

**MICHAŁ FRYDRYSIAK**

**Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów  
Politechnika Łódzka**

## **SYMULACJA I MODELOWANIE TEKSTRONICZNEJ ODZIEŻY GRZEWCZEJ**

Promotor: **prof. dr hab. inż. Krzysztof Gniotek**

Recenzenci: **prof. dr hab. n. med. Jan Błaszczyk**  
**prof. dr hab. inż. Tadeusz Skubis**  
**prof. dr hab. Iwona Frydrych**

*Poniższe opracowanie jest streszczeniem interdyscyplinarnej pracy doktorskiej pt. Modelowanie i symulacja tekstronicznych układów automatycznej regulacji temperatury, postawiono hipotezę o tym, że: istnieje możliwość automatycznej regulacji temperatury w warstwie pododzieżowej za pomocą Tekstronicznych Układów Automatycznej Regulacji Temperatury (TUART). Celem pracy jest modelowanie TUART w programie Matlab Simulink oraz stworzenie na tej podstawie ubioru, który mógłby zmieniać temperaturę w swoim wnętrzu i utrzymywać ją na optymalnym poziomie. Model jak i wyrób odzieżowy składa się z kilku elementów składowych, takich jak: człon pomiarowy, człon wykonawczy (grzejnik wraz z regulatorem) oraz człon odzieżowy (koszulka). Każdy z wymienionych elementów składowych, TUART został zamodelowany, wykonany oraz przebadany w celu zaprojektowania najbardziej optymalnej konstrukcji tekstronicznej koszulki.*

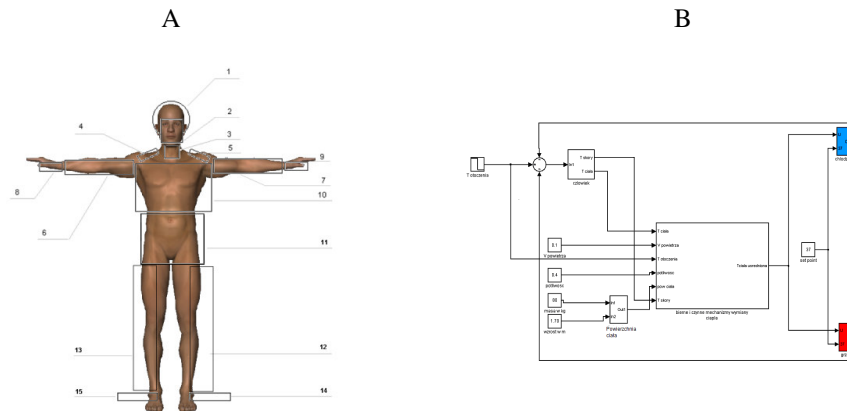
### **1. WSTĘP**

W dzisiejszych czasach tekstyliom użytkowym stawiane są coraz to większe wymagania. Rodzaj materiału, z jakiego jest wykonany, krój, dobór kolorystyki wszystko to wpływa na jakość i atrakcyjność wyrobów odzieżowych. Współczesne ubiory prócz tradycyjnych funkcji, takich jak ochrona przed zimnem, funkcje ozdobne, muszą pełnić dodatkowo funkcje zabezpieczenia użytkownika przed niebezpiecznymi czynnikami środowiska zewnętrznego np. ochrona przed płomieniem w kombinezonach strażackich, czy odzież odprowadzająca ładunki elek-

trostatyczne itd. Powstają produkty nowej generacji, które zawierają w swoich strukturach elementy elektroniczne. Badaniem tego typu wyrobów zajmuje się Tekstronika [1]. Dodając do odzieży nową funkcję, prócz funkcjonalności i estetyki, np. interaktywną adaptację na bodźce zewnętrzne, powoduje się powstanie trójwymiarowego tekstylnego interfejsu odzieżowego. Mimo dodatkowych nowych funkcji, wyroby tekstroniczne, a w szczególności wyroby posiadające Tekstroniczne Układy Automatemycznej Regulacji Temperatury – TUART, powinny charakteryzować się niezmiennym komfortem użytkowym. Decydujący wpływ na to, mają właściwości ciepłochronne. Istota tych właściwości wynika z faktu, że tekstroniczne układy regulacji temperatury wspomagają układ termoregulacyjny organizmu ludzkiego tak, aby w różnych warunkach klimatycznych i przy zmiennym wysiłku fizycznym użytkownika odzieży tekstronicznej, zapewnić mu odpowiedni komfort fizjologiczny. Zastosowanie tego typów wyrobów może mieć miejsce wszędzie tam, gdzie występuje gwałtowna zmiana temperatury otoczenia, spowodowana np. przejściem z pomieszczenia ciepłego do zimnego. Z przeprowadzonych analiz wyselekcjonowano kilka grup zawodowych, w których taka zmiana występuje, a mianowicie np. pracownicy chłodni, pracownicy budowlani w tym przede wszystkim operatorzy mechanicznych urządzeń budowlanych np. koparek, czy żołnierze będący na warcie w stróżówkach.

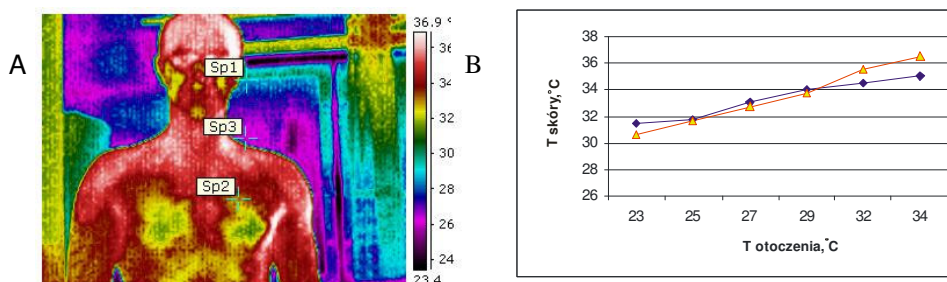
## 2. MODEL MECHANIZMÓW TERMOREGULACYJNYCH CZŁOWIEKA

W celu kompleksowego podejścia do projektowania modeli TUAR należy w pierwszej kolejności zaprojektować model homeostazy, czyli model zmian temperatury skóry w różnych warunkach środowiskowych. Model ten został stworzony na podstawie koncepcji dwufazowej, wzorowanym na modelu stworzonym przez Fiałę, 1991 [2]. Teoria ta zakłada rozłożenie temperatur: we wnętrzu ciała i na zewnątrz (skóra). Stworzony model zawiera równania opisujące bierne mechanizmy i czynny mechanizm wymiany ciepła. Na rysunku 1A, przedstawiono schemat podziału ciała człowieka na 15 segmentów. Poszczególne części ciała, uproszczono i przyrównano do prostych brył geometrycznych, w celu prowadzenia jak najbardziej dokładnych obliczeń. Postać ogólną modelu przedstawia rysunek 1B, gdzie sprzężenie zwrotne odwzorowuje behawioralne zachowania człowieka, zastępując takie reakcje człowieka na zmiany temperatury, jak: zmiana intensywności przepływu krwi czy dreszcze. Dlatego w model ten, wbudowano dwie pętle sprzężenia zwrotnego, chłodzenie i grzanie, które są częścią mechanizmu homeostazy.



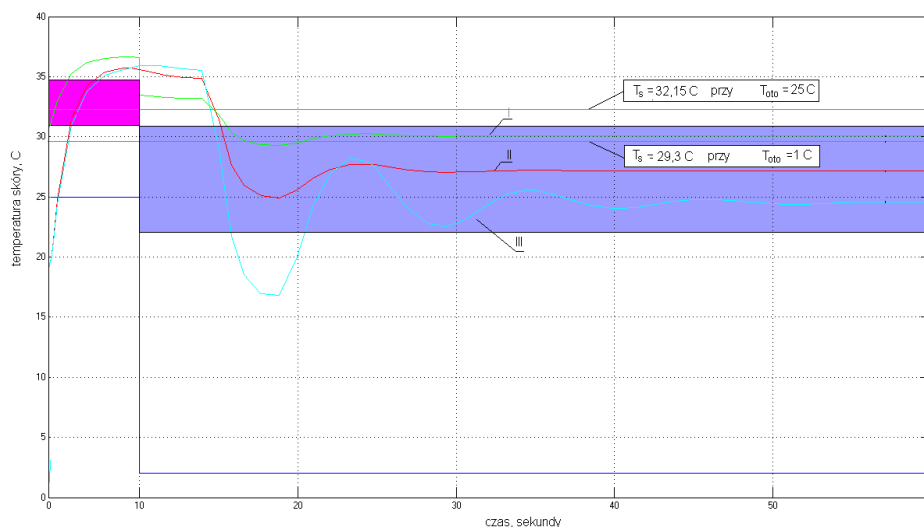
**Rys. 1.** Koncepcja dwufazowa modelu homeostazy, model segmentowy (A); Uproszczony model homeostazy w programie Matlab Simulink (B).  
 1 – głowa; 2 – twarz; 3 – kark; 4,5 – ramiona; 8, 9 – dłonie; 6, 7 – ręce; 10 – klatka piersiowa; 11 – brzuch; 12, 13 – nogi; 14, 15 – stopy

W celu sprawdzenia poprawności działania modelu wykonano eksperymentalne badania rozkładu temperatury na powierzchni skóry oraz jej zmian w zależności od warunków otoczenia, zgodnie z Polską Normą PN-ISO 9886:2005. Badania przeprowadzono na wyselekcjonowanej grupie studentów w wieku 23-30 lat. Wykonano pomiary termowizyjne za pomocą kamery firmy Flir ThermaCAM E65. Zakres pomiarowy kamery wynosił od 0 do 100°C, a niedokładność 2% zakresu pomiarowego. W pierwszej części badań zarejestrowano rozkład temperatury na ciele w warunkach komfortu termicznego w temperaturze pokojowej, a następnie wykonano ten sam pomiar w temperaturze otoczenia bliskiej 0°C. Zarejestrowano również zmiany temperatury skóry, w stanie umiarkowanego wysiłku fizycznego oraz spoczynku. Na rysunku 2A pokazano przykładowe zdjęcie termowizyjne skóry człowieka przebywającego bez odzieży w komfortowych warunkach środowiska zewnętrznego. Zestawienie wartości średnich temperatur skóry zamodelowanych oraz rzeczywistych temperatur pomierzonych, w stanach ustalonych, uzależnionych od temperatury otoczenia, przedstawiono na rysunku 2B.



**Rys. 2.** Termograf przedstawiający przód torsu mężczyzny przebywającego w temperaturze pokojowej (A); Zależność temperatury skóry człowieka od temperatury otoczenia wyniki □ przebieg symulacji, ◇ średnia rzeczywista temperatura dla skóry, (B)

W pracy zamieszczono również wyniki symulacji, przedstawiające zmiany temperatury skóry pod wpływem skokowej zmiany temperatury otoczenia. Skok temperatury dobrano tak, aby można było porównać uzyskane wyniki z rzeczywistymi wynikami pomiarów termowizyjnych skóry człowieka. Na rysunku 3, zaznaczono dodatkowo szarą linią, średnie wartości temperatur skóry dla dwóch, skrajnych wartości temperatury otoczenia uzyskanych z eksperymentu (z pomiarów kamerą termowizyjną). Wynoszą one odpowiednio 29,3°C przy temperaturze 2°C oraz 32,15°C przy temperaturze 25°C. W przedstawionym przypadku, zamodelowano ujemny skok temperatury z 25°C na 2°C w 10 sekundzie symulacji.



**Rys. 3.** Przykładowa odpowiedź temperatury ciała człowieka na ujemny skok temperatury otoczenia z 25°C na 2°C dla trzech modeli homeostazy

Dodatkowo na wykresie zaznaczono obszary skrajnych zmian temperatur na ciele, tzn. minimalnej zmierzonej temperatury występującej na ciele człowieka oraz temperatury maksymalnej, dla dwóch różnych temperatur otoczenia. Wartości uzyskane z symulacji dla ujemnych spadków temperatur otoczenia we wszystkich trzech modelach leżą w obszarze temperatur granicznych. Świadczy to o jakościowej poprawności przyjętych założeń do budowy modelu homeostazy. W rozważaniach nad weryfikacją stworzonych modeli homeostazy wykorzystano metodę modelu [3]. Różnice między temperaturą skóry człowieka pomiarzoną a zamodelowaną wynikają przede wszystkim z faktu, że człowiek jako obiekt jest bardziej złożony niż zaproponowany w tej pracy jego model, oraz z błędów pomiarów temperatury skóry. Ocena poprawności modelu opiera się przede wszystkim na wartości kryterium. W przypadku, gdy parametry modelu nie mają konkretnej identyfikacji fizycznej, takiej jak m.in. zachowania behawioralne człowieka, dokładności identyfikacji nie należy utożsamiać z dokładnością, jaką można by pośrednio mierzyć daną wielkość fizyczną. Należy natomiast ocenić zdolność modelu do całościowego opisu zjawiska termoregulacji. Zmiana całkowitej wartości tego kryterium, dla wykonanych modeli homeostazy nie przekracza 10%, co jest równoznaczne ze zmianą o około 0,2°C. Trzeba zaznaczyć, że w rozważanym przypadku należałoby badać odchylenia oszacowanych wartości współczynników modelu od ich wartości dokładnych. W prezentowanym przypadku wartości dokładne, są uzyskane z pomiarów dla konkretnego człowieka (grupy studentów), dlatego też mogą różnić się dla innych przypadków.

### 3. MODELOWANIE WARSTW TEKSTRONICZNEJ ODZIEŻY

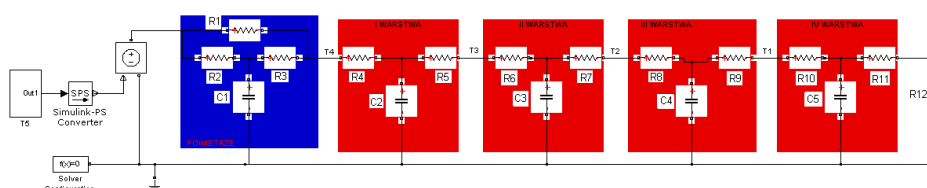
Do modelowania warstwy tekstronicznej odzieży wykorzystano model dyskretny RC, tzw. model Beukena. Model ten wykorzystuje analogie matematyczne między równaniem opisującym przebiegi napięcia w linii długiej bez indukcyjności i upływności zwanej kablem Thomsona a zjawiskami termicznymi zachodzącymi w warstwie tekstylnej. Wykorzystuje się analogię powstającą po przekształceniu równań (1) i (2) do postaci różnicowo-różniczkowej [4].

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{a}{\Delta x^2} \sum_{k=1}^{k=2} (\vartheta_k - \vartheta_o) \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{RC} \sum_{k=1}^{k=2} (U_k - U_o) \quad (2)$$

gdzie:  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ , jest to dyfuzyjność cieplna w m<sup>2</sup>/s.

Model ten ma zastosowanie w przypadku, kiedy mamy do czynienia z układem, w którym występuje złożona wymiana ciepła. Tego typu układy występują min. w tekstronicznej odzieży, gdy prócz wymiany ciepła na drodze przewodzenia występuje wymiana na drodze promieniowania i konwekcji w szczelinie powietrznej między warstwą odzieży a skórą człowieka. Warstwy tekstyliów zostały zamodelowane w dwojaki sposób. Pierwszy z nich zakładał konstrukcje według modelu T, drugi według modelu II. Realizację modelu typu T przedstawiono na rysunku 4. Wartości poszczególnych rezystancji i pojemności dla każdego z wariantów modelu uzyskano w wyniku pomiarów eksperymentalnych typowej dzianiny wełnianej, zostały one przedstawione w tabeli 1.

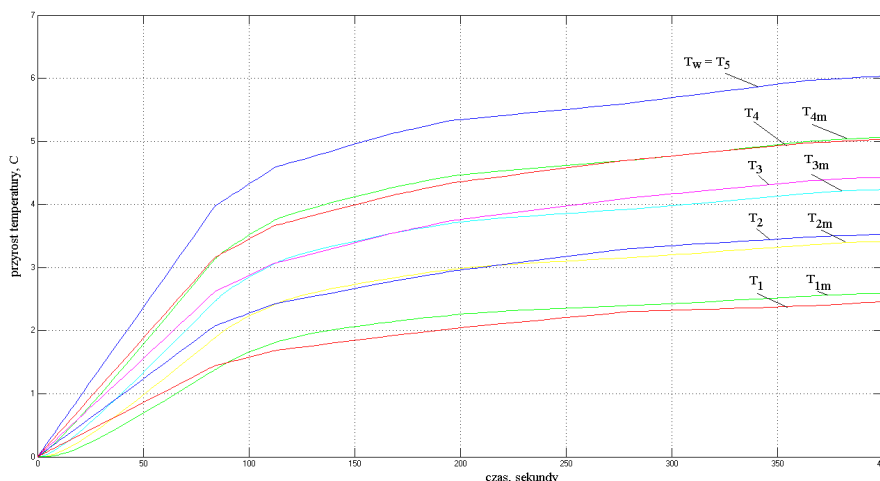


Rys. 4. Realizacja modelu Beukena warstwy pakietu tekstylnego ze szczeliną powietrzną, model typu T

Tabela 1. Dane do modelu w programie Matlab Simulink

Lp.	Model typu „T”		Model typu „II”	
1	R1	11,70 Ω	R1	11,70 Ω
2	R2, R3	3,30 Ω	R2, R3	3,30 Ω
3	R4, R5	1,42 Ω	R4, R6	0,71 Ω
4	C1	0,00002 F	R5	1,42 Ω
5	C2,C3,C4,C5	0,00062 F	C1	0,00002 F
6	R12	6,50 Ω	C2, C3	0,00031 F
7	-	-	R16	6,50 Ω

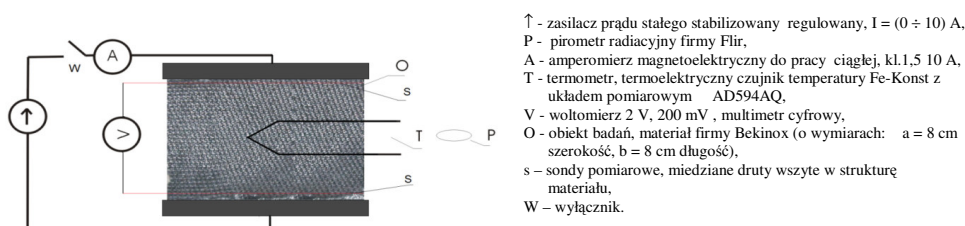
Zaletą modelu Beukena jest jego poglądowość, zgodność zjawisk modelowych z fizyczną naturą i możliwość bezpośredniej wizualizacji przebiegu zmian temperatury i mocy.



Rys. 5. Wyniki symulacji dla modelu typu T

Różnica w stanach ustalonych między wartością pomierzoną a zamodelowaną, dla modeli „T” i „I” jest mniejsza niż 0,5°C.

Kolejnym etapem prac, były badania i modelowanie tekstylnych materiałów elektroprzewodzących przeznaczonych do budowy tekstylnych grzejników. Przedmiotem badań były pomiary parametrów obiektu w trakcie nagrzewania bezpośredniego przepływającym prądem elektrycznym. Obiektem badań były tekstylne próbki materiałów firmy Bekinox. Użyto próbek tkanin, włóknin oraz dzianin o wymiarach geometrycznych 8 cm na 8 cm. Wymiary próbek były dobrane w taki sposób, aby można je było umieścić w różnych miejscach odzieży, aby zapewnić optymalne grzanie wewnątrz ubioru. W pierwszej części eksperymentu wykonano badania statyczne polegające na pomiarze napięć na zaciskach próbki dla różnych wartości prądów. Na tej podstawie stwierdzono, iż wyroby te są rezystorami liniowymi, dla których rezystancja nie zależy od temperatury w zakresie 20-40°C. Próbki materiałów w pierwszej fazie badań zostały oprawione w metalowe uchwyty doprowadzające prąd, rys. 6. Wyposażone zostały również w sondy napięciowe S, w postaci cienkich drutów miedzianych wszytych poprzecznie do kierunku przepływu prądu. Sonda termometru termoelektrycznego została zamocowana centralnie na środku próbki.



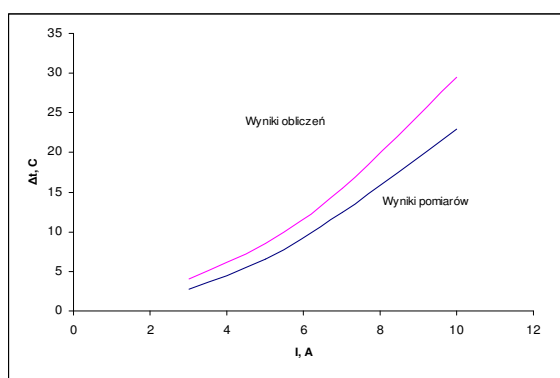
- ↑ - zasilacz prądu stałego stabilizowany regulowany,  $I = (0 \div 10) \text{ A}$ ,
- P - pirometr radiacyjny firmy Flir,
- A - amperomierz magnetoelektryczny do pracy ciągłej, kl.1,5 10 A,
- T - termometr, termoelektryczny czujnik temperatury Fe-Konst z układem pomiarowym AD594AQ,
- V - woltomierz 2 V, 200 mV , multimetr cyfrowy,
- O - obiekt badań, materiał firmy Bekinox (o wymiarach: a = 8 cm szerokość, b = 8 cm długość),
- s - sondy pomiarowe, miedziane druty wszyte w strukturę materiału,
- W - wyłącznik.

Rys. 6. Schemat pomiarowy układu do badania tekstylnych grzejników

Kolejną fazą badań było obliczenie przyrostu temperatury próbki  $\Delta t_{obl}$  pod wpływem przepływającego prądu. Korzystano z zależności, dla próbki oddającej ciepło z jednej strony:

$$\Delta t = \frac{\rho}{b^2 d \alpha} I^2 \quad (3)$$

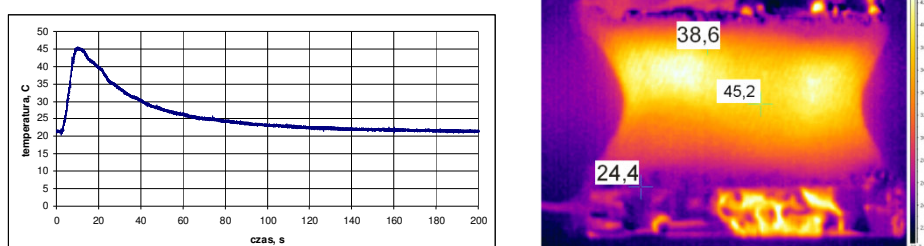
gdzie:  $d$  – grubość próbki tekstylnego grzejnika w m,  $b$  – wymiar jego krawędzi bocznej w m,  $\alpha$  – współczynnik przejmowania ciepła uwzględniający konwekcję i promieniowanie,  $q$  – cieplne obciążenie powierzchniowe tekstylnego grzejnika. Przykładowe wyniki dla tekstylnego grzejnika dzianego, uzyskane z pomiarów jak i z obliczeń, przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Przykładowe porównanie wyników obliczeń i pomiarów

W celu wyboru najodpowiedniejszego materiału przeznaczonego na grzejnik tekstylny wykonano również identyfikację cech dynamicznych tekstylnych materiałów przeznaczonych na grzejniki tekstylne. Zarejestrowano nagrzewanie się płaskich wyrobów włókienniczych w których boki próbek były umieszczone w prostokątnych płaskich zaciskach, odległych od siebie o 6 cm i dołączonych do źródła napięcia stałego. Wartość prądu płynącego przez każdą próbkę była dobierana tak, aby uzyskać jej nagrzanie do temperatury wyższej od temperatury otoczenia o 5°C. Temperaturę na powierzchni próbki rejestrowano za pomocą termoelementu typu J oraz kamery termowizyjnej E65. Spoina termoelementu była umieszczona w punkcie centralnym próbki. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 8.





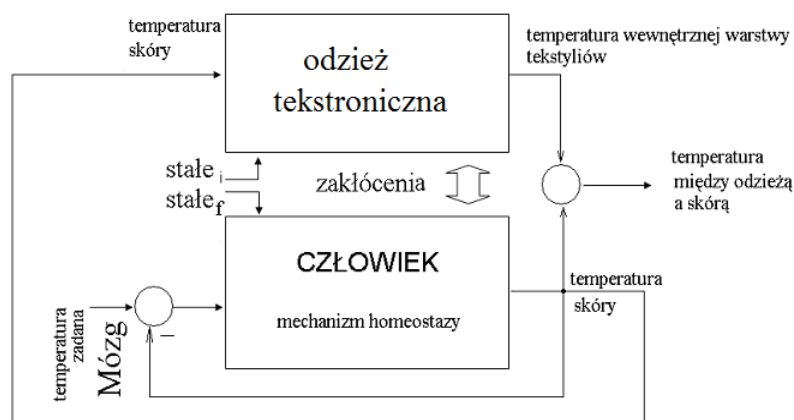
**Rys. 8.** Charakterystyka nagrzewania i chłodzenia dla zestawu: termoelement typu J – dzianina metalowa Bekinox (A); Termogram grzejnika dzianinowego wykonany w 18 sekundzie etapu grzania (B)

Przeprowadzone badania potwierdziły tezę o możliwości zastosowania badanych próbek materiałów elektroprzewodzących, jako elementów grzejnych w ubiorach odzieżowych. Charakterystyki skokowe obiektów, otrzymane w wyniku badań wykorzystano do wyznaczania modelu w postaci transmitancji operatorowej. Na podstawie literatury [6], wyznaczono zastępczą transmitancję operatorową, która przybliży rzeczywiste własności obiektu. Wyznaczono transmitancję obiektu według następujących modeli: Kuepfmuellera, Rotacza, Strojca. Na podstawie przeprowadzonych symulacji w budowanym modelu TUART wykorzystano model Rotacza do scharakteryzowania tekstylnego grzejnika. Zapewnił on poprawne przebiegi najbardziej zbliżone do rzeczywistych wyników eksperymentu.

#### 4. SYNTEZA I BADANIA TEKSTRONICZNYCH UKŁADÓW AUTOMATYCZNEJ REGULACJI TEMPERATURY (TUART)

Problem zjawiska wymiany ciepła między skórą ludzką a stykającą się z nią warstwą tekstronicznej odzieży, czyli odzieży o złożonej strukturze wewnętrznej, ale o jednolitych właściwościach funkcjonalnych jest skomplikowany i niejednoznaczny. Dlatego też szczegółowe poznanie zjawisk i procesów, jakie zachodzą między poszczególnymi elementami układu odzieżowego, ułatwi konstrukcje rozbudowanych i szczegółowych modeli automatycznej kompensacji zmian temperatury między warstwą skóry a odzieżą. Z punktu widzenia wymiany ciepła wyroby włókiennicze możemy traktować jako przepuszczalne przegrody o małej grubości, i o specjalnie ukształtowanej powierzchni [5]. Założono, że odzież nie wszędzie będzie bezpośrednio stykać się ze skórą człowieka, w wyniku czego, uwzględnić należy szczeliny powietrzne o szerokości  $ds$ , a w nich zjawiska konwekcji ( $q_{kon}$ ) i radiacji ( $q_r$ ) ciepła w warstwie między skórą a odzieżą. Model

jakościowy człowiek–odzież dla powyższego przypadku może zostać przedstawiony, tak jak na rysunku 9, gdzie stałe  $i$  oraz  $f$  są to stałe charakterystyczne dla tekstyliów oraz organizmu człowieka.



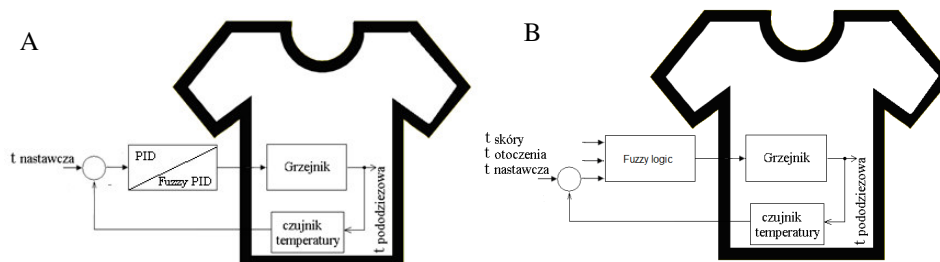
Rys. 9. Model połączenia odzieży tekstronicznej z mechanizmem homeostazy

W konstrukcjach tekstronicznych UAR siłowniki jak i sensory mają postać włóknistą, i są przystosowane do umieszczania w strukturach włóknistych, generując sygnały elektryczne lub dając się sterować, zaś pozostałe elementy układu (np. regulator) są typu elektronicznego lub programowego. Tekstroniczny układ automatycznej regulacji TUAR, to nic innego jak tekstroniczny system sterowania (Textronic Control System – TCS), w którym obiektem regulacji, pośrednio jest człowiek wraz z odzieżą. W rzeczywistości obiektem regulacji może być np. warstwa powietrza między powierzchnią skóry a warstwą odzieży. Należy podkreślić, że TUAR w żaden sposób nie steruje człowiekiem!

Prezentowane opracowanie głównie opierać się będzie o układy typu EH czyli takie, w których istnieje możliwość wyboru temperatury pododzieżowej, a układ potrafi jedynie ogrzewać. Wartość tej temperatury dobrana jest indywidualnie przez użytkownika tekstronicznej odzieży tak, aby zapewniać komfort użytkowy. W pracy zaproponowano również podział systemu EH na dwa rodzaje: TEH (Traditional Existing Heating) oraz FEH (Fuzzy Existing Heating). Pierwsza podgrupa (TEH) charakteryzuje się tradycyjną metodą zmiany wartości temperatury pododzieżowej. Użytkownik sam decyduje czy w danej chwili, przy określonych warunkach otoczenia, czuje się komfortowo. Zmienia wtedy sam wartość zadaną temperatury pododzieżowej. Druga grupa układów (FEH), zakłada automatyczną zmianę tej wartości na podstawie wcześniej zdefiniowanej bazy reguł, zawierającej warunki komfortu użytkownika tekstronicznej odzieży. Tego typu układy są wysoce spersonalizowane i znajdują mogą zastosowanie w takich aplikacjach, jak suche skafandry dla nurków. Podczas nurkowania głębokiego, kiedy bardzo istotny jest czas przebywania pod wodą, nurek wyposażony

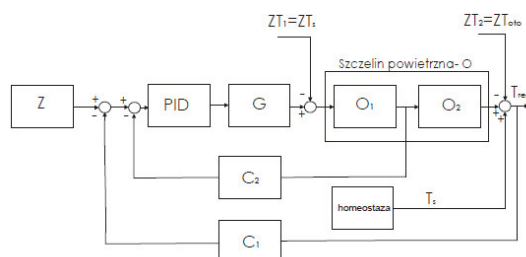
w system FEH nie musi skupiać swojej uwagi na ustaleniu optymalnej temperatury we wnętrzu kombinezonu, a jedynie np. na akcji ratunkowej.

W niniejszej pracy autor w pierwszej kolejności zdecydował się na zastosowanie regulatorów ciągłego działania PID jako klasycznych elementów układów regulacji. Kolejnym etapem była modyfikacja tradycyjnego regulatora PID do postaci FPID (FuzzyPID), rys. 10A. Ostatnim z zastosowanych regulatorów był sam regulator rozmyty FUZZY, rys 10B.



**Rys. 10.** Model blokowy układu regulacji z wykorzystaniem regulatora PID, FPID (A), oraz regulatorem rozmytym FUZZY (B)

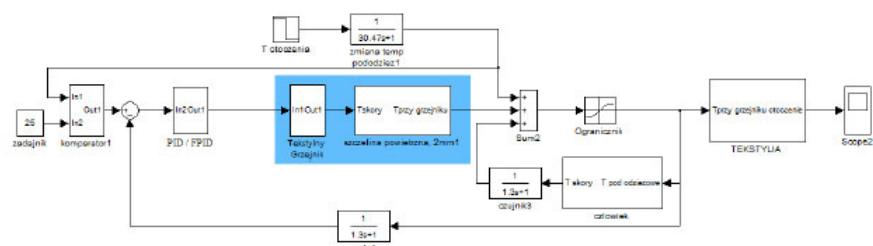
Analizując przedstawione modele, zaproponowano układ automatycznej regulacji temperatury ze szczeliną powietrzną, którego schemat przedstawiono na rysunku 11, gdzie: Z – zadajnik; PID regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący; G – człon wykonawczy (grzejnik tekstylny); C1, czujniki temperatury skóry; C2 czujniki temperatury na powierzchni grzejnika; ZT1, ZT2 zakłócenia ( $T_s$  – temperatury skóry,  $T_{oto}$  – temperatury otoczenia);  $T_{reg}$  – temperatura regulowana (temperatura grzejnika); O1 i O2 – obiekt regulacji (temperatura szczeliny powietrznej, temperatura poddzieżowa). Na schemacie podzielono szczelinę poddzieżową na dwie części O1 i O2, ze względu na uwydatnienie wpływu zakłóceń temperatur  $ZT1$  oraz  $ZT2$ . W rzeczywistości występują trudności techniczne w pomiarze temperatury poddzieżowej.



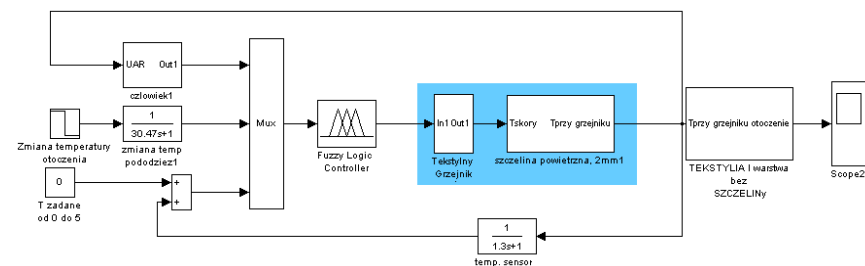
**Rys. 11.** Układ automatycznej regulacji temperatury ze szczeliną powietrzną

Schemat budowy układu automatycznej regulacji temperatury w programie Matlab Simulink przedstawiono na rysunku 12.

A

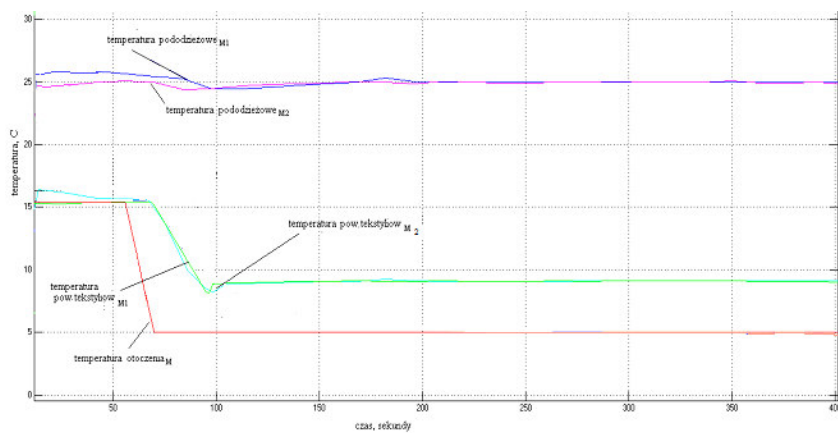


B



**Rys. 12.** Model automatycznej regulacji temperatury z wykorzystaniem regulatora PID, FPID (A) oraz Fuzzy (B), w odzieży tekstronicznej, wariant z wykorzystaniem modelu zmian temperatury skóry człowieka oraz otoczenia

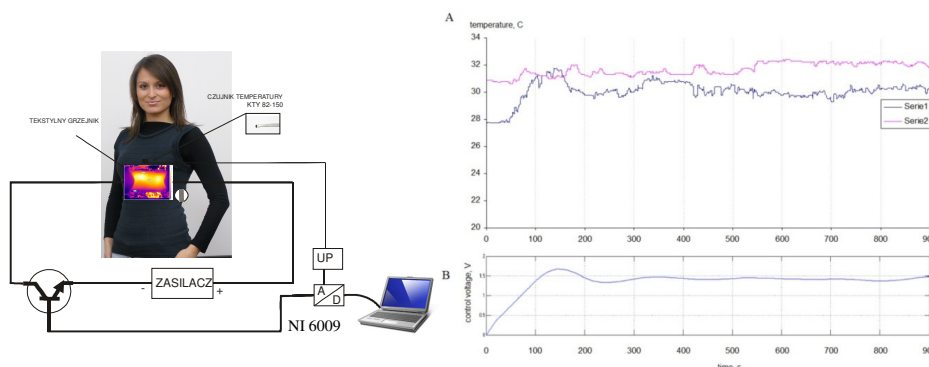
Przykładowe wyniki symulacji układu regulacji z regulatorem FPID przedstawia rysunek 13.



**Rys. 13.** Wyniki zmian temperatury pododzieżowej dla symulacji z wykorzystaniem regulatora FPID

Ostatnim etapem badań było sprawdzenie poprawności i jakości działania TU-ART z wykorzystaniem trzech rodzajów regulatorów. Wykonano prototyp tekstylnej koszulki z zaimplementowanymi sensorami temperatury oraz dzianinowymi grzejnikami tekstylnymi, rys 14 A. Do wytworzenia prototypu koszulki wykorzystano materiał opisany w pierwszej części pracy. Układ automatycznej regulacji temperatury, tekstronicznej odzieży przebadano w warunkach laboratoryjnych, na grupie studentów ochotników, a jego tekstylna forma nie powodowała dyskomfortu użytkownika.

Oceny jakości pracy TUART dokonano na podstawie porównania dwóch parametrów: czasu ustalenia się temperatury pododzieżowej oraz wartości przeregulowania. Do oceny wybrano te parametry, ponieważ po pierwsze szybkość osiągnięcia żądanej temperatury pododzieżowej decyduje o utrzymaniu komfortu termicznego, a zbyt duża wartość przeregulowania może powodować poparzenia użytkownika tekstronicznej odzieży. Przykładowe wyniki, uzyskane z badań, zawiera tabela 2 [7].



Rys. 14. Prototyp tekstronicznej koszulki; (A) Zmiana temperatury pododzieżowej (seria 1) i temperatury skóry (seria 2) (B) Zmiana sygnału sterującego regulatora Fuzzy

Tabela 2. Średnie wartości przebiegów rzeczywistych TUART z regulatorami PID, Fuzzy PID, Fuzzy

Lp	1	2	3	4
		PID	FPID	Fuzzy
1	$e_{dmax}$	1,9	1,2	-
2	$\chi$	59,37%	66%	0%
3	$c_{max}$	3,2	1,6	0,4
4	$c$	53,44%	40,87%	-
5	$i_o$	3	2	0
6	$t_r$	380	340	320

Z analizy tabeli 2 wynika, że najkrótszy czas regulacji wystąpił dla układu regulacji z wykorzystaniem regulatora Fuzzy, a najdłuższy dla układu wykorzystującego regulator PID. Z punktu widzenia bezpieczeństwa użytkownika TUART ważną ce-

czą jest również maksymalna wartość przeregulowania, która może spowodować w skrajnych przypadkach poparzenie. W rozważanych przykładach wartości przeregulowania zmieniają się maksymalnie o 3,2°C, co jest wartością bezpieczną dla użytkownika takiej odzieży i świadczy o prawidłowym doborze nastaw regulatora. Przy porównaniu pracy trzech regulatorów, pod tym kątem najlepiej wypada również regulator Fuzzy, którego maksymalne przeregulowanie wynosi około 0,4°C.

## LITERATURA

- [1] **Gniotek K., Stempień Z., Zięba J.:** 2003, Tekstronika – nowy obszar wiedzy, Przegląd Włókienniczy, Nr 2, ss. 17-18.
- [2] **Fiala D., Lomas J.K., Stohrer M.:** 1999, A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system, J Appl Physiol Vol. 87, Issue 5, 1957-1972.
- [3] **Frydrysiak M., Ziegler S., Gniotek K.:** 2007, Textronic model of clothing considering changes in its thermoinsulating properties, Research Journal of Textile and Apparel, ISSN 1560-6074, Vol. 11, No. 4, s.48-54.
- [4] **Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J.:** 1981, Regulacja temperatury urządzeń elektrotechnicznych, Warszawa, WNT.
- [5] **Żurek Z., Kopias K.:** 1977, Struktura płaskich wyrobów włókienniczych, Warszawa, WNT.
- [6] **Kaczorek T.:** 1993, Teoria sterowania i systemów, PWN, Warszawa.
- [7] **Frydrysiak M.:** Innowacyjne rozwiązania w obszarze automatyki, robotyki i pomiarów, monografia pod redakcją **Kacprzyka J.**, rozdział 5, Warszawa 2010.

## SIMULATION AND MODELING TEXTRONIC HEATING CLOTHING

### Summary

In this interdisciplinary work concerning Modeling and simulation of Textronic Temperature Automation Control Systems, the author put forward a thesis that it is possible to automatically control temperature in underclothing layers using Textronic Control System. The aim of the work is modeling of TCS in Matlab Simulink program and creating interactive clothing which can change temperature inside and keep it on a constant level. The model and clothing construction consist of few component elements like: measurement unit, actuator unit (actuator + controller) and clothing unit. Each of the mentioned units was modelled and tested to create an optimum textronic construction.