Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

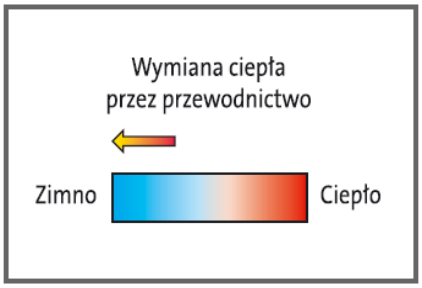
I Wstęp.

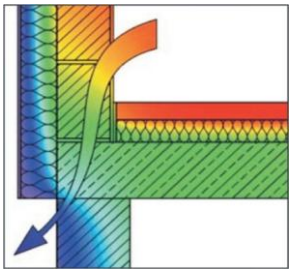
Przekazywanie ciepła jest przekazem energii cieplnej z jednego obszaru do innego wskutek różnicy temperatur.

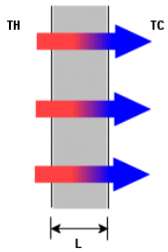
II Rodzaje przekazywania ciepła

Trzy rodzaje przekazywania ciepła:

1. **Przewodnictwo** to przekazywanie ciepła wskutek ruchu cząsteczkowego w materiale bez wykonywania ruchu przez cały materiał. Przewodnictwo jest głównym rodzajem przekazywania ciepła w ciałach stałych.
   Jeżeli temperatura ciała stałego różni się w różnych jego punktach, wówczas ciepło przechodzi z punktów o wyższych temperaturach do punktów o temperaturach niższych w celu ustalenia równowagi cieplnej.







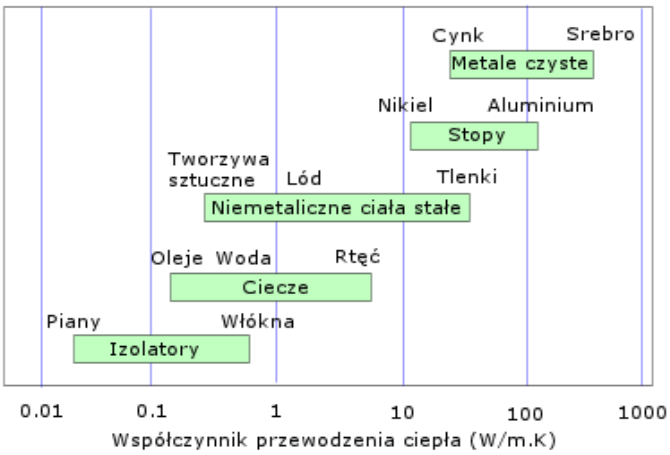
Przenoszenie ciepła przez przewodnictwo zachodzi zgodnie z prawem *Fouriera*, które stwierdza, że natężenie przewodzenia ciepła $Q_{przew.}$ jest proporcjonalne do powierzchni przekazywania ciepła A i gradientu temperatury (dT/dx) lub:

$$Q_{przew.} = - K A (dT/dx)$$

gdzie K, współczynnik przewodzenia ciepła, stanowi miarę zdolności materiału do przewodzenia ciepła. Jednostką K jest W/m^oC.
Dla ukazanej niżej warstwy planarnej, natężenie przewodzenia ciepła jest dane wzorem

$$Q_{przew.} = - K A (T_H - T_C)/L$$

Zakres wartości współczynnika przewodzenia ciepła dla cieczy, niemetalicznych ciał stałych i czystych metali przy normalnej temperaturze i ciśnieniu.



Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

Zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury (K)

Dla większości materiałów K zmienia się wraz z temperaturą.

Wrasta ze wzrostem temperatury w gazach pod niskim ciśnieniem, lecz może **wzrastać lub spadać** w metalach lub cieczach.

Poniższa tabela wyszczególnia współczynniki przewodzenia ciepła (W/(m*K) względem temperatury /^{o}K) dla wybranych materiałów:

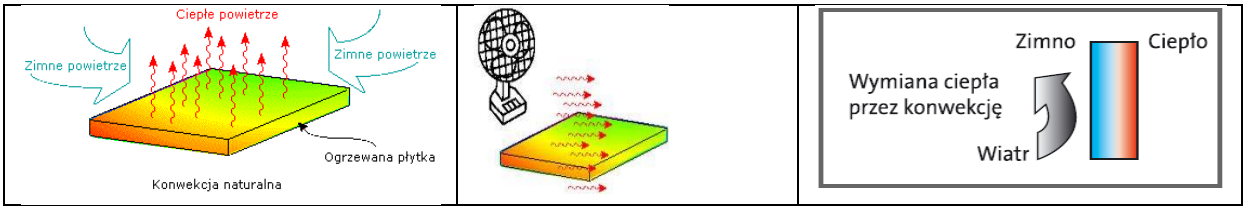
Metal	**Temperatura (^{o}K)**							
	103	**173**	**273**	**373**	**473**	**573**	**673**	**873**
Stal nierdzewna				15	17	19	21	25
Ołów	40	37	36	34	33	32	17 (ciecz)	20 (ciecz)
Platyna	78	73	72	72	72	73	74	77
Cynk	124	122	122	117	110	106	100	60 (ciecz)
Krzem	856	342	168	112	82	66	54	38

Współczynniki przewodności

Podane współczynniki przewodności cieplnej obowiązują dla stanu powietrzno-suchego: temperatura 20 °C i wilgotność względna RH=50%.

materiał	**przewodność cieplna W/(m·K)**
grafen	4840–5300
diament	900–2320
srebro	429
miedź	370; 375; 397; 400
złoto	317
stopy aluminium	200
nikiel	90,7
stal	58
żelbet	1,7
cegła	0,8
woda	0,6
gips	0,51
drewno	0,2
wełna szklana	0,040
wełna skalna	0,037
celuloza	0,039
styropian EPS	0,036
polistyren ekstrudowany XPS	0,035
pianka poliuretanowa bez szczelnej osłony	0,035
pianka poliuretanowa w szczelnej osłonie	0,025
powietrze (nieruchome)	0,025

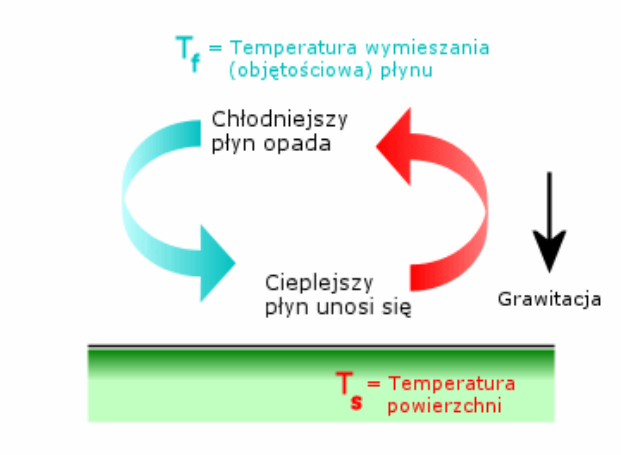
2. **Konwekcja** to przekazywanie ciepła **za pośrednictwem poruszających się płynów**. Konwekcja jest głównym rodzajem przekazywania ciepła pomiędzy ciałami stałymi a przylegającymi cieczami. Cząstki płynu działają jako nośniki energii cieplne



Konwekcja jest głównym rodzajem przekazywania, w którym ciepło jest przekazywane pomiędzy ścianą ciała stałego, a przyległym, poruszającym się płynem (lub gazem). Konwekcja posiada dwa elementy:

- Przekazywanie energii w wyniku losowych ruchów cząsteczek (**dyfuzja**) oraz
- Przekazywanie energii w wyniku masowego lub makroskopowego ruchu płynu (**adwekcja**).

Mechanizm konwekcji można objaśnić następująco: gdy warstwa płynu przyległa do gorącej powierzchni nagrzewa się, jej gęstość spada (przy stałym ciśnieniu gęstość jest odwrotnie proporcjonalna do temperatury) i zaczyna na nią działać siłą wyporu. Chłodniejszy (cięższy) płyn w pobliżu powierzchni zastępuje płyn cieplejszy i powstaje ruch cyrkulacyjny



Natężenie wymiany ciepła pomiędzy płynem o temperaturze T_f i ścianą ciała stałego o powierzchni A i temperaturze T_s jest zgodne z prawem chłodzenia Newtona, które można zapisać jako:

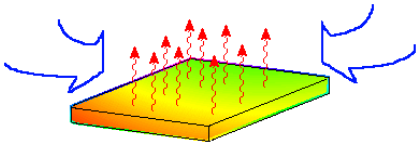
$$Q_{konw.} = h\,A\,(T_s - T_f)$$

gdzie h jest **współczynnikiem przekazywania ciepła przez konwekcję**. Jednostką h jest W/m^2K.

Współczynnik przekazywania ciepła przez konwekcję (h) zależny jest od ruchu płynu, geometrii oraz własności termodynamicznych i fizycznych.

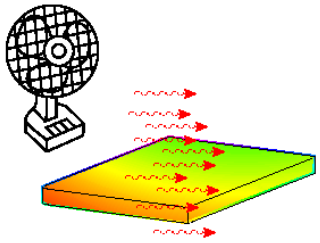
Generalnie występują dwa typy przekazywania ciepła przez konwekcję:

Konwekcja naturalna (swobodna)



Ruch płynu przyległego do ściany ciała stałego jest wywoływany przez siły wyporu powodowane zmianami gęstości płynu w wyniku różnicy temperatur pomiędzy ciałem stałym, a płynem. Gdy gorąca płyta będzie pozostawiona do ostygnięcia w powietrzu, cząstki powietrza przyległe do ściany płyty nagrzewają się, ich gęstość maleje i dlatego poruszają się do góry.

Konwekcja wymuszona

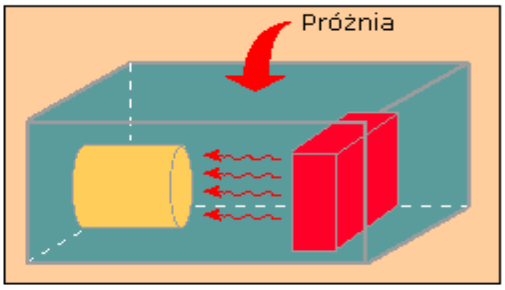


Stosowane są zewnętrzne środki (np. wentylator lub pompa) do przyspieszenia przepływu płynu na ścianie ciała stałego. Szybki ruch cząstek płynu na ścianie ciała stałego maksymalizuje gradient temperatury i zwiększa natężenie wymiany ciepła. Wymuszenie przepływu powietrza nad gorącą płytą ukazano na poniższym rysunku.

Zakresy wartości współczynników przejmowania ciepła w $\frac{W}{m^2 \cdot K}$

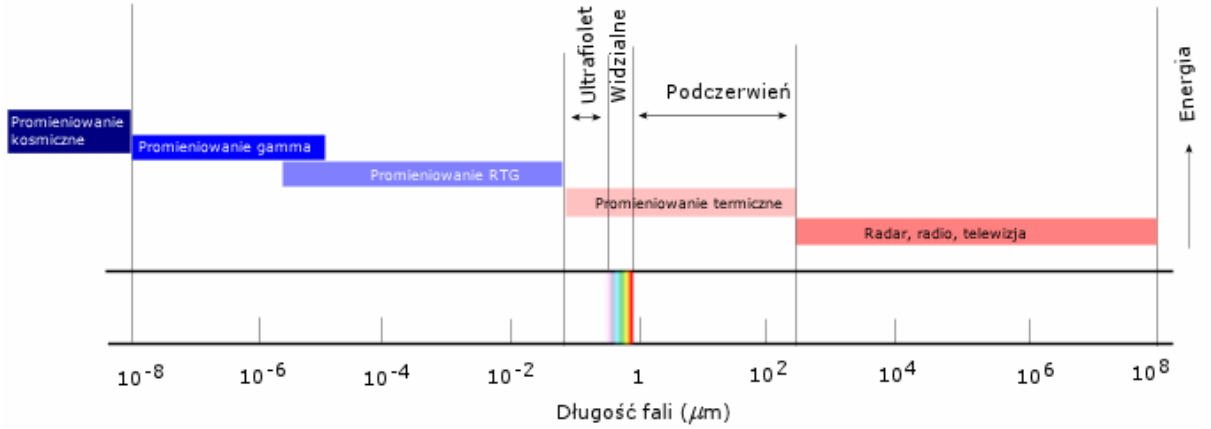
Rodzaj płynu	Konwekcja swobodna	Konwekcja wymuszona
Gaz	5 – 30	30 – 500
Woda	30 – 300	300 – $2 \cdot 10^4$
Olej	5 – 100	30 – 3000
Ciekłe metale	50 – 500	500 – $2 \cdot 10^4$
Wrząca woda	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$ – 10^5
Kondensacja pary wodnej	$3 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^5$

3. **Promieniowanie** to przekazywanie ciepła za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. W przeciwieństwie do przewodnictwa i konwekcji, promieniowanie nie wymaga medium, ponieważ fale elektromagnetyczne mogą poruszać się w próżni. Zjawisko promieniowania ma większe znaczenie przy wyższych temperaturach



Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

Promieniowanie termiczne to energia termiczna emitowana przez obiekty w *postaci fal elektromagnetycznych*, ze względu na ich temperaturę.
Wszystkie obiekty o temperaturach powyżej zera bezwzględnego emitują energię termiczną. Ponieważ fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni, dla zachodzenia promieniowania ***nie jest wymagana obecność ośrodka***.
Poniższy rysunek ukazuje zakres długości fal promieniowania termicznego w porównaniu z promieniowaniem emitowanych w inny sposób (promieniowanie RTG, promieniowanie g, promieniowanie kosmiczne itp.).



W celu poprawnego zamodelowania układu należy przeanalizować podstawowe definicje z zakresu tematyki
- definicje dotyczące promieniowania
- Prawo Stefana-Boltzmanna
- emisja promieniowania z powierzchni rzeczywistych
- wymiana promieniowania pomiędzy powierzchniami
- współczynniki konfiguracji promieniowania

III. Typy przekazywania ciepła

Dwa typy analizy przekazywania ciepła:

Analiza termiczna stanu <u>ustalonego</u> - koncentruje się na stanie cieplnym ciała, gdy osiągnie ono stan równowagi cieplnej. Czas potrzebny do osiągnięcia równowagi cieplnej nie ma znaczenia. $\Delta t = \infty$

Analiza termiczna stanu <u>nieustalonego</u> - koncentruje się na stanie cieplnym ciała w różnych chwilach czasowych. $t_2 - t_1 = \Delta t$

Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

IV. Analiza naprężeń cieplnych

Zmiany temperatury mogą wywoływać znaczne naprężenia w obiekcie.
Analiza naprężeń cieplnych oblicza naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia wywołane zjawiskami cieplnymi.

Rozszerzalność temperaturowa, inaczej **rozszerzalność cieplna**, to zjawisko fizyczne polegające na zmianie rozmiarów liniowych lub objętości ciała pod wpływem zmiany temperatury. Uwzględnianie efektów rozszerzalności temperaturowej, przede wszystkim, ciał stałych jest od dawna stosowaną praktyką, zapobiegającą tworzeniu się różnego rodzaju odkształceń, czy też zbyt silnych naprężeń mogących spowodować znaczne uszkodzenie czy nawet zniszczenie np. obiektów budowlanych.

Rozszerzalność liniowa
Jeżeli wraz ze zmianą temperatury wydłużeniu lub skróceniu ulega tylko jeden z liniowych rozmiarów ciała stałego (np. długość) mówimy wówczas o zjawisku **rozszerzalności liniowej**. Aby obliczyć zmianę wydłużenia np. metalowego pręta, o długości L_0, wskutek zmiany jego temperatury, będziemy korzystać z poniższego wzoru:

$$L = L_0[1 + \alpha(T_1 - T_0)]$$

gdzie L to długość pręta w temperaturze T_1 (długość pręta po zmianie temperatury), L_0 - długość pręta w temperaturze T_0 (początkowa długość pręta), z kolei α - **współczynnik rozszerzalności liniowej** informujący o jaką wartość w jednostce długości zmieni się rozmiar ciała przy zmianie jego temperatury o jeden stopień. Jednostką współczynnika rozszerzalności liniowej α jest odwrotność jednostki temperatury w układzie SI tj. 1/K, jednakże ze względu na fakt, że jednemu stopniowi w skali Kelvina odpowiada jeden stopień w skali Celsjusza, wartość tego współczynnika może być także wyrażana w jednostce $1/^{o}C$.

Chociaż wartość współczynnika α ulega nieznacznym zmianom w funkcji temperatury, powyższy wzór pozwala jednak z dobrym przybliżeniem obliczać zmianę wymiarów izotropowego ciała stałego, czyli ciała, którego każdy wymiar ulega jednakowej zmianie w każdym z trzech kierunków przestrzennych.

W poniższej tabeli podano wartości współczynnika rozszerzalności liniowej α dla wybranych substancji (wartości α podano, za wyjątkiem lodu, dla temperatury pokojowej):

Substancja	**α (10^{-6}/K)**
Wosk	1460
Asfalt	190
Polichlorek winylu	100
Kauczuk	77
Lód (0 ^{o}C)	49
Ołów	29
Gips	25
Aluminium	23
Cyna	22
Srebro	20

Substancja	**α (10^{-6}/K)**
Miedź	16
Złoto	14
Stal	12
Beton	12
Papier	10
Szkło kwarcowe	4,5
Inwar	1,5
Diament	1,2

Rozszerzalność objętościowa

W przypadku, gdy wraz ze wzrostem temperatury zmianie ulega nie jeden a wszystkie wymiary ciała stałego (a więc w konsekwencji jego objętość), mówimy wówczas o **rozszerzalności objętościowej**. Zjawisko to, w przeciwieństwie do zjawiska rozszerzalności liniowej, dotyczy również cieczy oraz gazów, których zmiany objętości jesteśmy w stanie oczywiście mierzyć. Zmianę objętości ciał stałych oraz cieczy, spowodowaną zmianą temperatury, opisuje poniższe wyrażenie:

$$V = V_0[1 + \beta(T_1 - T_0)]$$

gdzie V to objętość ciała stałego/cieczy w temperaturze T_1 (objętość po zmianie temperatury), V_0 - objętość ciała stałego/cieczy w temperaturze T_0 (objętość początkowa), z kolei β - **współczynnik rozszerzalności objętościowej**, którego jednostką, podobnie jak i współczynnika α, jest 1/K (opcjonalnie 1/^{o}C). Współczynnik β informuje o ile zwiększa się objętość ciała po zwiększeniu jego temperatury o jeden stopień.

Ponieważ objętość V gazów, oprócz temperatury T, zależy także od ciśnienia p, dlatego też powyższy wzór nie znajduje zastosowania w przypadku gazów. Zamiast niego korzysta się z empirycznego równania **Gay-Lussaca**.
Dla izotropowych ciał stałych pomiędzy współczynnikiem β a współczynnikiem α zachodzi poniższa zależność

$$\beta = 3\alpha$$

W poniższej tabeli podano wartości współczynnika rozszerzalności objętościowej β dla wybranych substancji (wartości β podano dla temperatury pokojowej):

Substancja	**β (10^{-5}/K)**
Alkohol etylowy	110
Gliceryna	50
Woda	21
Rtęć	18
Miedź	5
Żelazo	3,6
Diament	0,4

Zgodnie z wyrażeniem $V = V_0 [1 + \beta (T_1 - T_0)]$, gdy $T_1 > T_0$ objętość ciała ulega wzrostowi - takie zachowanie obserwuje się u większości cieczy. Odstępstwo od tej zależności wykazuje woda, której objętość począwszy od temperatury 4 ^{o}C wzrasta wprawdzie wraz ze wzrostem temperatury, jednak w zakresie temperatur od 0 do 4 ^{o}C - objętość wody maleje. Konsekwencją tego faktu jest zamarzanie zbiorników wodnych od powierzchni ku dnu wody, zamiast od dna ku jej powierzchni, dzięki czemu w zbiornikach wodnych może istnieć życie.

Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

V Analiza termiczna oblicza rozkład temperatury w obiekcie w wyniku działania wszystkich tych mechanizmów lub niektórych z nich.
We wszystkich trzech mechanizmach energia cieplna przepływa od ośrodka o wyższej temperaturze do ośrodka o niższej temperaturze.
Przekazywanie ciepła przez przewodzenie i konwekcję wymaga obecności ośrodka pośredniczącego, w przeciwieństwie do przekazywania ciepła przez promieniowanie.
Symulowanie efektów wpływu temperatury umożliwia analizy stanów ustalonych i przejściowych wymian ciepła.
Badania termiczne obliczają temperatury, gradienty temperatur oraz przepływ ciepła na podstawie warunków wytwarzania ciepła, przewodzenia, konwekcji i promieniowania cieplnego.

Analiza termiczna pomaga uniknąć niepożądanych warunków cieplnych doprowadzających do przegrzania czy stopienia.

Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

Przebieg ćwiczenia – SolidWorks Simulation

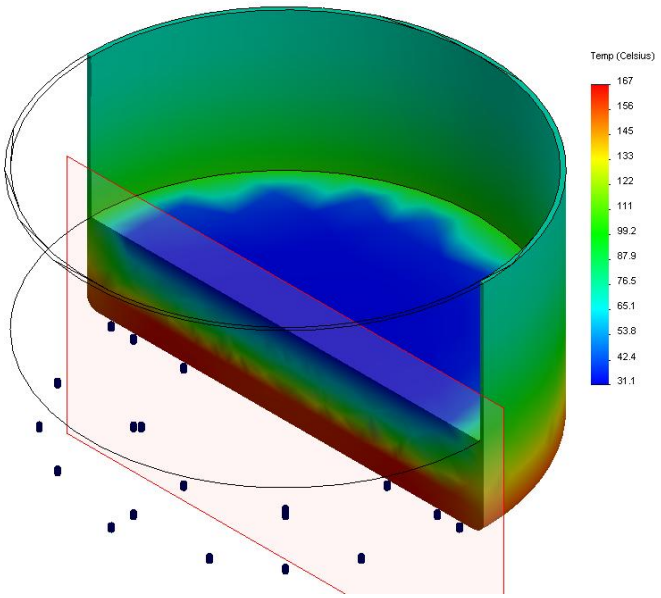
Aby wykonać analizę termiczną, należy:

1. Utworzyć badanie termiczne.
2. Zdefiniować **Właściwości** badania, aby ustawić typ badania (stan nieustalony lub ustalony), interakcję z SolidWorks Flow Simulation i solver.
3. Zdefiniować **materiał** dla każdej bryły i skorupy.
4. Zdefiniować umocowania i obciążenia termiczne. Można zdefiniować: **temperatury**, **konwekcję**, **strumień cieplny**, **moc cieplną** oraz **promieniowanie**.
   Można zadać temperatury na ścianach, krawędziach i wierzchołkach.
   Energia termiczna jest określana jako strumień cieplny lub moc cieplna.
   Konwekcja i promieniowanie są stosowane jako warunki brzegowe. Podczas określania konwekcji, należy wprowadzić współczynnik konwekcji oraz temperaturę płynu lub gazu otoczenia. Podobnie w przypadku promieniowania, należy określić współczynnik emisji oraz temperaturę otoczenia. Stała Stefana-Boltzmanna jest definiowana automatycznie.
5. W złożeniach i częściach wielo-obiektowych należy zdefiniować prawidłowe ustawienia kontaktowe. Warunki kontaktu wpływają na przepływ ciepła przez obszary kontaktu.
6. Utworzyć siatkę modelu i uruchomić badanie.
7. Przejrzeć wyniki

Zadanie

Naczynie na kuchence

- temp. początkowa 23 stop.C
- moc palnika 2000 W
- materiał Garnka – miedz
- naczynie wypełnione wodą
- analiza stanu ustalonego
- Analiza stanu nieustalonego – podgrzewanie przez 20 min (1200 sek.)
- konwekcja 90 W/(m^2*K)



Zad.2

Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

Motocykl

masa 140 kg
prędkość 80 km/h
hamowanie do 0 km/h – 3s
temp. Otoczenia 23 stop C.

Energia kinetyczna = Energia Cieplna na układzie hamulcowym
Pominąć: energię potencjalną zawieszenia, energię cieplną opon i podłoża, energię kinetyczną ruchu obrotowego kół.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Ek = 1/2 * mv^2, gdzie;
Ek - energia kinetyczna ciała,
m - masa ciała,
v - prędkość,z jaką porusza się ciało.
[m] = 1 kg oraz [v] = 1 m/s, więc:
[Ek] = [m] * [v^2] = 1 kg *1 m2/s2 = 1 kg *1m/s2 *1m = 1 N *1 m = 1 J (dżul)
Energia to skalarna wielkość fizyczna charakteryzująca stan układu fizycznego (materii) jako jego zdolność do wykonania pracy.
Jednostką energii jest **dżul** – jednostka pracy, energii oraz ciepła w układzie SI, oznaczana J. Jeden dżul to praca wykonana przez siłę o wartości 1 N przy przesunięciu punktu przyłożenia siły o 1 m w kierunku równoległym do kierunku działania siły.
1 J = 2.78e-7 kWh
1 kWh = 3,6e6 J
[J] = [m^2* kg * s^{-2}]

Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych – laboratorium
Modelowanie układów termo kinetycznych 2 godz.
Modelowanie układów termodynamicznych 2 godz.

Dr hab. Inż. Piotr Pawełko

Dżul – jednostka pracy, energii oraz ciepła w układzie SI, oznaczana **J**.

Jeden dżul to praca wykonana przez siłę o wartości 1 N przy przesunięciu punktu przyłożenia siły o 1 m w kierunku równoległym do kierunku działania siły.

1 J = 1 N · m

Związek z mocą:

1 J = 1 W · s

Nazwa *dżul* pochodzi od nazwiska angielskiego fizyka Jamesa Joule'a.

Przeliczenie 1 dżula na inne jednostki pracy, energii i ciepła:

- kaloria (cal), 1 J = 0,238846 cal,
- erg, 1 J = 10^7 erg,
- elektronowolt (eV), 1 J = $0{,}62415\times10^{19}$ eV,
- kilogramometr (kGm), 1 J = 0,10197 kGm,
- kilowatogodzina (kWh), 1 J = 1/3600000 kWh ≈ $0{,}278\times10^{-6}$ kWh.

Jednostką momentu siły jest N · m. Iloczyn niutona i metra to w układzie SI dżul, jednak – aby nie wprowadzać nieporozumień – jednostkę momentu siły nazwano niutonometrem (**N · m**) i nie zastępuje się jej dżulem.

Problem ten wiąże się z tym, że praca definiowana jest jako iloczyn skalarny siły i przemieszczenia, natomiast moment siły to iloczyn wektorowy siły i ramienia.