE ĆWICZENIA

#### 3.3.1. Opracowanie symulacyjnego modelu połowego radiatora

W języku *Simulink* opracować symulacyjny model cieplnej struktury radiatora zamocowanego do powierzchni czołowej silnika.

##### 3.3.1.1. Zamodelowanie silnika zawieszzonego w powietrzu

Wprowadzić do okna dialogowego modelu cieplnej struktury silnika (rys. 3.10) dane liczbowe zamieszczone w tabl. 3.1.



Rys. 3.10. Widok okien dialogowych zamaskowanego podsystemu cieplnej struktury silnika

Tabl. 3.1. Parametry trzyelementowego modelu silnika *PBM-40*

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Opór cieplny wirnik-łuszcz	$R_{wp}$	6	K/W
Opór cieplny wirnik-magnes	$R_{wm}$	4	K/W
Opór cieplny magnes-otoczenie	$R_{mr}$	24	K/W
Opór cieplny łuszcz-otoczenie	$R_{po}$	16	K/W
Pojemność cieplna wirnika	$C_w$	16,7	J/K
Pojemność cieplna łuszcz	$C_p$	47	J/K
Pojemność cieplna magnesu	$C_m$	80	J/K

Podstawić stałą wartość temperatury otoczenia

$$T_{ot} = 20^{\circ}\text{C}.$$

Tę samą temperaturę przyjmując jako początkową dla wszystkich modelowanych elementów.

Do modelu silnika doprowadzić sygnał mocy cieplnej

$$P_w = 6,2 \text{ W}.$$

Przyjmując wartość temperatury

$$T_1 = T_{ot}. \quad (3.19)$$

Zarejestrować temperaturowe odpowiedzi elementów silnika na skok mocy cieplnej w oknie czasowym o szerokości 3000 s. Wizualnie porównać uzyskane wyniki z odpowiedziami zamieszczonymi na rys. 3.4a.

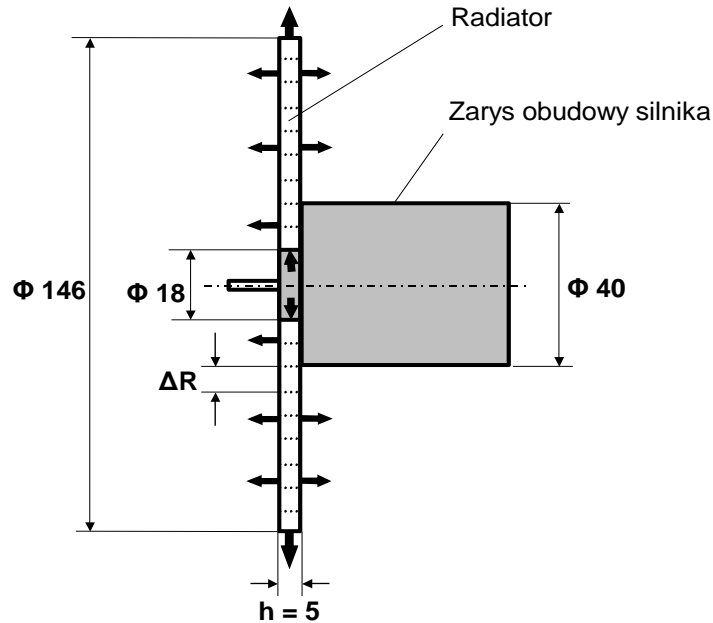
### 3.3.1.2. Zamodelowanie radiatora

Opracować w języku *Simulink* model radiatora jako zbiór współosiowych pierścieni (warstw) o jednakowej wysokości  $\Delta R$  (rys. 3.11). W tym celu należy zbudować podsystem reprezentujący warstwę radiatora zgodnie z równaniem równowagi cieplnej (3.12). W podsystemie utworzyć następujące wejścia:  $P_{ri}$ ,  $T_{i+1}$ ,  $T_{ot}$  i następujące wyjścia:  $P_{ri+1}$ ,  $T_i$ . W oknie dialogowym zamaskowanego bloku należy umożliwić wprowadzanie parametrów zamieszczonych w tabl. 3.2.

Tabl. 3.2. Parametry warstwy radiatora

Parametr	Symbol	Jednostka
Wewnętrzny promień warstwy	$R_i$	mm
Wysokość warstwy	$\Delta R$	mm
Grubość radiatora	$h$	mm
Gęstość materiału radiatora	$\rho$	$\text{g/mm}^3$
Współczynnik przewodności cieplnej	$\lambda$	$\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$
Współczynnik oddawania ciepła do powietrza	$\alpha$	$\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$
Ciepło właściwe	$c$	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{g})$

W strukturze radiatora wyodrębnić nie mniej niż 5 warstw. W celu uproszczenia opisu przyjmując, że moc cieplna z wewnętrznej części stojana (magnesu) wpływa tylko do pierwszej warstwy modelu radiatora. Dla warstwy stykającej się z silnikiem założyć tylko jednostronne oddawanie ciepła do otaczającego powietrza. Przy warstwie ostatniej uwzględnić oddawanie ciepła do otoczenia przez obie warstwy boczne, a także przez zewnętrzną powierzchnię walcową, zamiast przewodzenia do następnej warstwy (konieczność zerowania składnika  $P_{ri+1}$ ).



Rys. 3.11. Modelowanie radiatora

W programie wykorzystać wartości współczynników cieplnych duraluminiowego radiatora zamieszczone w tabl. 3.3.

Tabl. 3.3. Parametry materiału radiatora

Parametr	Symbol	Wartość	Jednostka
Współczynnik oddawania ciepła z aluminium do powietrza	$\alpha$	$15 \cdot 10^{-6}$	W/(mm <sup>2</sup> ·K)
Współczynnik przewodności cieplnej duraluminium	$\lambda$	0,164	W/(mm·K)
Ciepło właściwe duraluminium	$c$	0,88	J/(K·g)
Gęstość duraluminium	$\rho_{Al}$	$2,75 \cdot 10^{-3}$	g/mm <sup>3</sup>

W modelu cieplnej struktury silnika wartość wcześniej przyjętego oporu cieplnego magnes-otoczenie zastąpić oporem cieplnym magnes-radiator wynoszącym

$$R_{mr} = 1,5 \text{ K/W.}$$

### 3.3.2. Wyznaczenie ustalonego rozkładu temperatury w radiatorze

Do modelu silnika doprowadzić sygnał mocy cieplnej  $P_w$  o wartości podanej przez prowadzącego. Wyznaczyć ustalone temperatury wszystkich warstw radiatora. Uzyskany w ten sposób rozkład temperatury przedstawić w postaci wykresu

$$T_r = f(R),$$

stosując ciągłą aproksymację zależności.

### 3.4. SPRAWOZDANIE Z ĆWICZENIA

W sprawozdaniu z ćwiczenia należy zamieścić:

- a) symulacyjny model układu, w szczególności schematy modeli warstw: dwu skrajnych i wybranej wewnętrznej (p. 3.3.1.2),
- b) widok okna dialogowego wybranej warstwy radiatora z wpisanymi wartościami parametrów (p. 3.3.1.2)
- c) odpowiedzi temperaturowe silnika bez radiatora (p. 3.3.1.1) oraz układu z polem modelem radiatora (p. 3.3.1.2),
- d) wyniki analizy symulacyjnej – rozkład temperatury radiatora (p. 3.3.2).

### 3.5. LITERATURA

1. Długiewicz L.: *Magnetoelektryczny silnik bezrdzeniowy typu PBM-40*. Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 130, str.11-18. Warszawa 1984
2. Gajda J., Szyper M.: *Modelowanie i badania symulacyjne systemów pomiarowych*. Wyd. Wyd. Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki AGH. Kraków 1998
3. Jucker E.: *Physical Properties of Small DC Motors Using an Ironless Rotor*. Portescap, La Chaux-de-Fonds. Switzerland, 1974
4. Kenio T., Nagamori C.: *Dvigateli postojannogo toka s postojannymi magnitami*. Énergoatomizdat. Moskva 1989
5. Pełczewski W.: *Zagadnienia cieplne w maszynach elektrycznych*. PWT. Warszawa 1956
6. Puternicki P.: *Silniki komutatorowe małej mocy. Analiza i optymalna synteza konstrukcji*. Wydawnictwo Książkowe Instytutu Elektrotechniki. Warszawa 2000
7. Wierciak J., Tański T.: *Wyznaczanie cieplnych parametrów mikrosilnika prądu stałego*. Międzynarodowe XI Sympozjum „Mikromaszyny i Serwonapędy”, Malbork, 14-18 września 1998, t. I, s. 90-97
8. Wierciak J.: *Identyfikacja cieplnych parametrów mikrosilnika elektrycznego w radiatorze*. XI Sympozjum „Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych”. Krynica 17-21 września 2001, s. 109-112
9. API Portescap. *Miniature High Performance Motors & Peripheral Components for Motion Solutions*. Katalog 1999
10. MAXON. *Der führende Hersteller hochpräziser Antriebe und Systeme*. Katalog 2000