

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Ingrīda ŠAHTA

**APĢĒRBĀ INTEGRĒTAS ELEKTRONISKAS
TERMOREGULĀCIJAS SISTĒMAS IZSTRĀDE**

Promocijas darba kopsavilkums

Rīga 2014

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
RIGA TECHNICAL UNIVERSITY**

Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Faculty of Material Science and Applied Chemistry

Tekstilmateriālu tehnoloģiju un dizaina institūts
Institute of Textile Materials Technologies and Design

Ingrīda ŠAHTA

Doktora studiju programmas „Tekstila un apģērbu tehnoloģija” doktorante

**APĢĒRBĀ INTEGRĒTAS ELEKTRONISKAS
TERMOREGULĀCIJAS SISTĒMAS IZSTRĀDE**

**DEVELOPMENT OF ELECTRONIC
THERMOREGULATORY SYSTEM
INTEGRATED INTO CLOTHING**

**Promocijas darba kopsavilkums
The summary of the thesis**

Zinātniskie vadītāji/Supervisors
Dr.sc.ing., asoc. profesore/asoc. professor
Ilze BALTIŅA

Dr. fiz., asoc. profesors/ asoc. professor
Juris BLŪMS

Rīga 2014

UDK 687.1+677.07](043.2)
Ša 227 a

Šahta I. Apģērbā integrētas elektroniskas termoregulācijas sistēmas izstrāde. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2014.-59 lpp.

Šahta I. Development of Electronic Thermoregulatory System Integrated into Clothing. Summary of Doctorate Thesis.-R.: RTU, 2014.- 59 pages.

Iespiests saskaņā ar RTU TTD institūta 2013.gada 23. maija lēmumu, protokols Nr.1



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu Nacionālās programmas „Atbalsts doktorantūras programmu īstenošanai un pēcdoktorantūras pētījumiem” projekta „Atbalsts RTU doktorantūras attīstībai” ietvaros.

This work has been partly supported by the European Social Fund within the National Programme “Support for the carrying out doctoral study program’s and post – doctoral studies at Riga Technical University”.

© Rīgas Tehniskā universitāte 2014
© Ingrīda ŠAHTA 2014

ISBN 978-9934-507-56-4

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA
GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

**DOCTORAL THESIS HAS BEEN PROMOTED FOR OBTAINING
DOCTOR'S DEGREE IN ENGINEERING SCIENCES IN RIGA
TECHNICAL UNIVERSITY**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. gada 28. martā plkst. 12 00 zinātņu nozares Materiālzinātne apakšnozares Tekstila un apģērbu tehnoloģijas promocijas padomes RTU P-11 atklātajā sēdē RTU, Rīgā, Āzenes 18, 117. auditorijā.

Doctoral thesis to obtain a doctor's degree in engineering sciences is publicly defended on 28th March of 2014 in auditorium No. 117 of Faculty of Materials Science and Applied Chemistry of Riga Technical University in Riga, Āzenes Street 18.

OFICIĀLIE RECENZENTI/OFFICIAL REVIEWERS

Asoc. prof., Dr.sc.ing. Inese Ziemele
Rīgas Tehniskā universitāte/Riga Technical University

Prof., Dr.sc.ing. Eugenija Strazdiene
Viļņas Lietišķo Zinātņu universitāte/Vilnius University of Applied Sciences
Kauņas Tehnoloģiju universitāte/Kaunas University of Technology

Doc., Dr. phys. Renārs Erts
Rīgas Stradiņa universitāte/Riga Stradina University

APSTIPRINĀJUMS/CONFIRMATION

Apstiprinu, ka esmu izstrādājusi doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

I confirm that I have written this thesis and it is submitted for review in Riga Technical University for acquiring the Doctoral degree in engineering sciences. The thesis is not submitted in any other university for acquiring a scientific degree.

Ingrīda Šahta

Datums/Date: 30.01.2014

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 8 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 11 pielikumus, 97 attēlus, 16 tabulas, kopā 167 lappuses. Literatūras sarakstā ir 146 nosaukumi.

The doctoral thesis has been written in Latvian and includes: introduction, 8 chapters, conclusions, literature list, 11 annexes, 97 figures, 16 tables, 167 text pages and 146 literary sources.

SATURS/ CONTENTS

SATURS/ CONTENTS	5
IEVADS	6
1. TEKSTILNOZARES ATTĪSTĪBAS TENDENCES	13
2. VIEDTEKSTILIJAS	14
3. ELEKTROVADOŠU SISTĒMU INTEGRĒŠANA TEKSTILIJĀ	16
4. ELEKTROVADOŠI TEKSTILPAVEDIENI.....	17
5. MIKROKLIMATA REGULĒŠANA AR APĢĒRBU	18
6. TERMOREGULĒJOŠS APĢĒRBS AR IEVIETOTU PELTJĒ ELEMENTU.....	19
7. EKSPERIMENTU METODES	21
8. PĒTĪJUMU REZULTĀTI	24
SECINĀJUMI UN REZULTĀTI	31
INTRODUCTION	33
1. TEXTILE SECTOR DEVELOPMENT TENDENCIES	40
2. SMART TEXTILES	41
3. ELECTROCONDUCTIVE SYSTEM INTEGRATION INTO TEXTILES	43
4. CONDUCTIVE YARNS	44
5. MICROCLIMATE CONTROL BY CLOTHING	45
6. TERMOREGULATORY MATERIAL WITH INSERTED PELTIER ELEMENT	46
7. EXPERIMENT METHODS	48
8. RESEARCH RESULTS	51
CONCLUSIONS AND RESULTS	58

IEVADS

Augstai apkārtējās vides temperatūrai vai ilgstošai fiziskai slodzei ir nozīmīga ietekme uz cilvēka ķermeņa temperatūru, darba efektivitāti, veselību un komforta sajūtām. Tādēļ ir svarīgi nodrošināt optimālu ķermeņa temperatūru. Augstas temperatūras apstākļos, piemēram, ugunsdzēsēju darba vidē, kara aktivitāšu situācijās tuksneša zonās vai autosportistu darbības sfērā, rodas papildu prasības pēc funkcijām, kuras piešķiramas apģērbam, piemēram, ērtums, vieglums, mobilitāte un siltuma komforts. Termoregulējoša apģērba funkcija, lielākoties komerciālu ražojumu veidā, ir pazīstama kā siltumu aizturoša vai siltumu radoša, mazāk populārs ir dzesējošs apģērbs.

Tekstilijas ar integrētām elektriskām un elektroniskām sistēmām šobrīd pārstāv vienas no aktuālākajām tehnoloģiju attīstības tendencēm tekstila nozarē. Tomēr pasaulē vēl arvien ir maz uzņēmumu, kas ražo komerciāli pieejamas viedtekstilijas ar integrētu elektroniku. Lielākā daļa šādu izstrādājumu ieceres vēl ir pētījumu stadijā, jo elektronikas un drānas savienošana un piemērošana patērētāja ērtībām un lietošanas kvalitātes prasībām ir problemātiska. Tirgū vairāk sastopamas ir tekstilpreces, kas veic specifiskas funkcijas, piemēram, silda, dzesē ar elektriskiem elementiem vai komunicē ar mobilā telefona vai globālās pozicionēšanas sistēmas palīdzību, bet elektronikas vai elektriskās sistēmas drānā nav integrētas un nav pielāgotas drānas īpašībām.

Kā viena no dzesējošo sistēmu risinājumiem iespējama Peltjē elementa jeb termoelektriskā ģenerators iestrādāšana apģērbā. Šāds risinājums – dzesējošā apģērba prototips - iepriekš tika izveidots, tomēr tam tika konstatētas nepilnības un netika pārbaudīta darbības efektivitāte. Lai izpētītu, pilnveidotu un optimizētu sistēmas darbības efektivitāti, plānots noskaidrot iespējas integrēt elektrovadošu sistēmu apģērbā – to padarot piemērotu valkāšanai, pārbaudīt sistēmas darbību fizisku aktivitāšu laikā, paaugstinoties ķermeņa temperatūrai, un izvērtēt termoregulatīvā apģērba prototipa koncepcijas atbilstību jēdzienam „viedapģērbs”.

Mērķis: Izveidot apģērba prototipu ar integrētu mikroklimatu regulējošu elektrovadošu sistēmu.

Darba uzdevumi:

- 1) Apkopot viedtekstiliju starpnozares jēdzienus un noskaidrot jomas nozīmi tekstilnozares attīstībā Latvijā un Eiropā;
- 2) Analizēt elektrovadošo sistēmu elementu integrēšanas iespējas drānā un apģērbā;
- 3) Eksperimentāli izpētīt elektrovadošu elementu integrēšanas iespējas tekstilijās;
- 4) Pārbaudīt atsevišķu elektrovadošu elementu īpašību izmaiņas imitētas valkāšanas procesā;
- 5) Analizēt cilvēka mikroklimatu ietekmējošus faktorus;
- 6) Izpētīt iespējas regulēt cilvēka mikroklimatu ar apģērba palīdzību;
- 7) Eksperimentāli pārbaudīt sistēmas elementu integrēšanas iespējas termoregulējošā apģērbā;
- 8) Izgatavot mikroklimatu regulējošu apģērbu ar dzesēšanas funkciju;
- 9) Pārbaudīt un novērtēt apģērba funkcionalitāti fiziskas slodzes apstākļos.

Pētījuma metodes

Darbā izmantotās teorētiskās un eksperimentālās pētījuma metodes:

- Publicēto un nepublicēto informācijas avotu – zinātnisko pētījumu publikāciju par tekstilnozares inovācijām, starpnozares terminu un jēdzienu skaidrojošu dokumentu, publikāciju par elektrovadošu sistēmu integrēšanas iespējām un apģērba komfortu un siltumprocesu cietvielās ietekmējošu faktoru analīzi, termoregulējošu apģērbu ar Peltjē elementiem patentu, termoregulējošu apģērbu un elektrovadošu pavedienu ražotāju firmu piedāvājumu, normu un standartu - apkopošana un analīze. Jomas termini apkopoti tabulā.
- Fizikālā problēmjautājuma analīze – teorētiska siltumprocesu prognozēšana Peltjē elementa dzesējošo sistēmu iespējamās variācijās pēc siltumu aizvadošā materiāla veida un novietojuma, kā arī siltuma un mitruma vadīšanas procesu sistēmas slāņos un apģērbu kārtās analīze.
- Teorētiska termodinamisko procesu un siltuma apmaiņas starp cilvēka ķermeni un vidi noteiktas fiziskas slodzes apstākļos aprēķināšana, prognozēšana.
- Fizioloģiskā analīze laboratorijas apstākļos, modelējot vides mikroklimata un cilvēka mijiedarbību fiziskas slodzes ietekmē termoregulējošā apģērbā un bez tā analīze. Dati apstrādāti un analizēti, izmantojot aprakstošo statistiku.

- Materiālu pētniecība laboratorijas apstākļos, modelējot drānas/apgērbu valkāšanas un kopšanas iedarbību mazgāšanas, stiepes rezultātā. Iegūto rezultātu dati apstrādāti ar aprakstošo statistiku un apkopoti tabulās.

Zinātniskā nozīme

Viedtekstiliju joma ir salīdzinoši jauna starpnozare. Nozares terminoloģija tikai nesen ir tikusi precizēta un ieteikta standartizēšanai, tādēļ arī izveidotais šīs jomas terminu tulkojumu un jēdzienisko skaidrojumu apkopojums latviešu valodā ir devums tekstilnozares un materiālzinātnes attīstībā.

Apkopotie dati (teorētiskās analīzes un eksperimentu rezultāti) par elektrovadošo pavadīšanu īpašībām ļauj salīdzinoši izvērtēt noteiktas struktūras, zīmola un atšķirīgas elektrovadošās komponentes pavadīšanu atsevišķu elektrovadošās ķēdes elementu izgatavošanai, kā arī prognozēt pavadīšanu elektrovadošās izmaiņas noteiktu valkāšanas un kopšanas faktoru ietekmē. Līdz šim publicētajos informācijas avotos nav atrodama apkopojuma informācija par elektrovadošajiem pavadīšanām, kas ietvertu to nozīmīgākos parametrus un īpašības.

Promocijas darba ietvaros izgatavotais termoregulējošais apģērbs ar integrētu/ievietotu elektrovadošo sistēmu, kur dzesējošo funkciju veic Peltjē elements, bet siltuma aizvadišanai kalpo cietvielas materiāls – vara folija – ir jauna veida risinājums jau esošajiem apģērba prototipiem ar Peltjē elementiem, un, salīdzinājumā ar apzinātajām prototipu koncepcijām, nesatur kustīgas detaļas, šķidrumus, ir mobils un salīdzinoši viegls. Savukārt mikroklimatu imitējošiem eksperimentiem darba ietvaros izstrādāta alternatīva metode, kas piemērota laboratorijas apstākļiem un neprasa specifiskas, dārgas iekārtas.

Praktiskais pielietojums

Apkopotā un analizētā jomas terminoloģija, metožu apskats elektrovadošu elementu integrēšanai apģērbā un elektrovadošo pavadīšanu veidu apkopojums, kā arī pavadīšanu īpašību un piemērotības lietošanai noteiktās tekstiltehnoloģijās kopsavilkumam paredzams pielietojums tekstilnozares ražotāju un komercijas sfērā, kā arī mācību procesā tehnikumos, augstskolās ar tekstilmateriālu inovācijām saistītos studiju priekšmetos. Savukārt darbā izstrādāto termoregulējošā apģērba prototipu perspektīvā iespējams izmantot kā prototipu dzesējošu apģērba izgatavošanai īpašām dzīves un darbības situācijām, piemēram, militārajā īpašuzdevumu apģērbā, medicīnā pacientu termoregulēšanai vai īpašuzdevumu apģērbā, kas jāvalkā, neatkarīgi no laika apstākļiem.

Darba aprobācija

Promocijas darbā apkopotie pētījumi un eksperimenti ir tikuši prezentēti, aspriesti un atzinīgi novērtēti vairākās starptautiskās konferencēs:

1. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. The Garments With Integrated Microclimate Control System. *International interdisciplinary scientific conference ENERGY*. Rīga, Latvija. 8.-10. October, 2009.
2. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Viedapģērba dzesējošās sistēmas optimizēšana. *50. RTU starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga: Latvija. 15. oktobris 2009.
3. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J. Optimization of Smart Clothes System. *International Scientific Conference, Innovative solutions for sustainable development of textiles industry*. Oradea, Romania 28. – 29. May, 2010.
4. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J. Development of Microclimate Regulatory Clothes. *Inter-Academia 2010. The 9th International Conference on Global Research and Education*. Riga. Latvia. 9. - 12. August, 2010.
5. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Cilvēka mikroklimata temperatūras mērījumu modelējošie eksperimenti. *51. RTU starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga: Latvija. 2010. gada 12. - 15. oktobris
6. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J., Jurkans V. Research of microclimate control system integrated in the clothes. *4th Aachen-Dresden International Textile Conference*, Dresden, Germany, 25.-26. November, 2010.
7. **Sahta I.**, Blums J., Baltina I., Jurkans V. Thermoregulatory System's Integrated in the Clothes Effect on the Human Microclimate. *11th World textile Conference Autex 2011*. France, Mulhouse, 8.-10. June, 2011.
8. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Cilvēka siltuma komfortu ietekmējošo faktoru analīze. *RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga, 2011. gada 13. – 15. oktobris.
9. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. Tekstilnozares attīstības inovatīvi risinājumi. *Starptautiskā zinātniskā konference „Tautsaimniecības attīstības problēmas un risinājumi”*, Rēzekne, Latvija, 2012. gada 19. aprīlis
10. **Shahta I.**, Baltina I., Jurkans V., Blums J. Conductive Yarns Application Potentialities for Smart Textile. *12th World Textile Conference Autex 2012 "Innovative Textile for High Future Demands"*, Croatia, Zadar, 13.-15. June, 2012.
11. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. Testing of the Electrical System Components Integrated in the Textiles. *6th International Textile Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles" (ITC&DC)*, Croatia, Dubrovnik, 7.-10. October, 2012.

12. **Šahta I.**, Baltiņa I., Leitāne S. Incorporation of Light Emitting Diodes in the Clothing. *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute*. Riga, 11.-12. October, 2012
13. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. The Control of Human Thermal Comfort by the Smart Clothing. *4th International Interdisciplinary Scientific Conference "Society. Health. Welfare"*, Latvija, Riga, 22.-23. November, 2012
14. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. Cilvēka mikroklimata regulēšana ar apģērbu. *Latvijas Universitātes 71. Zinātniskā konference*, Rīga 2013. gada 22. februārī
15. **Šahta I.**, Baltina I., Truskovska N., Blums J. & Deksnis E. Selection of Conductive Yarns for Knitting of Electrical Heating Element. *6th International Conference on Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation 2013*, Italia, Siena 4.-6. June, 2013

Publikāciju saraksts

1. Baltiņa I., **Šahta I.**, Blūms J. *Elektroniskā viedā apģērba sastāvdaļas un tām piemērotie materiāli*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 3. sēj. (2008), 71.-81. lpp. (ISSN:1691-3132)
2. **Šahta I.**, Blūms J., Baltiņa I. *Viedapģērba dzesējošās sistēmas optimizēšana*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 4. sēj. (2009), 25.-31. lpp.* (ISSN:1691-3132)
3. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Termoelektriskā moduļa integrēšanas iespējas cilvēka mikroklimatu regulējošos izstrādājumos. Patentu apskats*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 4. sēj. (2009), 16.-24. lpp.* (ISSN:1691-3132)
4. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. *Research of Microclimate Control System Integrated in the Clothes*. 4th Aachen-Dresden International Textile Conference, Germany, Dresden, 25.-26. November, 2010. - pp 1-7. (ISSN:1867-6405)
5. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Optimization of Smart Clothes System*. International Scientific Conference "Innovative Solutions for Sustainable Development of Textiles Industry", Romania, Oradea, 28.-29. May, 2010. - pp 148-151.** (ISSN:1582-5590)

* citēts: EBSCO HOST

** citēts: Ulrich's Update - Periodicals Directory; Directory of Open Access Journals (DOAJ); SCIPPIO

6. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. *Cilvēka mikroklimate temperatūras mērījumu modelējošie eksperimenti*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 5. sēj. (2010), 162.-167. lpp. (ISSN:1691-3132)
7. Paraga M., **Šahta I.** *Ieteikumi patērētājiem alpīnistu tērpu iegādei*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 5. sēj. (2010), 168.-175. lpp. (ISSN:1691-3132)
8. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Development of Microclimate Regulatory Clothes*. Advanced Materials Research. - 222. (2011) 193.-196. lpp.* (ISSN:1662-8985)
9. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *The Garment with Integrated Microclimate Control System*. Acoustic Space, Energy. - 8. (2011) pp 166-171. (ISSN:1407-2858)
10. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Apģērbā integrētā mikroklimate kontroles sistēma*. Acoustic Space, Energy. - 8. (2011) 201.-206. lpp. (ISSN:1407-2858)
11. **Šahta I.**, Baltiņa I., Leitane S., Pūce M. *Elektrovadoši tekstilpavedieni*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 6. sēj. (2011), 115.-122. lpp.** (ISSN:1691-3132)
12. **Šahta I.**, Blūms J., Baltiņa I., Jurkāns V. *Thermoregulatory System's Integrated in the Clothes Effect on the Human Microclimate*. 150 Years of Research and Innovation in Textile Science: Book of Proceedings, France, Mulhouse, 8.-10. June, 2011. - pp 856-860. (ISBN: 9782746628588)
13. **Šahta I.**, Jurkāns V., Baltiņa I., Blūms J. *Elektrovadošas sistēmas integrēšana termoregulējošā apģērbā*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 7. sēj. (2012), 50.-56. lpp. ** (ISSN:1691-3132)
14. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Truskovska N. *Conductive Yarns Application Potentialities for Smart Textile*. 12th World Textile Conference AUTEX 2012 "Innovative Textile for High Future Demands": Book of Proceedings, Croatia, Zadar, 13.-15. June, 2012. - pp 587-592. (ISBN: 9789537105471)
15. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. *Tekstilnozares attīstības inovatīvi risinājumi*. Latgales tautsaimniecības pētījumi: sociālo zinātņu žurnāls. - 1 (4). (2012) 329.-345. lpp.*** (ISSN:1691-5828)
16. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. *Testing of the Electrical System Components Integrated in the Textiles*. 6th International Textile Clothing and Design Conference

* citēts: SCOPUS

** citēts: EBSCO HOST

*** citēts: Index Copernicus scientific publications

"Magic World of Textiles" (ITC&DC): Book of Proceedings, Croatia, Dubrovnik, 7.-10. October, 2012. - pp 430-435.* (ISSN:1847-7275)

Pieņemts publicēšanai

- ✓ **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurķāns V. *The Control of Human Thermal Comfort by the Smart Clothing*. SHS Web of Conferences. Vol. 3 (2013) „4th International Interdisciplinary Scientific Conference "Society. Health. Welfare". 12 lpp.**
- ✓ **Šahta I.**, Baltina I., Truskovska N., Blums J.& Deksnis E. *Selection of Conductive Yarns for Knitting of Electrical Heating Element*. HPSM 2014 Conference Proceedings. Wessex Institute of Technologies. 2014. g. 12 lpp.**
- ✓ Truskovska N., **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Elektrovadošu pavedienu integrēšana adījumā*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 8. sēj. (2013), 8 lpp.
- ✓ Jurkans V., Blums J., **Sahta I.** *Advanced Power Management for Peltier Cooler*. Proceedings of RTU 54th International Scientific Conference. 14. – 16. October, 2013. – 5 pp.

Darba teorētiskās un praktiskās iestrādes ieviestas Rīgas Tehniskās universitātes TTDI mācību procesā Apģērbu un tekstila tehnoloģijas maģistrantūras studiju priekšmetā „Progresīvie tekstilmateriāli”.

* citēts: *Conference Proceedings Citation Index- Science (CPCI-S)*

** tiks citēts: *SCOPUS*

1. TEKSTILNOZARES ATTĪSTĪBAS TENDENCES

Tradicionālajai tekstiliju, apģērbu un apavu ražošanai pārceļoties uz kontinenta Āzijas daļu, kur tekstilvalsts – Ķīna - ir arī lielākā apģērbu eksportētāja pasaulē, rodas nepieciešamība pēc jauniem risinājumiem un jaunas ražošanas stratēģijas izveides Eiropā un, tajā skaitā, Latvijā. To savos ziņojumos uzsver arī Eiropas Ekonomikas un sociālo lietu komiteja, īpaši norādot uz “netradicionālā” sektora attīstības nozīmību.

Efektīvi strādā tie uzņēmumi, kas atraduši kādu specifisku nišu vai pārorientējušies uz tehnisko tekstiliju ražošanu un inovācijām. Tekstilizstrādājumi ar integrētām elektrovadošām sistēmām ir pētniecības joma, kas apvieno inovācijas gan tekstilnozarē, gan arī elektronikā un elektrotehnikā, un paver plašu pētniecības un ražošanas iespēju lauku tekstilnozarē. Tā kā joma ir jauna un mazapgūta, ir nepieciešams analizēt gan viedtekstiliju potenciālās tirgus un pielietojuma iespējas, ražošanas un materiālu izmaksas, un iespējamās problēmas ražošanas procesā, tāpat arī jāparedz dabas un apkārtējās vides piesārņojums ekspluatācijas procesā un pēc tā, un iespējamie draudi cilvēka un citu dzīvo būtnu veselībai.

Eiropā tiek veidota vienota stratēģija, kas balstīta uz jauninājumiem ražošanas procesos un materiālos, inovatīvām tehnoloģijām, par perspektīviem uzskatot mikro-, mazos un vidējos uzņēmumus, tāpat arī atbalstot jaunus zinātniekus un progresīvu pētījumu virzienus. Kopumā Eiropas stratēģiju tekstilrūpniecības stabilitātes nodrošināšanai un attīstībai var iedalīt sekojošos virzienos:

- ✓ inovatīvu ražošanas tehnoloģiju attīstība,
- ✓ jauna veida tekstilpreču jeb viedtekstiliju izgatavošana,
- ✓ tehnisko tekstiliju attīstība un jauna veida pielietojuma pētījumi,
- ✓ atbalsts mikro-, mazajiem un vidējiem uzņēmumiem,
- ✓ saskaņota sadarbība starp ES dalībvalstīm un Eiropas Komisiju,
- ✓ atbalsts jaunajiem zinātniekiem un progresīvu pētījumu virzieniem.

Latvija tekstilpreču inovāciju ziņā ir maznozīmīga Eiropas valstu starpā. Šī niša Latvijā ir brīva un, paralēli tekstilrūpniecības stratēģijai valstī, balstītai lielākoties uz dabīgo šķiedru attīstību, paver iespējas arī radošajam potenciālam un jauniem izgudrojumiem saskaņā ar Eiropas izvirzīto tekstilnozares attīstības stratēģiju inovāciju virzienā.

2. VIEDTEKSTILIJAS

Par viedtekstiliju starpnozāres pētniecības aizsācēju uzskatāms prof. Stīvs Manns, kas īpašu ieguldījumu jomas pētniecībā deva jau 80. gados. Sākotnēji elektronikas tika piestiprinātas pie apģērba vai aksesuāriem un bija smagas, apjomīgas un robustas. Samazinoties elektronikas izmēriem, laika gaitā radās iespējas tās integrēt apģērbā un drānas struktūrā.

Viedtekstiliju jēdziens ietver kā intelektisko (viedo) tekstilsistēmu, tā arī intelektisko (viedo) tekstilmateriālu nozīmi, norādot izstrādājuma spēju uztvert un reaģēt uz kādu ārējās vides iedarbību vai parametru izmaiņu. Savukārt, viedtekstiliju izgatavošanai, bieži vien, par pamatu kalpo funkcionālie tekstilmateriāli. Ietvertie jēdzieni skaidroti sekojoši:

- **Funkcionālais tekstilmateriāls** – tekstilmateriāls, kam piešķirtas funkcijas ar materiāla, sastāva, struktūras un/vai apstrādes palīdzību.
- **Intelektiskais tekstilmateriāls jeb viedtekstilmateriāls** – funkcionālais tekstilmateriāls, kas aktīvi mijiedarbojas ar apkārtni, t. i., reaģē uz apkārtnes izmaiņām vai tām pielāgojas.
- **Intelektiskā tekstilsistēma** – tekstilsistēma, kas parāda iepriekš ieplānotu/paredzētu un pielietojamu atbildes reakciju uz kāda vides faktora izmaiņām vai ārēju signālu.

Literatūrā viedtekstilijām tiek iedalītas nosacītas intelekta pakāpes, respektīvi, to spējas reaģēt uz ārēju kairinājumu:

- *pasīvā* (piemēram, drānā integrētas optiskās šķiedras un elektrovadoši pavedieni, kas bez papildus iedarbības, piemēram, strāvas plūsmas, nekādas noteiktas funkcijas neveic),
- *aktīvā* (piemēram, agregātstāvokli mainošas vielas, integrētas tekstildrānā; drānas ar integrētiem sensoriem u.tml., kas reaģē uz klimata izmaiņām vai kādiem fizikāliem faktoriem, mainot savas īpašības vai parametrus),
- *īpaši jeb ultra aktīvā* (piemēram, spēja saglabāt apģērba komforta līmeni, ekstrēmi mainoties apkārtējās vides apstākļiem; drānas struktūrā ietverti elektronikas elementi, kas darbojas līdzīgi kā mākslīgais intelekts, šajā gadījumā tekstilija spēj nosacīti „izvērtēt” situāciju un atbilstoši mainīt noteiktus parametrus vai īpašības).

Viedtekstiliju pielietojuma lauks un nozares ir ļoti plašas, sākot ar vizuāliem efektiem izklaidei un līdz pat sarežģītu funkciju veiktspējai veselības aprūpē un drošībai ekstremālos apstākļos. Kopumā tekstilijas, atbilstoši to funkcijām, pēc gatavības pakāpes ražošanai var iedalīt:

- *Gatavas ražošanai.* Šeit pakārtojas tekstilijas ar uzlabotām vai optimizētām īpašībām, piemēram, ūdens- un vēju atgrūdošas drānas, gaisu un tvaikus caurlaidīgi materiāli, drānas ar uzlabotu izturību: krāsnoturību, plēšanas stiprību, karstum- un aukstumizturību, kā arī funkcionālie tekstilmateriāli, piemēram, smaržas izplatošie un smakas ierobežojošie, atstarojošas drānas un materiāli ar aizsardzību pret UV vai elektromagnētisko starojumu, drānas ar uzlabotu valkāšanas komfortu, intelektiskie termoregulējošie tekstilmateriāli, piemēram, ar PCM kapsulām.
- *Attīstības stadijā.* Šeit pakārtojas funkcionālie vai intelektiskie tekstilmateriāli no jauna veida šķiedrām un intelektiskās tekstilsistēmas ar elektroniskām papildu funkcijām.

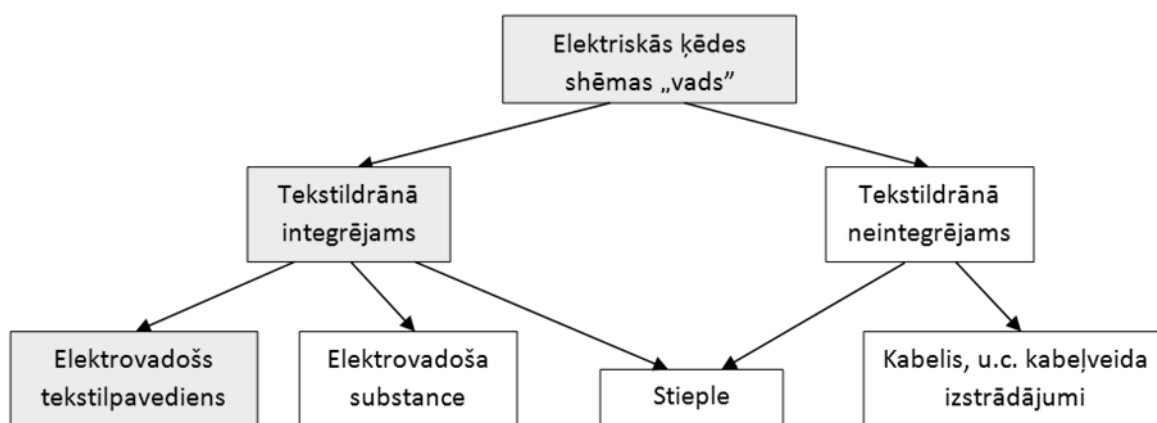
Pie prasībām, kas jāparedz intelektiskajiem tekstilmateriāliem, ir pieskaitāmas šādas īpašības: veiktspēja, uzticamība, ilgmūžība un informācija par produktu un/vai vides aspekts. Visproblemātiskākais un vēl arvien pilnībā neizpētais lauks viedtekstiliju jomā ir ekoloģiskās problēmas gan valkāšanas procesā, piemēram, elektromagnētiskā lauka starojuma izraisītā negatīvā ietekme uz dzīvām būtnēm vai notekūdeņu piesārņošana, gan arī izstrādājumu pārstrāde pēc ekspluatācijas perioda (elektroniku kaitīgums apkārtējai videi, atkritumu palielināšanās u.tml.).

Standartā CEN/TR 16298:2011 noteikts: „Intelektiskiem tekstilmateriāliem un tekstilsistēmām vajadzētu izpildīt prasības, kas tiek izvirzītas līdzīgiem „ne-intelektiskajiem” materiāliem un sistēmām, un papildus arī specifiskās prasības, kas saistītas ar to īpašajām funkcijām. Prasību novērtējums būtu jāveic saskaņā ar nosacījumiem, kas ir raksturīgi paredzētajam pielietojumam, metodei jābūt atbilstošai, atkārtojamai un salīdzināmai, un tirgū pieejamai. Jābūt ietvertiem atbilstošiem Eiropas un nacionālajiem noteikumiem, kā arī apstiprinātiem standartiem.” Intelektiskajiem tekstilmateriāliem ir jāparedz vismaz viens no standartā minētajiem aspektiem: veiktspēja, uzticamība, ilgmūžība un informācija par produktu un vides aspekts.

3. ELEKTROVADOŠU SISTĒMU INTEGRĒŠANA TEKSTILIJĀ

Elektrovadošu elementu integrēšanai tekstilizstrādājumos lielākoties tiek izmantotas 3 metodes: integrēšana drānas struktūrā; elektronikas elementu adaptācija ievietošanai apģērba kabatās, šūtos tuneļos; kombinācija jeb elementu integrācija drānas struktūrā šķiedru līmenī. Katrai no metodēm ir savas priekšrocības un trūkumi: integrācijas metode nodrošina labāku valkāšanas komfortu un drānas īpašības, savukārt adaptācijas metode pieļauj elementu nomaiņu, labošanu, apģērba reciklēšanu tā pēcekspluatācijas fāzē.

Atkarībā no īpašībām praksē lietotie elektrovadošie materiāli var būt integrējami gan tekstilmateriāla struktūrā, gan tā virsmā (skat. 1. att.). Piemēram, kabelveida izstrādājumi nodrošina labu un vienmērīgu strāvas plūsmu, toties nav piemēroti integrēšanai drānas struktūrā, turpretī smalkas metālu stieples vai metālu monofilamenti pētījumos izmantoti arī integrēšanai drānā. Savukārt viens no piemērotākajiem materiāliem elektrovadošo joslu, kā arī elektrovadošu elementu izgatavošanai ir elektrovadošie pavedieni, jo tie ir piemēroti integrēšanai drānās ar dažādām tekstiltehnoloģijām. Tomēr jāatzīmē, ka šādiem pavedieniem mēdz būt augstāka elektriskā pretestība nekā metālu vadiem. Tā rezultātā šobrīd komerciāli iegūstamie elektrovadošie pavedieni ir vairāk piemēroti elektriskajām sistēmām ar zemu jaudas patēriņu.

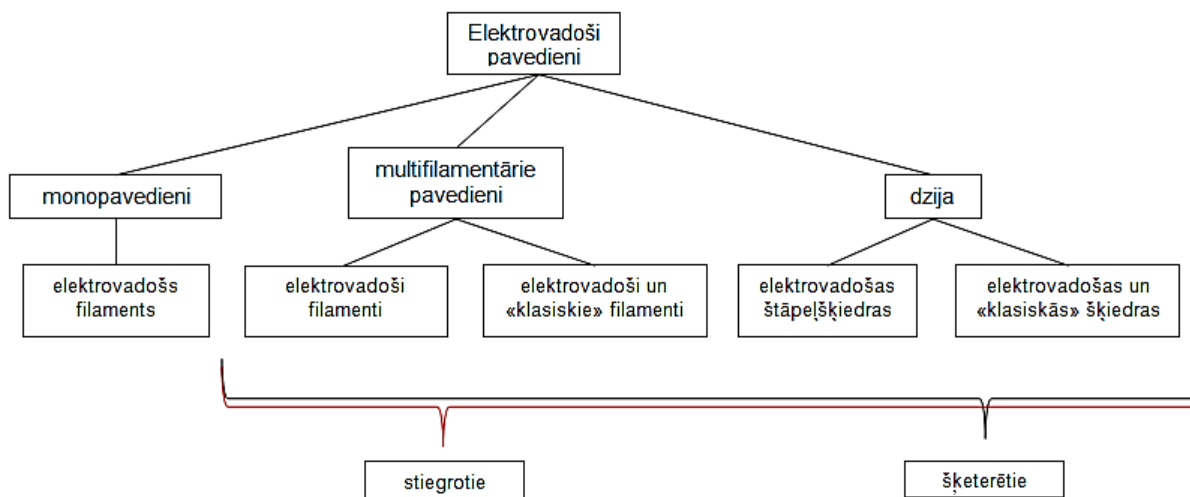


1. att. „Vada” aizvietošanas veidi viedtekstilijās

Elektrovadošu tekstiljoslu un drānu izolēšana ir jāpiemēro atbilstoši paredzētajai elektrovadošā materiāla funkcijai, piemēram, drānas, kas paredzētas elektromagnētiskā lauka ekranēšanai neizolē, savukārt elektrovadošu elementu savienotājjoslas ieteicams izolēt, lai pasargātu no ārējās vides iedarbības (mitruma, berzes) un pasargāšanai no joslu savstarpējas saskares, kā arī saskares ar ķermeni.

4. ELEKTROVADOŠI TEKSTILPAVEDIENI

Elektrovadošos pavedienus izgatavo pēc līdzīgām metodēm, kā „klasiskos” tekstilpavedienus (skat. 2. att.), elektrovadošās īpašības piešķirot ar ķīmisko vai dabīgo šķiedru pavedienu aptīšanu, šķeterēšanu vai stiegrošanu ar elektrovadošu pavedienu, vai metāla stiepli, pārklājot polimēru filamentus ar metālu daļiņām vai filamentu izgatavošanai paredzētajai polimēru masai pievienojot metālu daļiņas.



2. att. Elektrovadošu pavedienu iedalījums pēc struktūras

Kā elektrovadošu komponenti izmanto metālu, elektrovadošu polimēru vai oglekļa šķiedras. Komerciāli visplašāk pieejami ir ar sudrabu pārklāti poliamīda pavedieni un tērauda multifilamentārie pavedieni.

Katrs ražotājs specializējas noteikta veida elektrovadošo pavedienu izgatavošanā, piemēram, Amerikas/Vācijas ražotājs *Statex* un Vācijas *Imbut* izgatavo ar sudrabu pārklātus poliamīda pavedienus, Francijas ražotājs *Tibtech* un Beļģijas *Bekaert* – nerūsējošā tērauda multifilamentāros pavedienus, tur pretim Amerikas ražotājs *Syscom* darina ar divām atšķirīgu metālu kārtām pārklātus Zylon vai Vectran izturīgus elektrovadošus multifilamentāros pavedienus, ko izmanto arī tehniskajās tekstilijās.

5. MIKROKLIMATA REGULĒŠANA AR APĢĒRBU

Cilvēka apģērba komfortu nosaka gan tā subjektīvā psiholoģiskā uztvere, gan arī fizioloģiskie faktori, un visus ietekmējošos faktoros ir sarežģīti definēt.

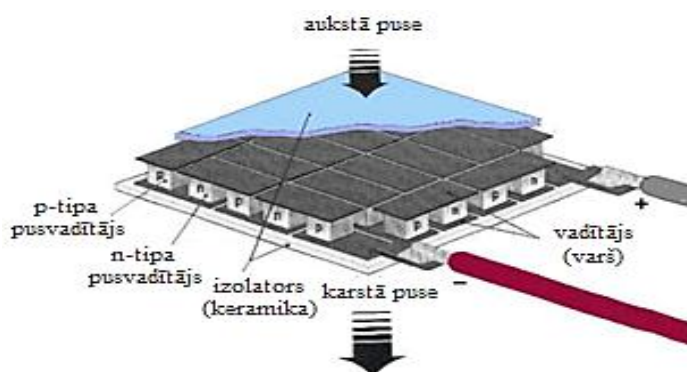
Paaugstināts gaisa mitrums apgrūtina cilvēka siltumatdevi, jo sviedri no cilvēka ādas neiztvaiko. Darba vidē siltuma līmeni parasti nosaka ar periodisko globālā mitruma un temperatūras līmeņa indeksu (WBGT) tabulu. Fiziskas aktivitātes paaugstinātas vides temperatūras un augsta gaisa relatīvā mitruma apstākļos var negatīvi ietekmēt cilvēka fizisko un psihisko veselību. Ķermeņa dzesēšanas veidus var iedalīt konvektīvajā dzesēšanā (aukstā gaisa kustības rezultātā) un tvaiku emisijas rezultātā (iztvaikošana sausā siltā gaisā).

Cilvēka apģērba komfortu parasti izsaka ar vielmaiņas koeficientu (Met) un apģērba siltuma izolācijas koeficientu (Clo). Apģērba komforts pamatā tiek novērtēts pēc gaisa temperatūras starp apģērba pirmo un otro kārtu un relatīvā gaisa mitruma zem apģērba, kas tiek noteikti fiziskas aktivitātes laikā. Apģērba pētniecībā var izdalīt sekojošus posmus: fizikālā problēmjaudājumu analīze (teorētiska drānas analīze); biofizikālā elementu analīze (prognozējošā modelēšana); cilvēka fizioloģiskās pētniecības „legalizēšana” (klimata kameras, manekeni, apģērba prototips); kontrolētie lauka izmēģinājumi (atbilstošos faktiskajos apstākļos); patēriņa pētījumi (testa tirdzniecība).

Pasīvajā mikroklimata regulēšanā ar apģērbu nozīmīga ir šķiedru un drānas struktūra, savukārt aktīvajā termoregulēšanā – materiāla spēja reaģēt uz ārējās vides temperatūras izmaiņām, nodrošinot temperatūras līdzsvaru ķermeņa tuvumā. Mikroklimata dzesēšanai ar apģērbu pamatā izmanto dzesējošās sistēmas ar dzesējoša šķidrums plūsmu, ar gaisa plūsmu, ar ledus vai želejas paketēm, ar agregātstāvokli mainošas vielas paketēm vai materiālu tehnoloģijas, kuras darbība pamatojas uz iztvaikošanas procesu. Parasti šie izstrādājumi ir pieslēgti stacionāram strāvas avotam, tie ir smagi, ar īslaicīgu iedarbību un nav regulējama to temperatūra. Kā intelektiskais termoregulējošais tekstilmateriāls pieminama drāna ar integrētām agregātstāvokli mainošām mikrokapsulām, tomēr arī šī materiāla darbības temperatūra ir ierobežota un tam nepiemīt speciāls dzesēšanas efekts.

6. TERMOREGULĒJOŠS APĢĒRBS AR IEVIETOTU PELTJĒ ELEMENTU

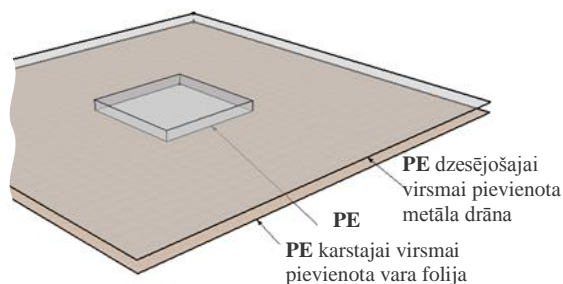
Ņemot vērā apģērba siltuma komforta nozīmi cilvēka darba spēju uzturēšanā, pasaulē veikto zinātnisko pētījumu rezultātā ir tikuši patentēti vairāki apģērba prototipi, kuros ievietotas sistēmas ar Peltjē elementiem (Peltjē elements - elektrotermiskais pārveidotājs, kas uzrāda temperatūras starpību, caur elementu plūstot strāvai, vai, rodoties temperatūras starpībai, uzrāda strāvas plūsmu, skat. 3. att.): sistēmas ar vairākiem Peltjē elementiem; ar siltummaiņu sistēmām; ar cauruļvadu sistēmu dzesējošā šķidruma plūsmai; ar gaisa kondicionieri. Katrai no šādām sistēmām ir minētas arī norādes uz paredzamiem trūkumiem apģērba valkāšanas un kopšanas procesā, piemēram, daudz detaļu sarežģīt sistēmas ievietošanu apģērbā, šķidrās vielas var noplūst, kustīgām detaļām lūstot. Ir veikti arī pētījumi Peltjē elementa integrēšanai drānas struktūrā, tomēr pētījumu rezultāti praksē demonstrē neefektīvu temperatūras diferences radīšanu uz abām drānas virsmām. Šāda drāna efektīvāk pilda enerģijas ražošanas funkciju.



3. att. Peltjē elementa princips [avots: <http://ixbtlabs.com/articles/peltiercoolers>]

Lai izvairītos no sarežģītas konstrukcijas detaļu lūšanas un dzesējošā šķidruma noplūšanas, izveidota mikroklimatu regulējoša apģērba koncepcija, kur siltuma aizvadīšanas funkcija balstās uz siltuma vadīšanu cietvielās. Eksperimentu sērijā lietoto materiālu un sensoru izvietojums, lai atrastu piemērotāko cietvielas materiālu siltuma aizvadīšanai no abām Peltjē elementa virsmām, parādīts 4. att. („Peltjē elements” apzīmēts ar „PE”).

Eksperimentu laikā konstatēts, ka metāla stieple drānas, kā arī poliestera audums ar vara pārklājumu nespēj nodrošināt efektīvu siltuma aizvadīšanu, savukārt 0,8 mm bieza vara folija nodrošina nepieciešamo siltuma aizvadīšanas efektu pat 8 cm attālumā (skat. 1. tab.).



a)



b)

1. PE karstā puse
2. PE aukstā puse
3. 4 cm attālumā no PE aukstās puses
4. 8 cm attālumā no PE aukstās puses

4. att. Dzesējošās sistēmas koncepcija ar metāla drānu siltuma aizvadīšanai no Peltjē elementa (PE) aukstās puses un vara foliju siltuma aizvadīšanai no siltās puses: a) sistēmas shematiskais attēlojums; b) sensoru izvietojums uz sistēmas materiālu siltumvadītspējas noteikšanai

1. tabula

Peltjē elementam pievienotu metāla materiālu siltumvadītspējas salīdzinājums (vides $t^{\circ} 22^{\circ}\text{C}$, $U=1,9\text{ V}$ un $I=0,6\text{ A}$; ilgums 20 ~ 30 min)

Nr. P.k.	Metālu materiāla raksturojums			Max t° (C) pazemināšanās attālumā no PE aukstās virsmas	
	Drānas/sieta materiāls	Drānas blīvums, (audi/šķēri)/cm	Stieplu diametrs, mm	4 cm	8 cm
1.	tērauds	130/118	0,11/0,13	0°	0,5°
2.	bronza	55/55	0,112/0,07	0°	1°
3.	bronza	97/97	0,04/0,04	0°	1°
4.	bronza	16/14	0,28/0,28	0°	2°
5.	varš	8/8	0,28/0,28	1,5°	0,5°
6.	varš	7/7	0,50/0,50	2°	0,5°
7.	vara folija, 2 mm bieža			4°	2°

Iepriekšējo eksperimentu rezultātā izvirzīti uzdevumi tālākai pētniecībai:

- 1) Elektrību vadošā tīkla integrēšana apgērba drānā;
- 2) Apgērba prototipa ar integrētu/adaptētu dzesējošo sistēmu darbības efektivitātes pārbaude imitētos fiziskas aktivitātes un mikroklimate apstākļos.

7. EKSPERIMENTU METODES

Elektrovadošo pavedienu īpašību noteikšanai veikti sekojoši eksperimenti laboratorijas apstākļos:

- ✓ Pavedienu elektriskās pretestības vienmērības koeficienta un elektriskās pretestības izmaiņu noteikšana stiepes ietekmē (pie slodzes 20 cN);
- ✓ Elektriskā sprieguma zudumu mērījumi pie 50 mA liela strāvas stipruma;
- ✓ Eksperimenti elektrovadošo pavedienu piemērotības šūšanai kā adatas vai/un kuģīša diegu novērtēšanai;
- ✓ Elektrovadošu pavedienu piemērotības adīšanai ar rokas adāmmašīnu novērtēšana un pavedienu elektriskās pretestības izmaiņu noteikšana adījumā stiepes ietekmē (slodze līdz 1000 g);
- ✓ Elektrovadošu elementu – spiedslēdža un rezistīvā sildelementa - izgatavošana;
- ✓ Mazgāšanas ietekmes uz elektrovadošu pavedienu elektrovadītspēju (10 mazgāšanas ciklos, saudzīgā režīmā, 30 min) novērtēšana.

Kopumā visos eksperimentos izmantoti ražotāju „Statex” un „Imbut” ar sudrabu pārklāti multifilamentārie poliamīda pavedieni ar dažādu lineāro blīvumu un struktūru, un ražotāja „Tibtech” nerūsējošā tērauda multifilamentārie pavedieni un poliestera un tērauda šķiedru dzija (skat. 2. tab.).

2. tabula

Ekspērimētos izmantotie pavedieni

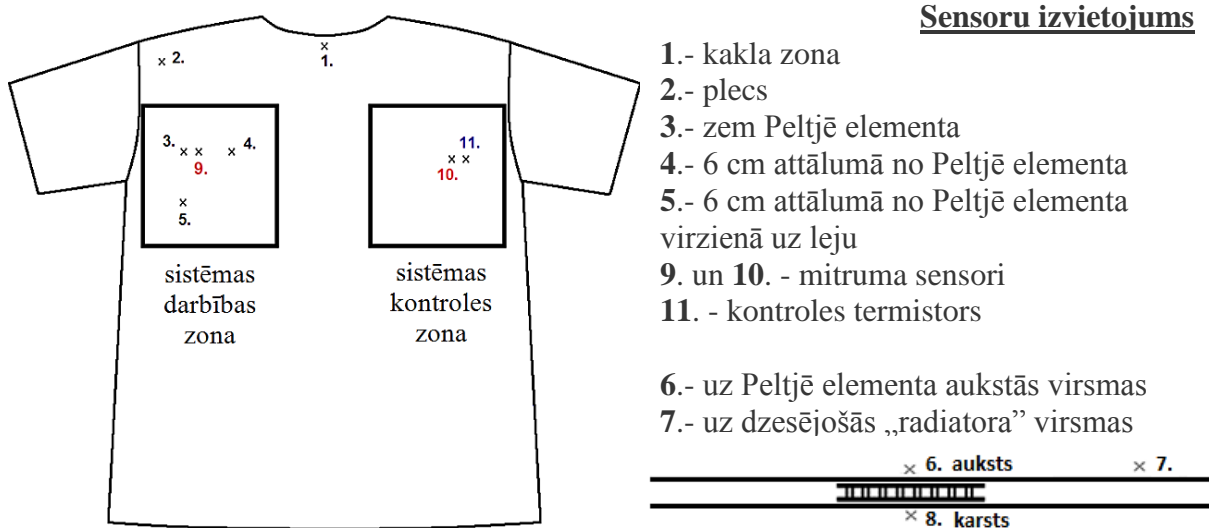
Nr. p. k.	Pavediena apzīmējums	Lineārais blīvums (tex)	Pavediena struktūra	Papildu apstrāde
Nerūsējošā tērauda multifilamentārie pavedieni				
1.	Thermotech N-14	500	mazgrodots pavediens	PTFE impregnējums
2.	Thermotech N-30	240	divkārtīgs, šķeterēts pav.	-
Ar sudrabu pārklāti multifilamentārie poliamīda pavedieni				
3.	Elitex I 234dtex/f34	23,4	mazgrodots pavediens	izolācijas pārklājums
4.	Elitex HE 234dtex/f34	23,4	mazgrodots pavediens	stieģrojums ar elastīgu pavedienu
5.	Elitex 110dtex/f34	11,0	mazgrodots pavediens	-
6.	Elitex 110dtex/f34x2	11,0 x 2	divkārtīgs, šķeterēts pav.	-
7.	Shieldex 235dtex/f34	23,5	mazgrodots pavediens	-
8.	Shieldex 235dtex/f34x4	23,5 x 4	četrkārtīgs, šķeterēts pav.	-
9.	Shieldex 110dtex/f34x2	11 x 2	divkārtīgs, šķeterēts pav.	-
10.	Shieldex 110dtex/f34	11	mazgrodots pavediens	-
Tērauda (20%) un poliestera (80%) štāpeļšķiedru dzija				
11.	Nm10/3	33,3	trīskārtīga, šķeterēta dzija	-

Izveidotās termoregulācijas sistēmas darbība un Peltjē elementa ar pievienotām vara folijām siltuma aizvadīšanas efektivitāte novērtēta pēc teorētiskas, prognozējošas analīzes un cilvēka fiziskas aktivitātes eksperimentos. Analīzē ņemts vērā apģērbu izolācijas koeficients un vielmaiņas koeficients vidējas un smagas fiziskas slodzes apstākļos.

Lai pārbaudītu termoregulācijas sistēmas darbību fiziskas slodzes apstākļos, ir plānotas vairākas eksperimentu sērijas ar sākotnēji izgatavoto un vēlāk optimizēto apģērbā ievietoto termoregulācijas sistēmu. Eksperimenti veikti laboratorijas apstākļos atšķirīgās gaisa temperatūrās (20-26° C), pie fiksēta gaisa relatīvā mitruma (~60 %) un gaisa kustības ātruma (>0,1 m/s).

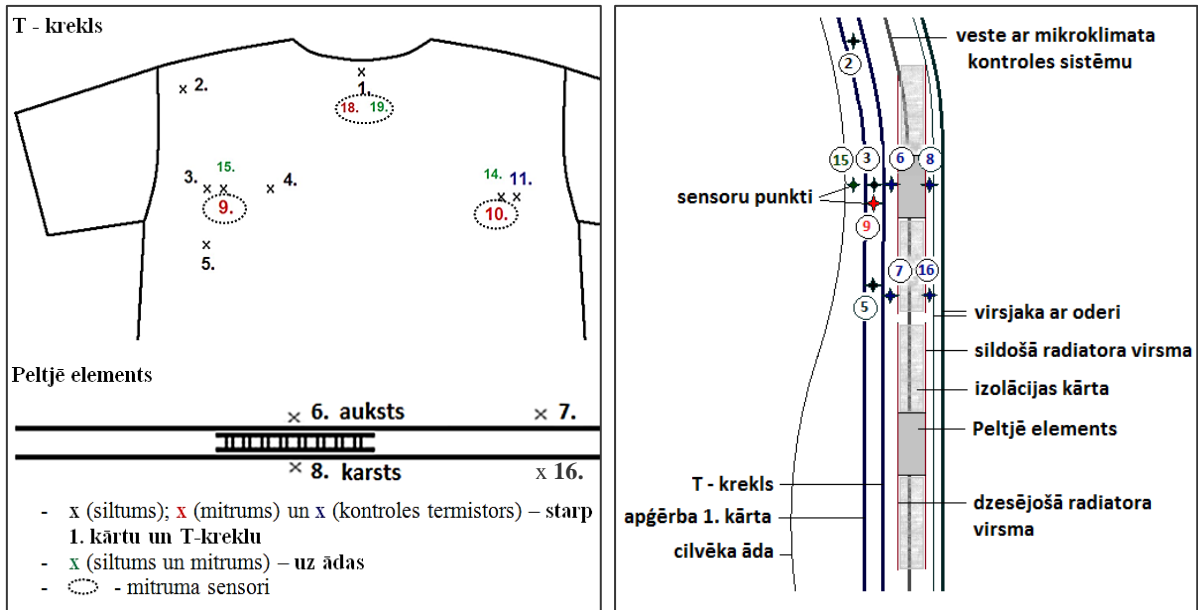
Kopumā var nodalīt 3 eksperimentu posmus:

1) Dzesējošās sistēmas darbības efektivitātes noteikšana un ietekmes novērtēšana uz ķermeņa mikroklimate rādītājiem (temperatūra, mitrums) 11 punktos (skat. 5. att.).



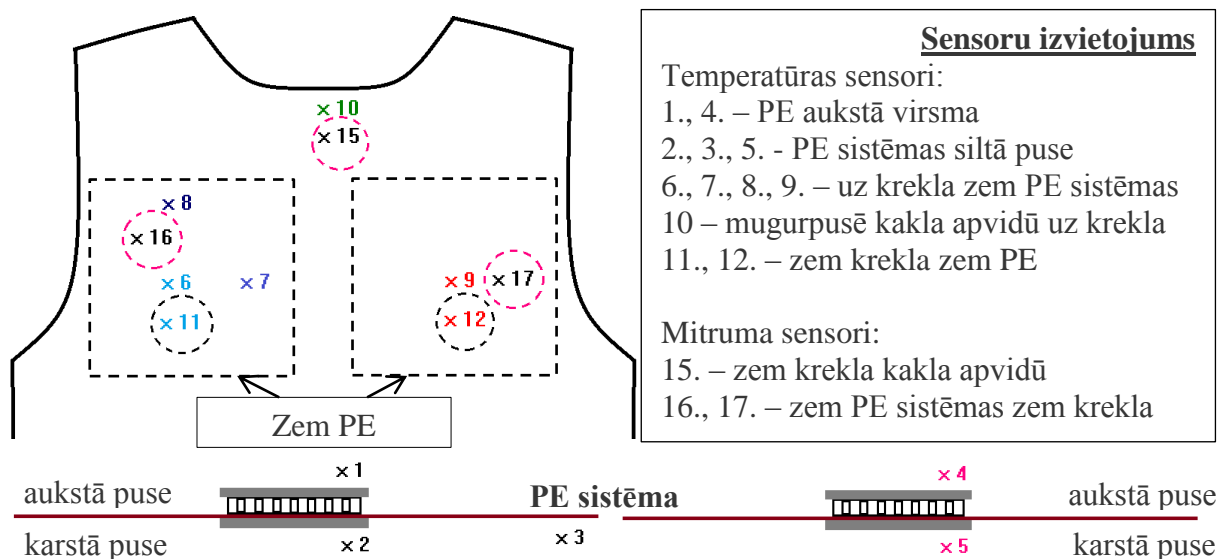
5. att. Sensoru izvietojuma shematisks attēlojums uz apģērba pirmās kārtas 1. eksperimentu sērijā

2) Termoregulācijas sistēmas ar Peltjē elementiem (2 un 4) noklātā laukuma lieluma ietekme uz mikroklimate rādītājiem, kur sistēmas darbības un efektivitātes novērtēšanai mērījumi veikti 15 punktos (sensoru izvietojumu skat. 6. att.). Mērījumi veikti mikroklimate telpā zem apģērba 1. kārtas, starp apģērba 1. kārtu un kokvilnas kreklu un uz dzesējošās Peltjē elementu sistēmas cilvēka mikroklimate parametru izmaiņu noteikšanai ķermeņa miera stāvoklī un fiziskas aktivitātes laikā.



6. att. Sensoru izvietojums apģērba kārtās 2. eksperimentu sērijā: a) pretskatā; b) šķēsgriezumā

3) Optimizētās sistēmas ar rekuperācijas funkciju (daļēja enerģijas atgriešana strāvas ražošanai) efektivitātes novērtēšana fiziskas aktivitātes laikā (15 min skrējieni, ātrums 7 km/h, sensoru izvietojumu skat. 7. att.). Mērījumi veikti mikroklimate telpā zem apģērba pirmās kārtas, starp apģērba pirmo kārtu un termoregulējošo apģērbu un uz dzesējošās Peltjē elementu sistēmas cilvēka mikroklimate parametru izmaiņu noteikšanai ķermeņa miera stāvoklī un fiziskas aktivitātes laikā, kā arī sistēmas ietekmes uz cilvēka mikroklimate novērtēšanai.

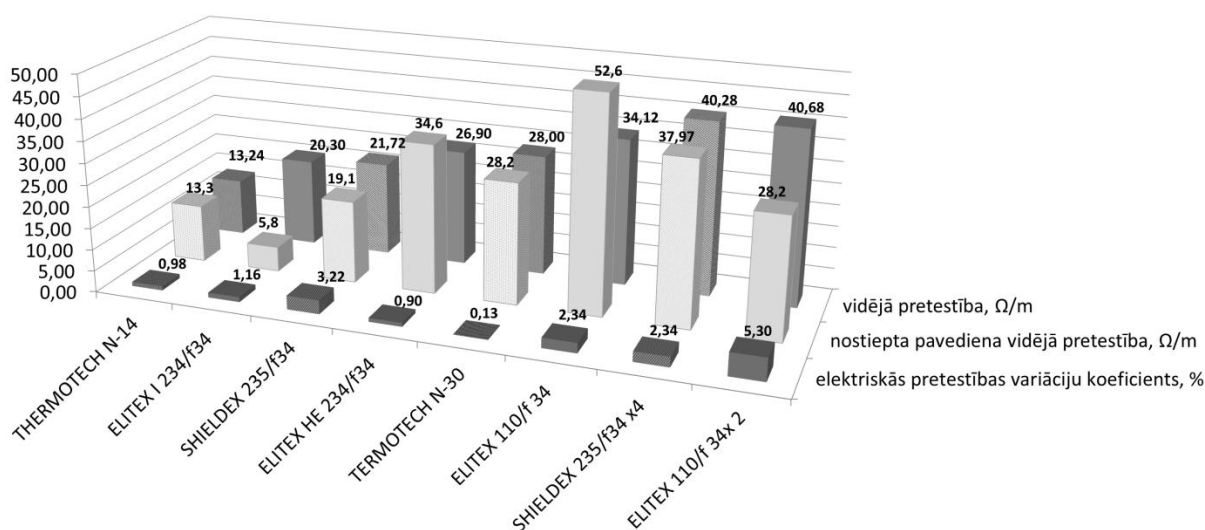


7. att. Sensoru izvietojuma shēma

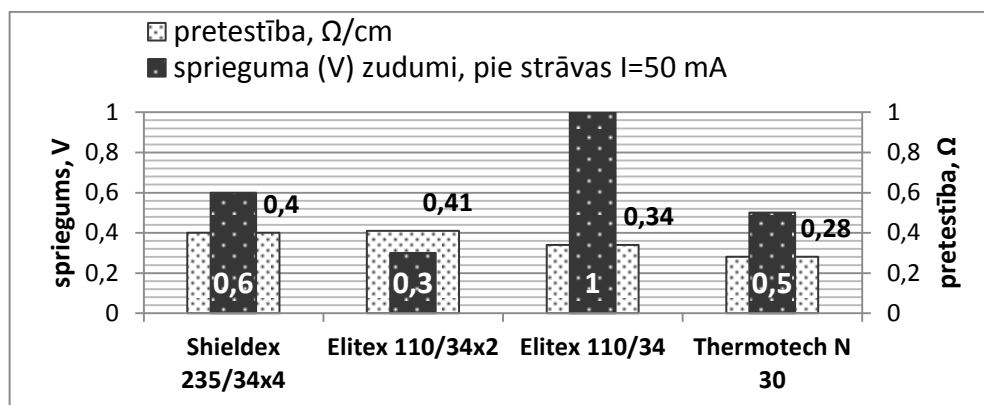
8. PĒTĪJUMU REZULTĀTI

Eksperimentāli testējot pavedienus, lai apzinātu to īpašības, noteiktu piemērotību atsevišķu elektrovadošu elementu izgatavošanai un noskaidrotu īpašību noturību ekspluatācijā, var veikt sekojošu kopsavilkumu (skat. 3. tab.):

- ✓ Elektriskā pretestība viszemākā ir multifilamentārajam tērauda pavedienam Thermotech N-14 (13 Ω/m), savukārt ar sudrabu pārklātajiem poliamīda pavedieniem viszemākā tā ir Elitex I 234 dtex/f34 (izolēts) un Elitex 235 dtex/f34 (20 ~ 22 Ω/m);
- ✓ Variāciju koeficients elektriskajai pretestībai viszemākais (vienmērīgākā pretestība pavediena garumā brīvā stāvoklī) ir multifilamentārajam tērauda pavedienam Thermotech N-30 (0,13), Thermotech N-14 (0,98) un ar elastīgu pavedienu stiegrotajam ar sudrabu pārklātajam poliamīda pavedienam Elitex HE 234dtex/f34 (0,9);
- ✓ Nostiepta pavediena elektriskās pretestības izmaiņas nav konstatētas tikai multifilamentārajiem tērauda pavedieniem, pārējiem tā mainās individuāli (8. att.);
- ✓ Sprieguma zudumi (pie 50 mA strāvas) vismazākie ir ar sudrabu pārklātajam Elitex 110 dtex/f34x2 pavedienam – 1,5 V/20 cm (9. att.);
- ✓ Piemēroti šūšanai ar šujmašīnu kā kuģīša un adatas diegs ir Elitex 110 dtex/f34x2 un Shieldex 110 dtex/f34x2 pavedieni, bet kā kuģīša diegs - lielākā daļa ar sudrabu pārklātie poliamīda pavedieni;
- ✓ Piemēroti adīšanai ir ar sudrabu pārklātie poliamīda pavedieni bez izolācijas un poliamīda dzija ar metāla štāpeļšķiedrām (piemērota arī sensoru izgatavošanai).

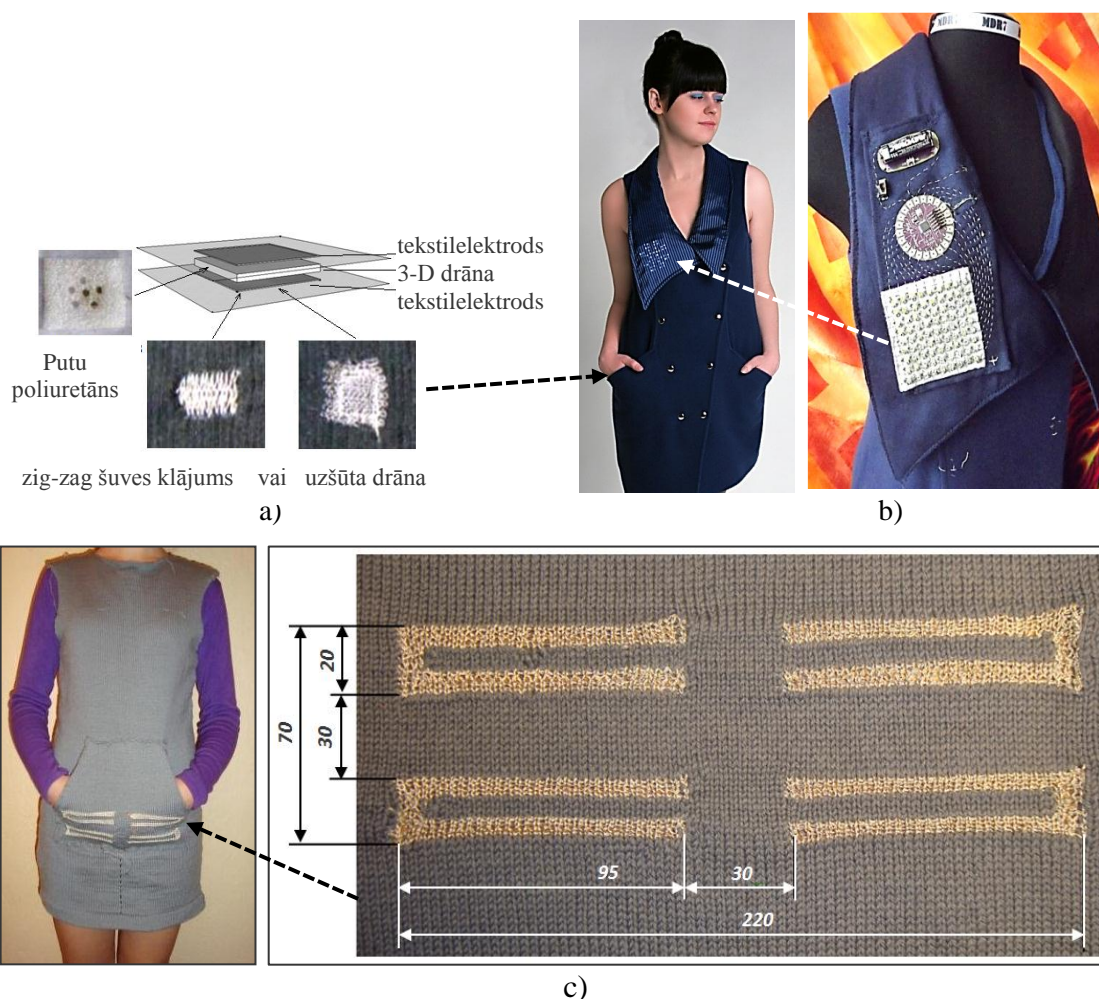


8. att. Elektrovadošu pavedienu elektriskās pretestības variāciju koeficients, vidējā elektriskā pretestība brīvā un nostieptā stāvoklī



9. att. Pavedienu sprieguma zudumi pie strāvas stipruma $I=50$ mA uz 20 cm pavediena garuma.

Ar sudrabu pārklātais poliamīda pavediens Elitex 110 dtex/f34x2 ir piemērots gan šūšanai, gan adīšanai, kā arī uzrāda optimālas elektriskās un ekspluatācijas īpašības, tādēļ tas ir izmantots pamatā elektrovadošu sistēmu integrēšanai gaismu izstarojošos tērpos, kā arī rezistīvā sildelementa izgatavošanai (skat. 10. att.).

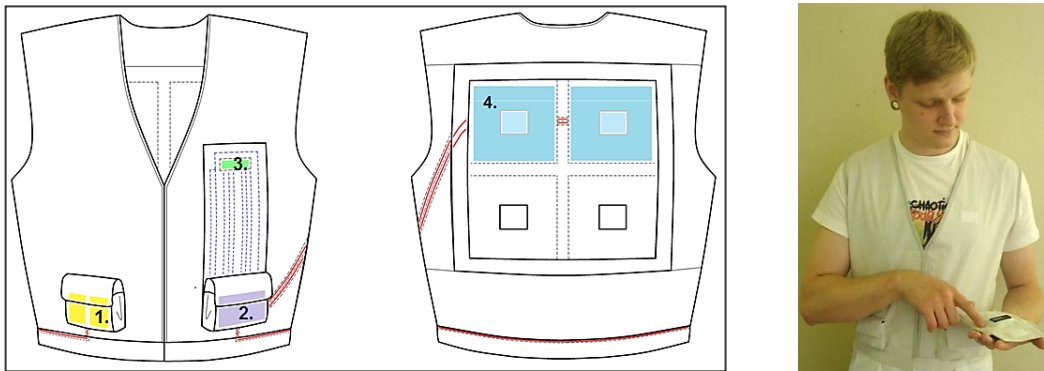


10. att. Elektrovadoša tekstilpavediena integrēšana apģērbā: a) šūts displejs un elementus savienojoši ceļņi; b) šūts spiedslēdzis; c) adīts rezistīvs sildelements

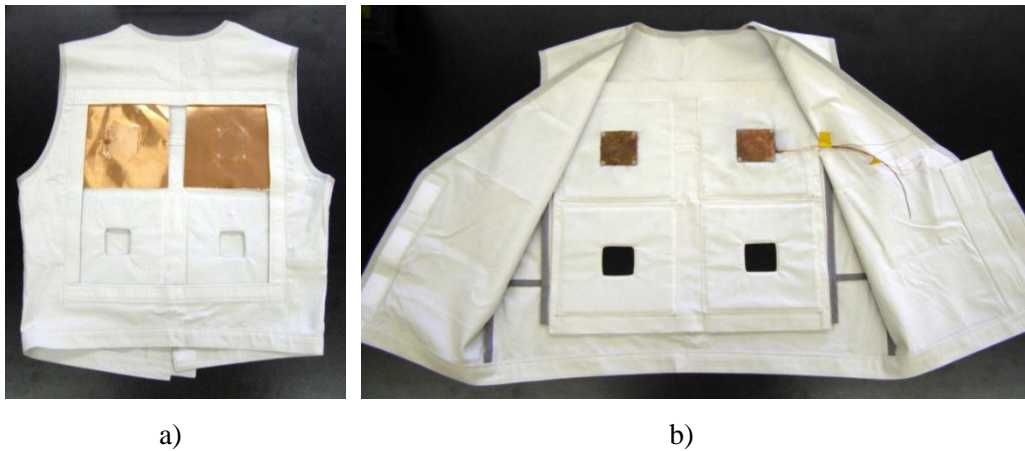
Testēto elektrovadošo pavedienu īpašību apkopojums

Nr. p. k.	Pavediena apzīmējums	Elektriskā pretestība, Ω/m	Variāciju koeficients (pretestībai)	Nostiepta pavediena (ar 20 g) pretestības izmaiņas, %	sprieguma zudumi pie $I=50$ mA, V/m	Piemērotība šūšanai ar šujmašīnu	Piemērotība adīšanai ar adāmmašīnu	Piemērotība elementu izgatavošanai
Nerūsejošā tērauda multifilamentārie pavedieni								
1.	Thermotech N-14	13	0,98	0	<i>nav noteikts</i>	ar papildu apdari	nav piemērots	elektrovadoša josla, sildelements
2.	Thermotech N-30	28	0,13	0	2,5	kuģīša diegs	daļēji piemērots	elektrovadoša josla, sildelements
Ar sudrabu pārklāti multifilamentārie poliamīda pavedieni								
3.	Elitex I 234dtex/f34	20	1,16	(-)71	<i>nav noteikts</i>	ar papildu apdari	nav piemērots	elektrovadoša josla
4.	Elitex 235dtex/f34	22	3,22	(-)14	<i>nav noteikts</i>	kuģīša diegs	<i>nav noteikts</i>	šūts elektrods un josla
5.	Elitex HE 234dtex/f34	27	0,9	(+)30	<i>nav noteikts</i>	kuģīša diegs	piemērots	elastīga elektrovadoša josla
6.	Elitex 110dtex/f34	34	2,34	(+)56	5	kuģīša diegs	piemērots	šūts elektrods un josla, adīts sildelements
7.	Elitex 110dtex/f34x2	41	5,3	(-)32	1,5	adatas un kuģīša diegs	piemērots	šūts elektrods un josla, adīts sildelements
8.	Shieldex 235dtex/f34x4	40	2,34	(-)5	3	kuģīša diegs	<i>nav noteikts</i>	šūts elektrods un josla, adīts sildelements
9.	Shieldex 110dtex/f34x2	~ 850	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	adatas un kuģīša diegs	piemērots	<i>nav noteikts</i>
10.	Shieldex 110dtex/f34 Z	> 2000	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	kuģīša diegs	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>
Tērauda un poliestera štāpeļšķiedru dzija								
11.	Nm10/3	> 1000	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	<i>nav noteikts</i>	ar papildus apdari	piemērots	adīts stiepes sensors

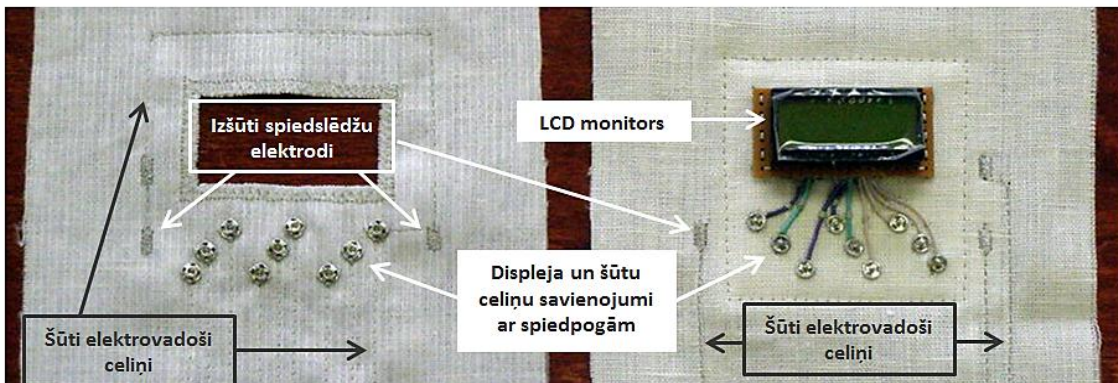
Elektrovadošie mikroklimata regulācijas sistēmas komponenti ievietoti apģērbā, izmantojot integrēšanas un adaptācijas metodes: komunikācijas panelī integrēti šūti elektrovadoši celiņi (šūti ar elektrovadošiem pavedieniem, skat. 13. att.) un spiedslēdži, savukārt elektronikas detaļas: sistēmas kontroles bloks, litija jonu akumulatori, LCD displejs ievietoti kabatās, bet Peltjē elementu sistēma - speciāli šūtā detaļā, kas apģērbam pievienojama un noņemama (skat. 11. att.: 1 – akumulatori, 2 - elektronikas kontroles bloks, 3 - LCD displejs, 4 - Peltjē elementu ar siltumu aizvadošajām folijām, 12. att.).



11. att. Sistēmai izmantoto elementu izvietojuma shēma apģērbā un tā pielietojums valkāšanā



12. att. Peltjē elementu ievietošana apģērbā: a) šūta detaļa ar izolācijas kārtu Peltjē elementu ievietošanai (izstrādes procesā); b) apģērbā ievietota Peltjē elementu sistēma



13. att. Komunikācijas paneļa detaļu apstrāde un elementu integrēšana

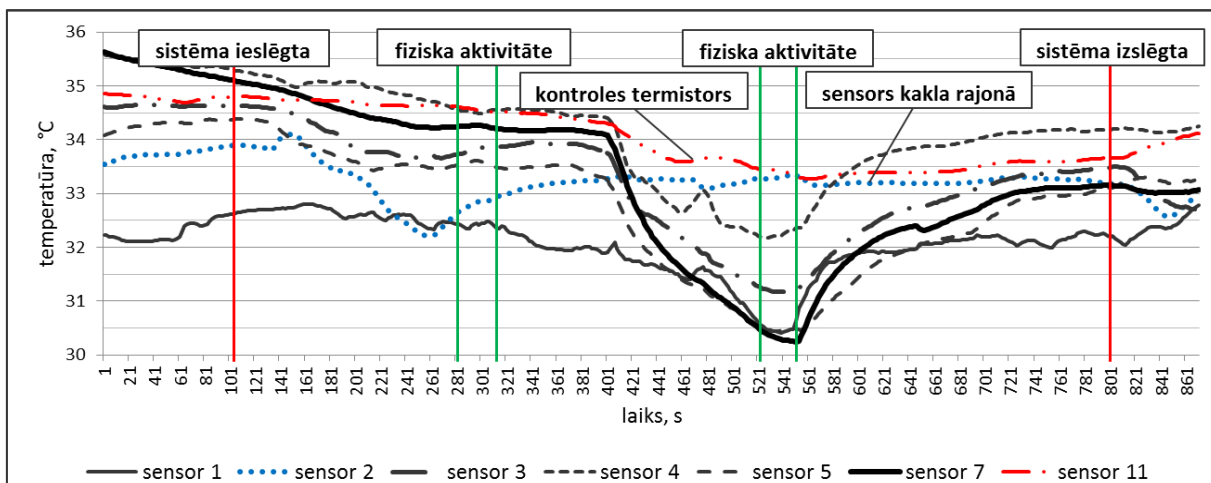
Sistēmas darbība un Peltjē elementa ar pievienotām vara folijām siltuma aizvadišanas efektivitāte ir novērtēta pēc teorētiskas, prognozējošas analīzes un eksperimentos cilvēka fiziskas aktivitātes procesā. Analīzē ņemts vērā apģērba izolācijas koeficients un vielmaiņas koeficients atbilstoši vidējai un smagai fiziskai slodzei. Analīze ļauj secināt, ka 20° C istabas temperatūrā (gaisa relatīvais mitrums 60 %, gaisa kustības ātrums >0,1 m/s) ar Peltjē elementa sistēmu iespējams aizvadīt 53 – 61 % siltumu, ko izdala ķermenis fiziskas aktivitātes laikā.

Lai pārbaudītu sistēmas darbību fiziskas slodzes apstākļos, ir veiktas eksperimentu sērijas ar sākotnēji izgatavoto un vēlāk optimizēto mikroklimatu regulējošo sistēmu. Kopumā var iedalīt 3 eksperimentu posmus:

1) **Dzesējošās sistēmas darbības efektivitātes noteikšana un ietekmes uz ķermeņa mikroklimata rādītājiem (temperatūru, mitrumu) novērtēšana.**

Ņemot vērā cilvēka termoregulācijas principus, sviedru izdalīšanās intensitātes un temperatūras zonējumu, atbilstoši sastādīts temperatūras sensoru izvietojuma plāns: temperatūras sensori (1. - 5.) izvietoti mugurdaļas kreisajā pusē lāpstiņu rajonā starp apģērba pirmo kārtu un dzesējošo apģērba, kur paredzēta dzesēšana ar Peltjē elementu. Savukārt temperatūras sensors 11 kontroles parametru iegūšanai novietots mugurdaļas labajā pusē, kur dzesēšana nav paredzēta. Temperatūras sensori 6 - 8 kalpo temperatūras izmaiņu novērošanai uz Peltjē elementa dzesējošās sistēmas ar vara foliju radiatoriem (7. nod. 5. att.).

Mērījumu diagrammā ar ieslēgtu dzesējošo sistēmu un divām fiziskajām aktivitātēm vērojams temperatūras kritums visos mērījumu punktos (izņemot kontroles pusi bez dzesēšanas un kakla rajonu) pēc pirmās fiziskās aktivitātes (skat. 14. att.), kas sasniedz savu maksimumu otrās aktivitātes laikā, kad dzesējošajā sistēmā, reaģējot uz ķermeņa mikroklimata temperatūras paaugstināšanos, notiek strauja temperatūras pazemināšanās.

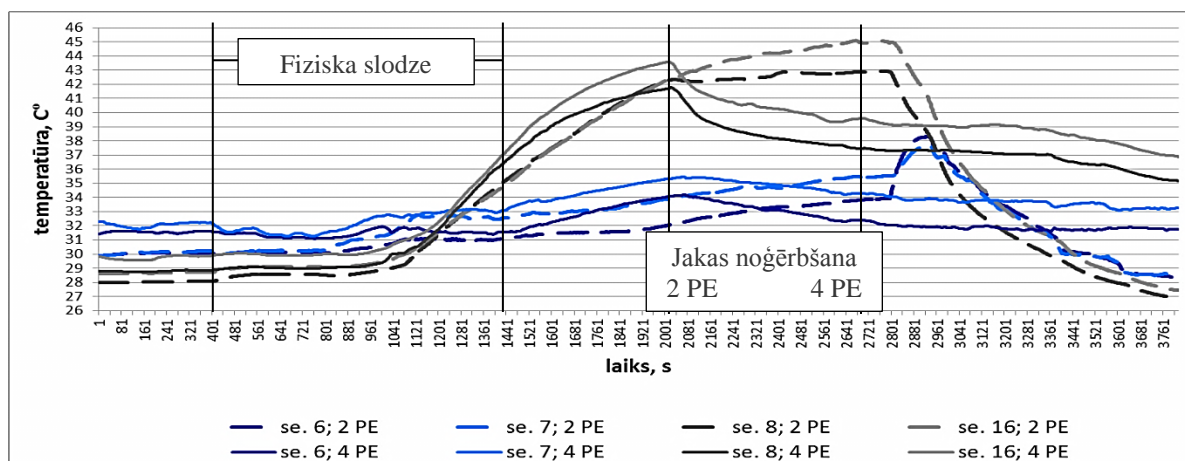


14. att. Mērījumu rezultāti ar ieslēgtu dzesējošo sistēmu

Eksperimenta rezultātā tiek konstatēts negatīvs fakts: lielās temperatūras diferences dēļ uz elementa virsmām vara folijas neizvada pietiekami ātri elementa izdalīto siltumu un sistēma pārkarst. Tas norāda uz nepieciešamību sistēmas elektroniskai optimizēšanai.

2) Sistēmas ar Peltjē elementu sistēmu (2 un 4 elementiem) noklātā laukuma lieluma ietekme uz mikroklimata rādītājiem.

Eksperiments ļauj secināt, ka temperatūra ar 4 Peltjē elementiem uz sistēmas pieaug straujāk nekā ar 2 Peltjē elementiem gan uz karstās, gan dzesējošās Peltjē elementu sistēmas virsmām (15. att. 6. temperatūras sensors atrodas uz Peltjē elementa (PE) aukstās virsmas, bet 7. – uz dzesējošās vara folijas; 8. – uz Peltjē elementa karstās virsmas un 16. – uz siltumu aizvadošās vara folijas).



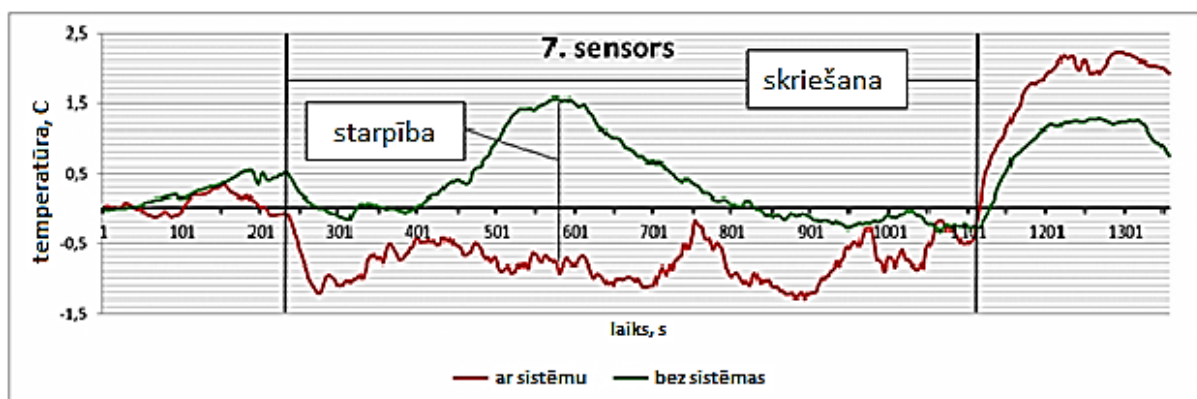
15. att. Mērījumu rezultātu salīdzinājums ar 2 un 4 Peltjē elementiem (PE)

Ar 2 Peltjē elementiem sistēma pēc skriešanas un jakas noģērbšanas atdziest ātrāk līdz zemākai temperatūrai, nekā ar 4 elementiem. Kopumā eksperimentu rezultāti liecina, ka ar Peltjē elementiem nosegtā ķermeņa laukuma palielināšana negatīvi ietekmē sistēmas ieslēgšanās ātrumu un darbību, tāpat arī Peltjē elementu sistēma apgrūtina ūdens tvaiku aizvadišanu.

3) Optimizētās sistēmas (ar rekuperāciju – daļēja enerģijas atgriešana strāvas ražošanai) efektivitātes novērtēšana fiziskas aktivitātes laikā.

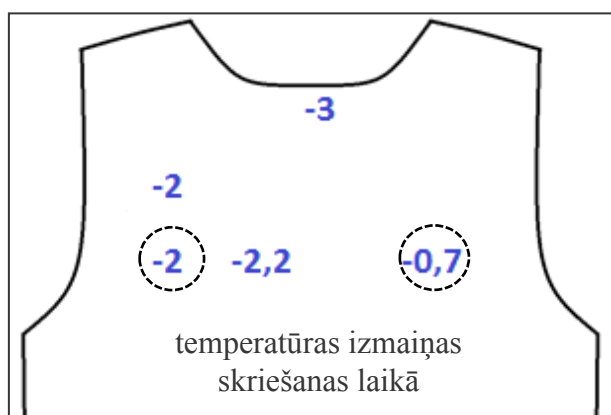
Dzesējošās sistēmas efektivitāte novērtēta attiecībā pret tādu pašu apģērbu bez elektrovadošās dzesējošās sistēmas ar Peltjē elementiem. Temperatūras mērījumi salīdzināti atsevišķi pa sensoriem (sensoru izvietojumu skat. 7. nod. 6. att.), nosakot starpību starp augstāko temperatūras kāpumu mērījumos bez dzesējošās sistēmas un atbilstošiem mērījumiem ar dzesējošo sistēmu (skat. 16. att.). Daļēja enerģijas atgriešana strāvas ražošanai samazina siltuma izdalīšanos uz Peltjē elementa siltās virsmas un siltuma daudzumu, kādu

nepieciešams aizvadīt ar vara folijām, nepārkarsējot sistēmu un nodrošinot nepieciešamo dzesēšanas efektu.



16. att. Temperatūru salīdzināšanas pa sensoriem piemērs

Kopumā vērojama vidēji $1,7^{\circ}\text{C}$ temperatūras starpība uz sensoriem skriešanas laikā, savukārt pēc skriešanas un ar dzesējošo sistēmu tā ir augstāka vidēji par $1,4^{\circ}\text{C}$, atšķiras temperatūru starpības arī abās mugurdaļas pusēs: kreisajā pusē tā ir aptuveni 2°C , savukārt labajā pusē tikai $0,7^{\circ}\text{C}$ (skat. 17. att.).



Nr. p. k.	Sensora Nr.	Temperatūras izmaiņas, °C	
		skriešanas laikā	pēc skriešanas
1.	6.	-2	3
2.	7.	-2,2	1
3.	8.	-2	1,3
4.	9.	-0,7	1
5.	10.	-3	1
6.	11.	-1	1
7.	12.	-0,8	1,4
8.	vidēji	-1,7	1,4

17. att. Temperatūras starpību atšķirības mērījumu vietās

Optimizētā sistēma fiziskas aktivitātes laikā spēj efektīvi nodrošināt temperatūras līdzsvaru ķermeņa mikroklimata telpā Peltjē elementa sistēmas apvidū, novēršot straujas temperatūras izmaiņas, un tikai pēc fiziskām aktivitātēm konstatē nelielu temperatūras pieaugumu. Līdz ar to, sistēmas darbība kopumā novērtējama kā efektīva fiziskas aktivitātes laikā. Sistēmas uzlabošanai varētu veikt arī turpmākus pētījumus cita veida siltumu aizvadošā materiāla, kā arī Peltjē elementus un radiatorus savienojošā materiāla vai savienojošās tehnoloģijas izveidošanai, kas nodrošinātu efektīvāku siltumvadītspēju nekā līdzšinējā sistēma ar vara folijām un elektrovadošas līmes savienojumu.

SECINĀJUMI UN REZULTĀTI

Veicot eksperimentus, ir apkopoti secinājumi un novērojumi par vairāku veidu elektrovadošajiem pavedieniem, kurus izgatavojuši dažādi ražotāji. Pavedieni atšķiras pēc to struktūras (šķeterēti multifilamentārie, mazgrodoti un dzija), pēc elektrovadošā materiāla (tērauda filamentu vai štāpeļšķiedras un sudraba pārklājums), pēc papildu apstrādes (izolācijas pārklājums (I), stiegrojums ar elastīgu pavedienu (HE), impregnējums ar PTFE). Kopumā elektrovadošo pavedienu īpašības ir šādas:

- Nerūsējošā tērauda multifilamentāriem pavedieniem piemīt zemāka elektriskā pretestība salīdzinājumā ar poliamīda pavedieniem, kas pārklāti ar sudrabu. Tiem ir mazāks elektriskās pretestības variāciju koeficients brīvā stāvoklī, kā arī stiepes rezultātā tie faktiski nemaina elektrisko pretestību. Tomēr šie pavedieni ir mazāk elastīgi un nav piemēroti integrēšanai apģērbu drānas struktūrā.
- Ar sudrabu pārklāti multifilamentārie poliamīda pavedieni ir elastīgi, lokani, pēc savām tehnoloģiskajām īpašībām atbilstoši „klasisko” tekstilpavedienu īpašībām, piemēroti integrēšanai drānas struktūrā šūšanas, adīšanas u.c. tekstila tehnoloģijās. Šūšanai ar šujmašīnu ir piemēroti tikai 110 dtex/f34x2 šķeterētie pavedieni.
- Salīdzinoši lielāka elektriskā pretestība un lielākais variāciju koeficients starp līdzīgas struktūras un materiālu pavedieniem piemīt Elitex 110 dtex/f34x2i šķeterētam pavedienam. Neskatoties uz to, šim pavedienam ir viszemākie sprieguma zudumi (mērot pie 50 mA strāvas) no analizētajiem pavedieniem un tas ir piemērots dažādu elektrovadošu elementu izgatavošanai, ieskaitot adītu pretestības sildelementu.
- Mazgāšanas procesā pavedieniem ar sudraba pārklājumu pieaug elektriskā pretestība. Acīmredzot metālu daļiņas berzes un mazgāšanas līdzekļa iedarbības rezultātā nomazgājas. Turpretim nerūsējošā tērauda multifilamentārajiem pavedieniem elektriskā pretestība mazgāšanas rezultātā pieaug tikai nedaudz.
- Lai pasargātu ar sudrabu pārklātos multifilamentāros pavedienus no negatīvās mazgāšanas iedarbības, kā arī, lai pasargātu elektrovadošos pavedienus no savstarpējas saskares un tiešas saskares ar cilvēka ādu, tos iespējams pārklāt ar auduma, silikona lenti vai līmdrānas strēmeli, kā arī iesūt vīlē tekstilizstrādājuma izgatavošanas procesā.
- Elektrovadošo pavedienu priekšrocības attiecībā pret stieplēm vai smalkiem vadiem ir iespēja tos integrēt drānas struktūrā, izmantojot dažādas tekstiltehnoloģijas, kas nodrošina drānas īpašību (piemēram, lokanības, elastīguma) saglabāšanu valkāšanas procesā.

Ar izveidoto termoregulācijas apģērba prototipu kopumā veikti 20 eksperimenti ar ieslēgtu un izslēgtu dzesējošo viedapģērbu, un bez dzesējošā apģērba. Eksperimentos ar izveidoto termoregulācijas apģērba sistēmu iespējams apkopot šādus svarīgākos secinājumus:

- Temperatūra mikroklimata telpā mērījumos ar 4 Peltjē elementiem uz sistēmas pieaug straujāk nekā ar 2 Peltjē elementiem gan uz karstās, gan dzesējošās Peltjē elementu sistēmas virsmām. Tāpat arī ar 2 Peltjē elementiem sistēma pēc skriešanas atdziest ātrāk nekā ar 4 elementiem.
- Peltjē elementu skaits nozīmīgi neietekmē mitruma aizvadīšanas ātrumu, bet ietekmē temperatūras paaugstināšanos mikroklimata telpā zem elementiem vara folijas gaisa necaurlaidības dēļ.
- Salīdzinot apģērba ar optimizēto sistēmu darbību attiecībā pret apģērbu bez sistēmas, var vērot, ka temperatūras starpība vidēji pazeminās par $1,7^{\circ}\text{C}$ skriešanas laikā attiecībā pret mērījumiem ar apģērbu bez sistēmas, savukārt pēc skriešanas ar dzesējošo sistēmu tā paaugstinās vidēji par $1,4^{\circ}\text{C}$.

Eksperimentos ar termoregulējošā apģērba prototipu iegūto datu analīzes rezultātā konstatēts, ka kopumā tas atbilst viedapģērba koncepcijai, jo sistēmā ievietotais temperatūras sensors nodrošina apģērba reakciju uz temperatūras izmaiņām cilvēka mikroklimata telpā, mainoties sistēmas parametriem, un šis apģērbs būtu novērtējams kā aktīvās termoregulācijas apģērbs. Savukārt eksperimentos ar apģērba prototipu ir nodemonstrēta sistēmas spēja noturēt temperatūras līdzsvaru, nepieļaujot straujus tās kāpumus un kritumus fiziskas aktivitātes laikā. Tāpat arī izveidotais apģērba prototips ir salīdzinoši viegls un piemērots valkāšanai, kā arī elektroniskās sistēmas ir ērtas lietošanai. Pirms apģērba mazgāšanas un kopšanas Peltjē elementa sistēmas daļa kopā ar detaļu, kurā ievietoti elementi, ir jānoņem.

Promocijas darbā izveidotā termoregulējošā apģērba ar Peltjē elementiem koncepcija var kalpot par pamatu īpašuzdevumu apģērbu risinājumiem dzesējošas funkcijas veikšanai. Darbā apkopotais pētījumu materiāls par elektrovadošiem pavedieniem, to pielietojumu iespējām un īpašībām, paredzams praktiskam pielietojumam kā studiju procesā RTU, tā arī turpmākā intelektisko tekstilmateriālu pētniecībā un izstrādājumu izgatavošanā. Tāpat arī viedtekstiliju starpnozares terminu skaidrojumu apkopojums kalpos mācību un zinātniskās pētniecības procesam.

INTRODUCTION

A high environmental temperature or long periods of physical load have a significant influence on human body temperature, work effectiveness, health and the feeling of comfort. Therefore it is important to ensure optimal body temperature. In high temperature conditions, e.g. firemen work environment, military actions in desert zones, or in the sphere of activity of motor race drivers there appear supplementary requirements for functions to be imparted to clothing, e.g. easiness, light weight, mobility and the thermal comfort. The function of thermoregulatory clothing for the most part as commercial products is known as retaining or producing heat; cooling clothes are not so popular.

Currently textiles with electric and electronic systems represent some of the most significant development tendencies in the textile industry. Nevertheless there are still only a few companies manufacturing commercially available smart textiles with integrated electronics. For the most part such product concepts are still in the stage of development because joining of electronics and fabric and the adaption to consumer requirements as concerns quality and convenience of use is problematic. On the market most often one can find textiles which perform specific functions, e.g., heating, cooling with electric elements or communication by means of mobile phone or the global positioning system, but the electronic or electrical systems are not integrated in the fabric or adapted to the qualities of the fabric.

As one of the cooling system solutions integration of the Peltier element or thermo electrical generator into clothing is possible. Such a solution – a prototype of the cooling clothing – was developed before, but some drawbacks were found in it and its effectiveness was not tested in operation. In order to study, improve and optimize the efficiency of the system operation, it is planned to find out the options for integrating a conductive system into clothing – making it more suitable for wear, to check the performance of the system during physical activities with the body temperature rising and evaluate the correspondence of the concept of thermoregulatory clothing prototype to the concept of “smart clothing”.

Objective: To develop the prototype of clothing with integrated conductive system controlling the microclimate.

Work objectives:

- 1) to summarize the concepts in smart textiles inter-sector and define the significance of the sector for the development of textile industry in Latvia and Europe;
- 2) to analyse the possibilities of integrating elements of conductive systems into fabric and clothing;
- 3) to investigate experimentally the possibility to integrate conductive elements into textiles;
- 4) to check the changes in individual conductive elements during simulated process of wearing;
- 5) to analyse factors influencing human microclimate;
- 6) to investigate the possibility of controlling human microclimate by clothes;
- 7) to check experimentally the possibility to integrate the system elements into thermoregulatory clothing;
- 8) to manufacture clothes controlling microclimate with cooling function;
- 9) to check and assess the functionality of clothing under conditions of physical load.

Research

In the present theses theoretical and experimental research methods have been used:

- Summarizing and analysis of published and not published information sources – publications of scientific research on innovations in textile sector, explanatory documents on inter-sectorial terms and conceptions, publications on the possibility of conductive system integration and clothing comfort, and analysis of factors influencing the thermal process in solids, patents of thermoregulatory clothing with Peltier elements and offers, norms and standards of companies producing electroconductive yarns. The terms used in the field are summarized in a table.
- Analysis of the physical problem question – theoretic prognostication of thermal processes in the possible variations of cooling systems with Peltier element according to the type and location of heat removing material, as well as analysis of the system heat and moisture conductivity process and in the layers of clothing.
- Theoretical prognostication and calculation of thermodynamic processes and heat exchange between human and environment under conditions of certain physical load.

- Physiological analysis under laboratory conditions modelling interaction of ambient microclimate and human, wearing thermoregulatory clothing and without it under influence of physical load. The data have been processed and analysed using the method of descriptive statistics.
- Materials research under laboratory conditions, modelling the influence of wearing and care on fabrics/clothes: as a result of laundering and tension. The data of the obtained results have been processed using the method of descriptive statistics and summarized in tables.

Scientific importance

The sphere of smart textiles is a comparatively new inter-sector. The field terminology has been made more precise only recently and recommended for standardization therefore the summary of translations into Latvian and notional explanations in the field are a contribution to the development of textile industry and material science.

The summarized data (results of theoretical analysis and experiments) on the properties of conductive yarns allow for comparative suitability assessment of yarns having specific structure, trade mark and different conductive components for manufacture of certain elements of conductive circuit as well as prognosticate the changes in the yarn conductivity under influence of specific factors of wearing and cleaning. In the information sources published until now summarizing information on conductive threads inclusive of their most important parameters and properties is not available.

The thermoregulatory clothing developed in the framework of the doctoral theses with integrated/inserted conductive system, where the cooling function is performed by Peltier element and a solid material – copper foil serving for heat removal presents a new type of solution for the existing prototypes of clothing with Peltier elements and when compared with the prototype concepts which have been found, do not contain movable parts and liquids and is mobile and comparatively lightweight. For experiments simulating microclimate, an alternative method was used, which is suitable for laboratory conditions and does not require specific and expensive equipment.

Practical application

The summarized and analysed terms in the sector, overview of methods for integration of conductive elements into clothing and summary on the types of conductive yarns and the manufacturers as well as the summary of yarn properties and their suitability for use in certain textile technologies envisages application in textiles manufacturing and commerce sectors as well as in the study process of technical schools and higher learning institutions in the study

subjects on innovations in textile materials. Besides it is possible to use the thermoregulatory clothing prototype developed in the course of elaboration of the present thesis as basis for manufacture of cooling clothes for specific situations of life and activities, e.g. for military special task clothing, in medicine for patient thermoregulation or special tasks clothing which should be worn irrespective of the weather conditions.

Approbation of the thesis

The research and experiments summarized in the doctoral thesis have been presented, discussed and approved at several international conferences:

1. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. The Garments With Integrated Microclimate Control System. *International interdisciplinary scientific conference ENERGY*. Rīga, Latvija. 8.-10. October, 2009.
2. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Viedapģērba dzesējošās sistēmas optimizēšana. 50. *RTU starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga: Latvija. 15. oktobris 2009.
3. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J. Optimization of Smart Clothes System. *International Scientific Conference, Innovative solutions for sustainable development of textiles industry*. Oradea, Romania 28. – 29. May, 2010.
4. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J. Development of Microclimate Regulatory Clothes. *Inter-Academia 2010. The 9th International Conference on Global Research and Education*. Riga. Latvia. 9. - 12. August, 2010.
5. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Cilvēka mikroklimata temperatūras mērījumu modelējošie eksperimenti. 51. *RTU starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga: Latvija. 2010. gada 12. - 15. oktobris
6. **Sahta I.**, Baltina I., Blums J., Jurkans V. Research of microclimate control system integrated in the clothes. 4th *Aachen-Dresden International Textile Conference*, Dresden, Germany, 25.-26. November, 2010.
7. **Sahta I.**, Blums J., Baltina I., Jurkans V. Thermoregulatory System's Integrated in the Clothes Effect on the Human Microclimate. 11th *World textile Conference Autex 2011*. France, Mulhouse, 8.-10. June, 2011.
8. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. Cilvēka siltuma komfortu ietekmējošo faktoru analīze. *RTU 52. Starptautiskā zinātniskā konference*, Rīga, 2011. gada 13. – 15. oktobris.
9. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. Tekstilnozares attīstības inovatīvi risinājumi. *Starptautiskā zinātniskā konference „Tautsaimniecības attīstības problēmas un risinājumi”*, Rēzekne, Latvija, 2012. gada 19. aprīlis

10. **Shahta I.**, Baltina I., Jurkans V., Blums J. Conductive Yarns Application Potentialities for Smart Textile. *12th World Textile Conference AUTEX 2012 "Innovative Textile for High Future Demands"*, Croatia, Zadar, 13.-15. June, 2012.
11. **Šahta I.**, Baltiņa I., Pūce M. Testing of the Electrical System Components Integrated in the Textiles. *6th International Textile Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles" (ITC&DC)*, Croatia, Dubrovnik, 7.-10. October, 2012.
12. **Šahta I.**, Baltiņa I., Leitāne S. Incorporation of Light Emitting Diodes in the Clothing. *Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute*. Riga, 11.-12. October, 2012
13. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. The Control of Human Thermal Comfort by the Smart Clothing. *4th International Interdisciplinary Scientific Conference "Society. Health. Welfare"*, Latvija, Riga, 22.-23. November, 2012
14. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. Cilvēka mikroklimata regulēšana ar apģērbu. *Latvijas Universitātes 71. Zinātniskā konference*, Rīga 2013. gada 22. februārī
15. **Šahta I.**, Baltina I., Truskovska N., Blums J. & Deksnis E. Selection of Conductive Yarns for Knitting of Electrical Heating Element. *6th International Conference on Computational Methods and Experiments in Materials Characterisation 2013*, Italia, Siena 4.-6. June, 2013

Publications

1. Baltiņa I., **Šahta I.**, Blūms J. *Elektroniskā viedā apģērba sastāvdaļas un tām piemērotie materiāli*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 3. sēj. (2008), 71.-81. lpp.
2. **Šahta I.**, Blūms J., Baltiņa I. *Viedapģērba dzesējošās sistēmas optimizēšana*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 4. sēj. (2009), 25.-31. lpp.*
3. **Šahta I.**, Baltiņa I., Blūms J. *Termoelektriskā moduļa integrēšanas iespējas cilvēka mikroklimatu regulējošos izstrādājumos. Patentu apskats*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 4. sēj. (2009), 16.-24. lpp.*

* quoted: *EBSCO HOST*

4. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. *Research of Microclimate Control System Integrated in the Clothes*. 4th Aachen-Dresden International Textile Conference, Germany, Dresden, 25.-26. November, 2010. - pp 1-7.
5. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J. *Optimization of Smart Clothes System*. International Scientific Conference "Innovative Solutions for Sustainable Development of Textiles Industry", Romania, Oradea, 28.-29. May, 2010. - pp 148-151.*
6. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. *Cilvēka mikroklimate temperatūras mērījumu modelējošie eksperimenti*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 5. sēj. (2010), 162.-167. lpp.
7. Paraga M., Šahta I. *Ieteikumi patērētājiem alpīnistu tērpu iegādei*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 5. sēj. (2010), 168.-175. lpp.
8. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J. *Development of Microclimate Regulatory Clothes*. Advanced Materials Research. - 222. (2011) 193.-196. lpp.**
9. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J. *The Garment with Integrated Microclimate Control System*. Acoustic Space, Energy. - 8. (2011) pp 166-171.
10. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J. *Apģērbā integrētā mikroklimate kontroles sistēma*. Acoustic Space, Energy. - 8. (2011) 201.-206. lpp.
11. Šahta I., Baltiņa I., Leitane S., Pūce M. *Elektrovadoši tekstilpavedieni*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 6. sēj. (2011), 115.-122. lpp.***
12. Šahta I., Blūms J., Baltiņa I., Jurkāns V. *Thermoregulatory System's Integrated in the Clothes Effect on the Human Microclimate*. 150 Years of Research and Innovation in Textile Science: Book of Proceedings, France, Mulhouse, 8.-10. June, 2011. - pp 856-860.
13. Šahta I., Jurkāns V., Baltiņa I., Blūms J. *Elektrovadošas sistēmas integrēšana termoregulējošā apģērbā*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 7. sēj. (2012), 50.-56. lpp.***
14. Šahta I., Baltiņa I., Blūms J., Truskovska N. *Conductive Yarns Application Potentialities for Smart Textile*. 12th World Textile Conference AUTEX 2012 "Innovative Textile for High Future Demands": Book of Proceedings, Croatia, Zadar, 13.-15. June, 2012. - pp 587-592.

* quoted: *Ulrich's Update – Periodicals Directory; Directory of Open Access Journals (DOAJ); SCIPPIO*

** quoted: *Scientific.Net; SCOPUS*

*** quoted: *EBSCO HOST*

15. Šahta I., Baltiņa I., Pūce M. *Tekstilnozares attīstības inovatīvi risinājumi*. Latgales tautsaimniecības pētījumi: sociālo zinātņu žurnāls. - 1 (4). (2012) 329.-345. lpp.*
16. Šahta I., Baltiņa I., Pūce M. *Testing of the Electrical System Components Integrated in the Textiles*. 6th International Textile Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles" (ITC&DC): Book of Proceedings, Croatia, Dubrovnik, 7.-10. October, 2012. - pp 430-435.**

Accepted for publication

- ✓ Šahta I., Baltiņa I., Blūms J., Jurkāns V. *The Control of Human Thermal Comfort by the Smart Clothing*. SHS Web of Conferences. Vol. 3 (2013) „4th International Interdisciplinary Scientific Conference "Society. Health. Welfare". 12 lpp.***
- ✓ Šahta I., Baltiņa I., Truskovska N., Blums J. & Deksnis E. *Selection of Conductive Yarns for Knitting of Electrical Heating Element*. HPSM 2014 Conference Proceedings. Wessex Institute of Technologies. 2014. g. 12 lpp.***
- ✓ Truskovska N., Šahta I., Baltiņa I., Blūms J. *Elektrovadošu pavedienu integrēšana adījumā*. RTU zinātniskie raksti. 9. sēr., Materiālzinātne. - 8. sēj. (2013), 8 lpp.
- ✓ Jurkans V., Blums J., Šahta I. *Advanced Power Management for Peltier Cooler*. Proceedings of RTU 54th International Scientific Conference. 14. – 16. October, 2013. – 5 pp.

The theoretical and practical elaboration foreruns are introduced into the study process of RTU Institute of Technology and Design of Textile Materials (*TTDI*) in the subject “Progressive Textile Materials” for Clothing and in the textile technology master degree studies.

* quoted: *Index Copernicus scientific publications*

** quoted: *Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S)*

*** will be quoted: *SCOPUS*

1. TEXTILE SECTOR DEVELOPMENT TENDENCIES

At the time when the traditional manufacture of textiles, clothes and footwear is moving to the Asian part of the continent, where there is the textile power – China which is the largest exporter of clothing in the world, a necessity arises for new solutions and development of new manufacturing strategy in Europe inclusive of Latvia. It is also pointed out by the European Economic and Social Committee in its reports especially drawing attention to the importance of the “non-traditional” sector development.

The companies which have found a specific niche or have changed the course to the manufacture of technical textiles and innovations are working effectively. Textiles with integrated electroconductive systems present a field of research, uniting innovations in textile sector and electronics as well as in electronics and electrical engineering and opens up a new scope of opportunities of research and manufacture in the textiles sector. As the field is new and just slightly acquired it is necessary to analyse the smart textiles potential market and application possibilities, manufacturing and materials costs and the possible problems in the manufacturing process, also the pollution of nature and environment in the process of use and after that and the potential threat to the health of living beings have to be foreseen.

In Europe a unified strategy is developed based on innovations in the manufacturing processes and materials, innovative techniques, considering as prospective the micro-, small and medium companies and also supporting the young scientists and progressive research directions. Generally the European strategy for ensuring the stability and development of textile industry may be sub-divided according the following tendencies:

- ✓ development of innovative manufacturing technologies,
- ✓ manufacture of textiles of a new kind or manufacture of smart textiles,
- ✓ development of technical textiles and research into new types of application,
- ✓ support for micro-, small and medium companies,
- ✓ coordinated cooperation among EU member countries and the European Committee,
- ✓ support for the young scientists and progressive research directions.

Latvia is of little importance among the European countries as concerns innovation in textiles. This niche is free in Latvia and in parallel to the textile industry strategy in the country, which is mostly based on development of natural fibres, also opens possibilities for the creative potential and new inventions in accordance with the strategy set forth by EU for textile industry in the direction of innovations.

2. SMART TEXTILES

Prof. Steve Mann may be considered the father of research in smart textiles who gave a special contribution in the research of the field already in the 80-ties. At first electronics were attached to the clothes or accessories, they were heavy, bulky and robust. Along with decreasing of the size of electronics in the course of time there appeared a possibility to integrate them into clothing and the fabric structure.

The concept of smart textiles includes both importance of the smart textile system and the smart textile materials, indicating the ability of the product to detect and react to some change in the environment or parameters. At the same time for manufacturing of smart textiles functional textiles often serve as a base. Explanations of implied concepts are as follows:

- **Functional textile** – textile material, to which functions are imparted by means of material, composition, structure and/or processing.
- **Smart textile material or intelligent textile material** – functional textile material interacting with the environment actively, i.e. reacts or adapts to the changes in environment.
- **Smart textile system** – textile system demonstrating a pre-planned/ prognosticated and applicable reaction to the changes in some environment factor or to an external signal.

In literature smart textiles are subdivided into notional intellect levels namely, their ability to react to external impulses:

- *passive* (e.g., optical fibres and conductive yarns are integrated into fabric, which do not perform any functions without any auxiliary influence, e.g. current flow),
- *active* (e.g., substances which change their state of aggregation, integrated into the textile fabric; fabrics with integrated sensors etc. reacting to climate changes or some physical factors by changing their properties or parameters),
- *special or ultra-active* (e.g., ability to preserve the clothing comfort level at extreme changes in environmental conditions; electronics elements included in the structure of the fabric acting in a similar way as artificial intelligence, in the particular case the textile is able to conditionally “assess” the situation and change certain parameters or properties accordingly).

The smart textiles field of application is wide and sectors are multiple, from visual effect for entertaining to performance of complex functions in health service and safety under

extreme conditions. On the whole the textiles according to their functions and their stage of readiness for manufacture may be divided as follows:

- *Ready for manufacture.* They include textiles with improved or optimized properties, e.g. waterproof and windproof fabrics; air and steam penetrable materials; fabrics with improved strength: fade resistance, tear strength, thermal resistance. Include also functional textile materials, e.g. scent spreading and odour controlling; reflecting fabrics and materials with protection against UV or electromagnetic radiation; fabrics with improved wearing comfort; smart thermoregulatory textile materials, e.g., with PCM capsules.
- *In the stage of development.* They include functional or smart textile materials from new kinds of fibres and smart textile systems with electronic auxiliary functions.

As concerns the requirements to be envisaged for smart textile materials the following properties should be named: performance, reliability, durability and information on the product and/or environment aspect. The most problematic and still completely unexplored spheres in the manufacture of smart textiles are ecological problems, both in the process of wearing, e.g., the negative impact of electromagnetic field radiation on living beings or waste water pollution and also recycling of the products after the period of use (electronics hazard for the environment, increase of waste etc.).

The Standard CEN/TR 16298:2011 provides: “Smart textiles and textile systems should comply with the requirements stipulated for similar “non-intelligent” materials and systems and additionally also specific requirements related to their specific functions. Requirement assessment of should be made under conditions characteristic for the intended use, the method shall be adequate, repeatable and comparable and available on market. Corresponding European and national regulations shall be included as well as the approved standards.” The smart textiles shall envisage at least one of the aspects mentioned in the standard: performance, reliability, durability and information on the product and/or environment aspect.

3. ELECTROCONDUCTIVE SYSTEM INTEGRATION INTO TEXTILES

For integration of electroconductive elements in textiles mostly 3 methods are used: integration into the structure of the fabric; adaptation of electronic elements to be inserted in the clothing pockets, in sewn tunnels; combination or integration of the elements into the fabric structure at the fibre level. Each of these methods has its advantages and drawbacks: the integration method provides a better wearing comfort and fabric properties, but the adaptation method permits element change, repair and recycling of clothing after the phase of use.

Depending on their properties the conductive materials used in practice may be integrated into the structure of the textile as well as in its surface (see fig. 1). For example cable type products provide for a good and uniform current, but they are not suitable for integration into the fabric structure, while thin metal wires or monofilaments are used also in the research for integration into the fabric, but one of the most suitable materials for manufacture of conductive traces as well as conductive elements is electroconductive yarns as they are suitable for integration into fabrics using different textile technologies. Nevertheless it should be noted that such yarns usually have higher electrical resistance than metal wires, and as a result the commercially obtainable electroconductive yarns are more suitable for power systems with a low power input.

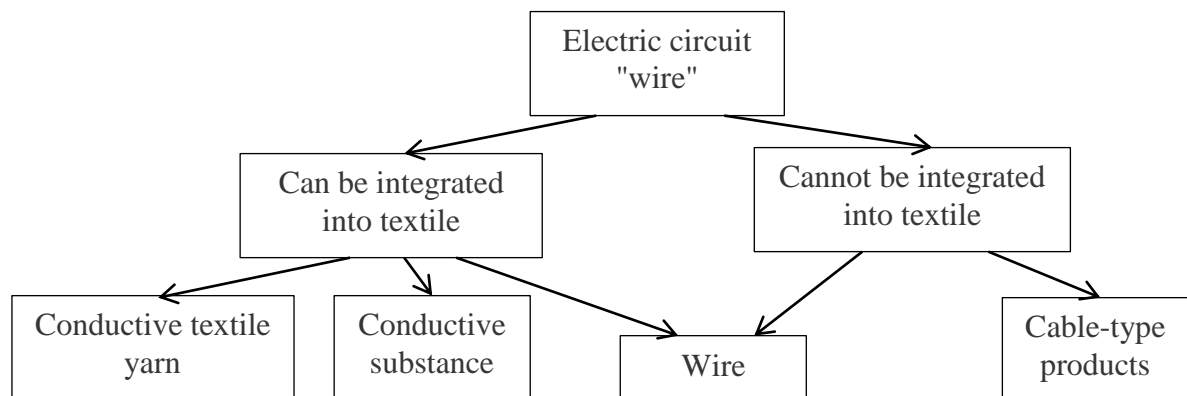


Fig. 1. Ways of replacing “wire” in smart textiles

Insulation of conductive textile traces and fabrics shall be adapted to the intended functions of the conductive material, e.g., fabrics which are intended for shielding the electromagnetic field are not insulated, while when intended for protection of connecting traces of conductive elements from environmental influence – moisture, friction – and from mutual contact of traces and contact with the body they should be insulated.

4. CONDUCTIVE YARNS

Conductive yarns are manufactured using similar methods as “conventional” textile yarns (see fig. 2.), imparting conductive properties by winding, twisting or core covering chemical or natural fibre threads with an electroconductive yarn or a metal wire, coating polymer filaments with metal particles or adding metal particles to the polymer mass envisaged for production of filaments.

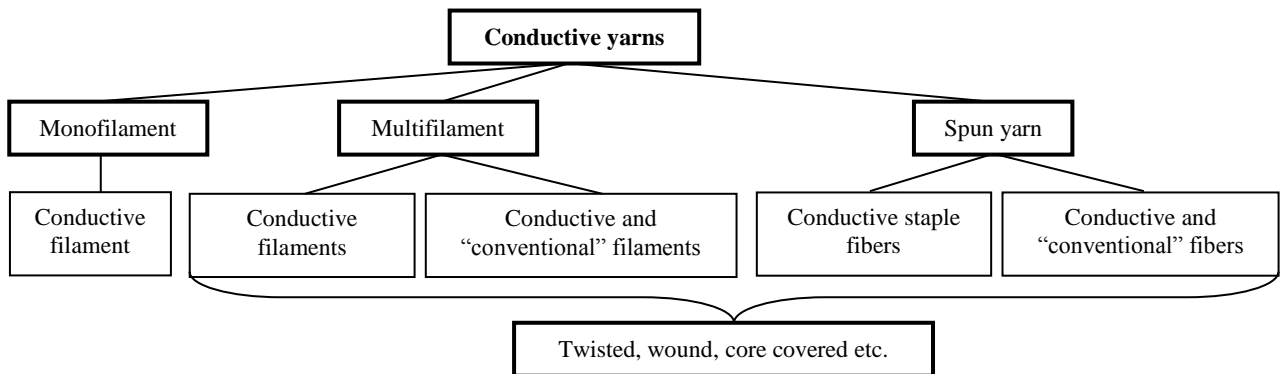


Fig. 2. Electroconductive yarn division by their structure

Metal, conductive polymer or carbon fibres are used as the conductive component. More often polyamide yarns coated with silver and steel multifilamentary yarns are commercially available. As yarn insulation insulating coatings or sewed on cover of fusible interlinings, fabric strips or silicon tapes etc. are used, which protect the yarn from friction during laundering as well. The material, its quality, quantity, yarn structure, linear density and other quality and quantity parameters of yarns determine their properties, conductivity and options of use.

5. MICROCLIMATE CONTROL BY CLOTHING

Comfort of clothing for a person is defined both by the subjective psychological perception and the physiological factors and it is difficult to define all the influencing factors.

High air humidity facilitates human heat elimination as the sweat does not evaporate from man's skin. In working environment the heat level is usually established according to the table of wet-bulb globe temperature index (WBGT). Conditions of physical activity, high environmental temperature and high relative air humidity may have a negative influence on man's physical and mental health. Types of body cooling may be subdivided into convective cooling (as a result of movements of cold air) and cooling as a result of steam emission (evaporation in dry and warm air).

Comfort of clothing is usually described by the metabolic rate (Met), clothing thermal insulation coefficient (Clo). Clothing comfort is basically assessed by the air temperature between the first and the second layer of clothing and air specific humidity under clothing. It is assessed during physical activity. In clothing research the following stages may be distinguished: Physical problem questions analysis (theoretic analysis of the fabric); analysis of biophysical elements analysis (prognostic modelling); "legalization" of physiological research of humans (climate cameras, mannequins, prototype of clothing); monitored field experiments (under corresponding actual conditions); consumption research (test sale).

In passive climate control by clothing the structure of fibres and the fabric is of importance, but in active thermoregulation – capacity of the material to react to the changes in environmental temperature providing temperature balance near the body. For cooling of microclimate by clothing basically cooling systems are used: with flow of cooling liquid, with air flow, with ice or gel packages, with packages filled with substance changing its state of aggregation or with material technology the functioning of which is based on the process of evaporation. Usually these products are connected to a stationary source of voltage, they are heavy with short-term effect and their temperature cannot be regulated. As an example of smart thermoregulatory textile a fabric with integrated microcapsules, which are changing the aggregative state, may be mentioned, still also the operating temperature of the material is limited and it does not have a specific cooling effect.

6. TERMOREGULATORY CLOTHING WITH INSERTED PELTIER ELEMENT

Taking into consideration the importance of the comfort of warmth in sustaining person's capacity to work, as a result of scientific research carried out in the world several prototypes of clothing have been patented, where systems with Peltier elements (Peltier element - electrothermal converter, which by the current flowing through it, creates a temperature difference or by the temperature difference causes a current flow, see fig. 3) have been inserted: systems with several Peltier elements; with heat exchanger systems; with piping system for flow of cooling liquid; with air conditioner. For each system remarks are given pointing out drawbacks to be expected in the process of wearing and cleaning the clothes, e.g. having many details make insertion of the system into clothing complex, liquid substances may leak when moving parts get broken. Research has been done also to integrate Peltier elements into the fabric structure, but the research results in practice demonstrate creating non-effective temperature difference on both the fabric surfaces.

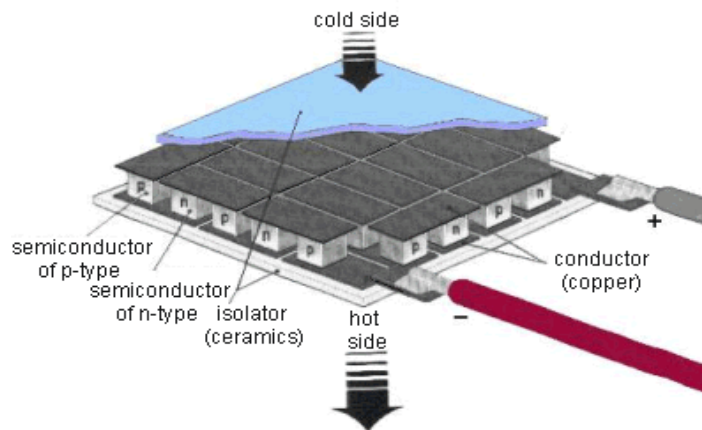


Fig. 3. The principle of Peltier element [source: <http://ixbtlabs.com/articles/peltiercoolers>]

To avoid the possibility that parts of a complex structure may break and the cooling liquid leak, a concept of clothing controlling the microclimate is set forth where the heat transfer function is based on thermal conductivity of solids. A series of experiments have been made to find the most suitable solid material for heat transfer from both the surfaces of Peltier element (the used materials and the sensors locations showed in fig. 4., where the "Peltier element" lettered "PE").

It has been found during the experiments that fabrics of metal wires as well polyester fabric with copper coating cannot ensure effective heat transfer, but 0.8 mm thick copper foil can ensure the necessary heat transfer effect even at a distance of 8 cm (see table 1.).

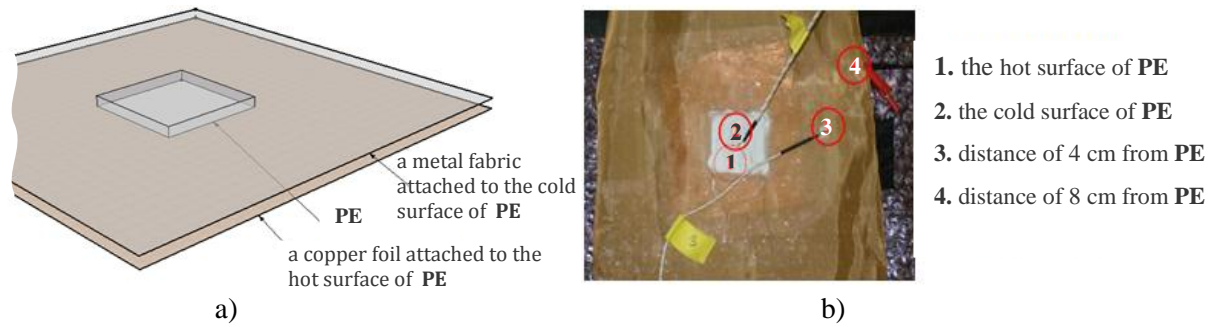


Fig. 4. The concept of cooling system with a metal fabric to remove heat from the Peltier element (PE) cold side and the copper foil to remove heat from the warm side: a) scheme of the system; b) sensors location on the system to determine the thermal conductivity of materials

Table 1

Comparison of thermal conductivity of metals connected to Peltier element (ambient T° 22 °C, $U=1.9$ V and $I=0.6$ A; duration 20 ~ 30 min)

Item No.	Metal material characteristics			Max t° (C) decrease at a distance from PE cold surfaces	
	Fabric/mesh material	Fabric density, warp/weft number	Wire dia, mm	4 cm	8 cm
1.	steel	130/118	0.11/0.13	0°	0.5°
2.	bronze	55/55	0.112/0.07	0°	1°
3.	bronze	97/97	0.04/0.04	0°	1°
4.	bronze	16/14	0.28/0.28	0°	2°
5.	copper	8/8	0.28/0.28	1.5°	0.5°
6.	copper	7/7	0.50/0.50	2°	0.5°
7.	copper foil, 2 mm thick			4°	2°

As a result of the prior experiments the following tasks have been set forth:

- 1) Integration of electroconductive net into the clothing fabric;
- 2) Test of the operating efficiency of clothing prototype with integrated/adapted cooling system under simulated conditions of physical activity and microclimate.

7. EXPERIMENT METHODS

The following experiments have been made to determine the properties of electroconductive yarns under laboratory conditions:

- ✓ Determination of filament electrical resistance uniformity coefficient and changes in electrical resistance under influence of tension (at 20 cN load);
- ✓ Measurements of yarn voltage loss at 50 mA current;
- ✓ Experiments to assess the yarn suitability for sewing, when using as needle thread and shuttle thread;
- ✓ Suitability of conductive yarns for knitting using manual knitting machine and changes in the yarn electrical resistance in the knitting under tension (load up to 1000 g);
- ✓ Manufacture of electroconductive elements – a finger push switch and resistive heating element;
- ✓ Influence of laundering on the conductivity of electroconductive filaments (10 washing cycles, washing for delicates, 30 min).

Generally multifilamentary polyamide yarn by manufacturers Statex and Imbut, coated with silver having different linear density and structure, a yarn with insulating coating and yarn core covered with elastic yarn, and the stainless steel multifilamentary yarns by the manufacturer Tibtech and polyester and steel fibre spun yarns were used in all the experiments (see table 2).

The operation of the created thermoregulatory system and heat conduction efficiency of the Peltier element with incorporated copper foils has been assessed after theoretic and prognosticating analysis and in the experiments under conditions of human physical activity. In the analysis the clothing insulation coefficient and metabolic rate under conditions of medium and heavy physical load have been taken into account.

To check the work of thermoregulatory system under conditions of physical load several series of experiments are planned with the initially created and later optimized thermoregulatory system incorporated in clothing. The experiments were made under laboratory conditions at different air temperatures, relative air humidity ~60 %, rate of air movement >0.1 m/s.

Table 2

In the experiments used yarns

Nr. p. k.	Yarn type	Linear density (tex)	Yarn structure	Additional processing
Multifilament stainless steel yarns				
1.	Thermotech N-14	500	low twisted yarn	PTFE impregnated
2.	Thermotech N-30	240	2-plied, twisted yarn	-
Silver coated multifilament polyamide yarns				
3.	Elitex I 234dtex/f34	23.4	low twisted yarn	insulating coating
4.	Elitex HE 234dtex/f34	23.4	low twisted yarn	core covered with elastic yarn
5.	Elitex 110dtex/f34	11.0	low twisted yarn	-
6.	Elitex 110dtex/f34x2	11.0 x 2	2-plied, twisted yarn	-
7.	Shieldex 235dtex/f34	23.5	low twisted yarn	-
8.	Shieldex 235dtex/f34x4	23.5 x 4	4-plied, twisted yarn	-
9.	Shieldex 110dtex/f34x2	11 x 2	2-plied, twisted yarn	-
10.	Shieldex 110dtex/f34	11	low twisted yarn	-
80% polyester + 20% stainless steel spun yarn				
11.	Nm10/3	33.3	3-plied, spun yarn	-

In general 3 experiment stages may be identified:

1) Determination of the operation efficiency of the cooling system and assessment of its influence on body microclimate parameters (temperature, humidity). The measurements in 11 points on the first layer of clothing are performed (see fig. 5.).

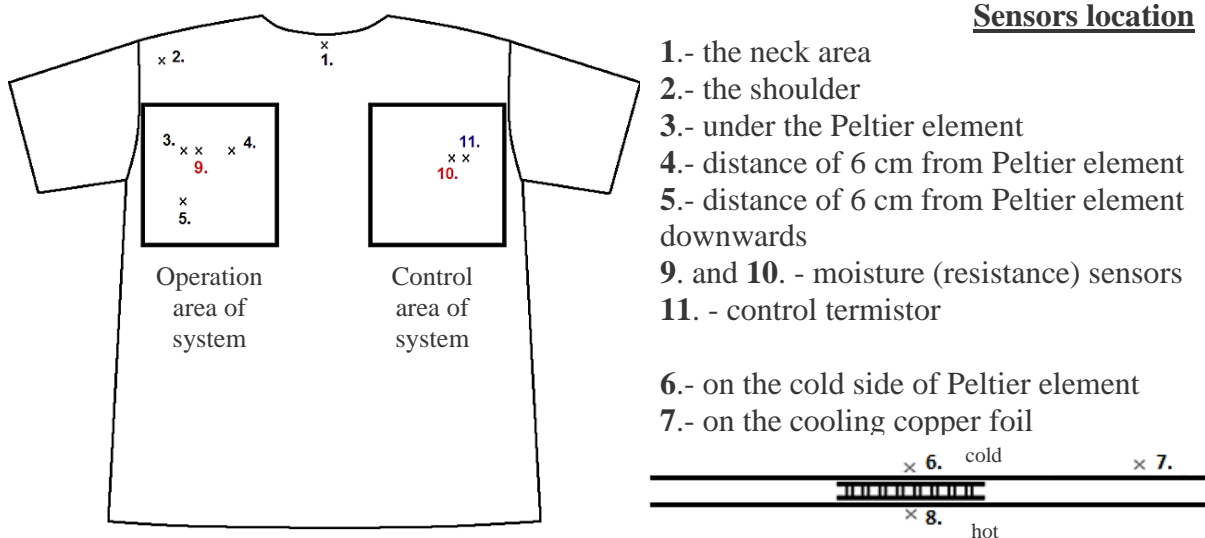


Fig. 5. Sensors location on the first layer of clothing system during the 1st part of experiments

2) Influence of the size of thermoregulatory system area covered with Peltier elements (2 and 4) on microclimate indices, measurements in 15 points to assess the efficiency of the

system (see fig. 6). To observe the changes of body parameters at rest and during physical activity the measurements of human microclimate are performed under the first layer of clothing, between the first layer and a cotton shirt, and on the Peltier element cooling system.

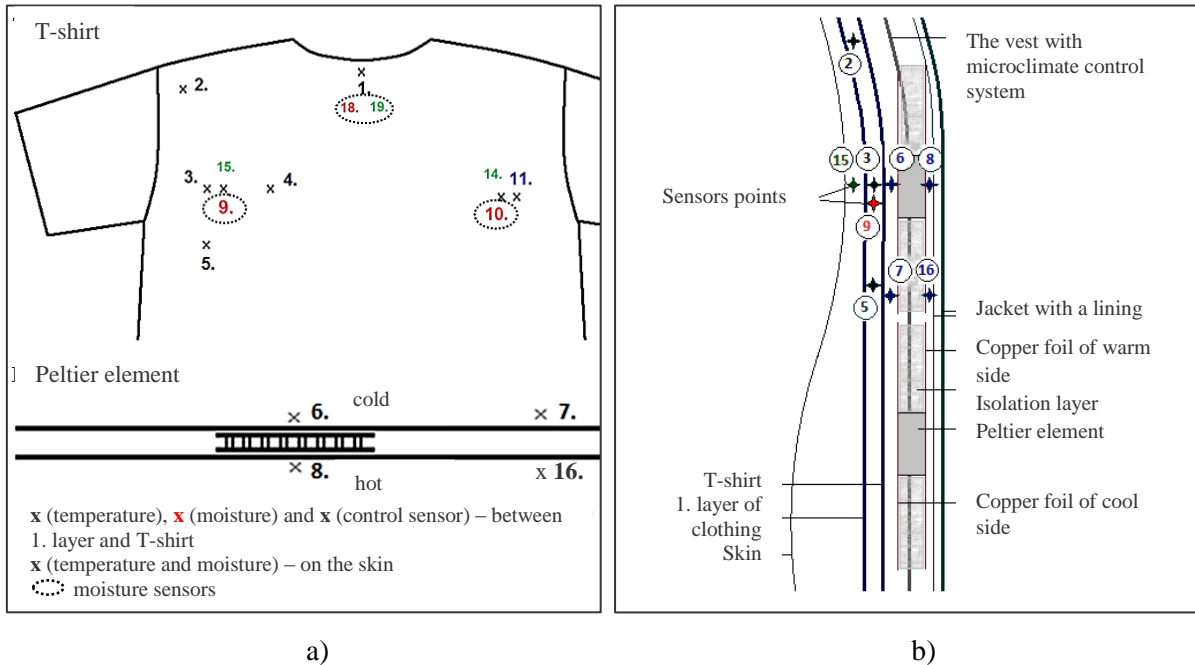


Fig. 6. Sensors location in clothing layers during the 2nd part of experiments: a) front view; b) cross section

3) Assessment of the optimized system (with the recuperation function – partial recovery of energy for generation of current) during physical activity (15 min run, speed 7 km/h). To observe the changes of body parameters at rest and during physical activity, as well as to assess the system effect on the human microclimate the measurements of human microclimate are performed under the first layer of clothing, between the first layer and cooling system, and on the Peltier element cooling system (see fig. 7).

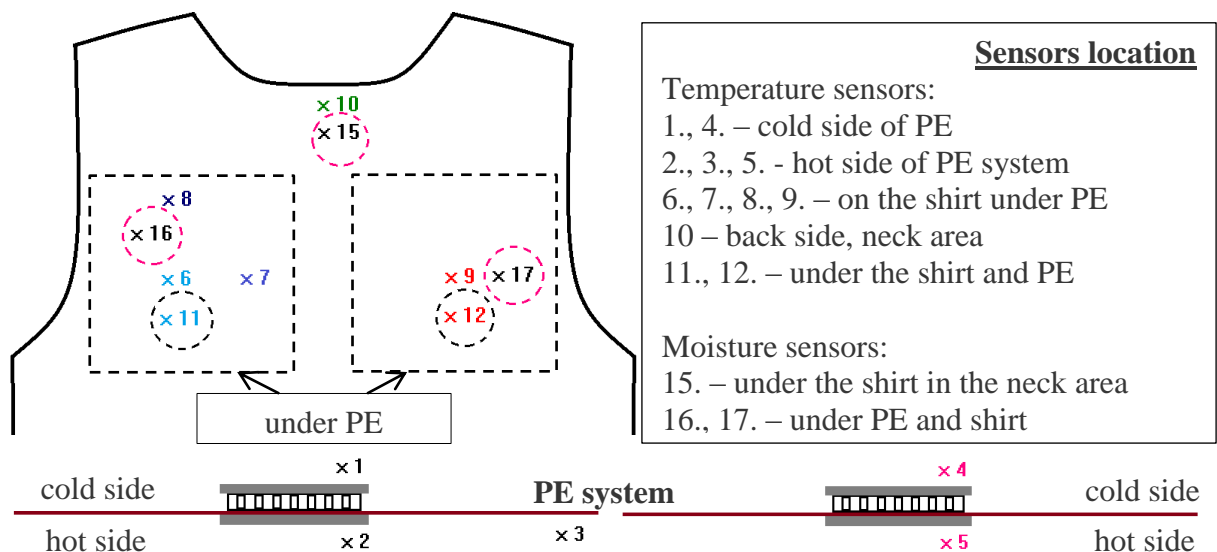


Fig. 7. Sensors location during the 3rd part of experiments

8. RESEARCH RESULTS

Experimentally testing the yarns to determine their suitability as to their properties and for manufacture of particular electroconductive elements and also the stability of the properties in use summary can be made as follows (see Table 3):

- ✓ Multifilamentary steel yarn Thermotech N-14 has the lowest electric resistance (13 Ω /m), but of the polyamide yarns coated with silver it is the lowest for Elitex I 234 dtex/f34 (insulated) and Elitex 235 dtex/f34 (20 ~ 22 Ω /m);
- ✓ The multifilamentary steel yarn Thermotech N-30 (0,13) and Thermotech N-14 (0,98) as well as the core covered with elastic yarn and silver coated polyamide yarn Elitex HE 234 dtex/f34 (0,9) have the lowest variation coefficient of electric resistance (the most uniform resistance over the yarn length);
- ✓ Changes in electric resistance of a tensioned yarn have not been found only in multifilamentary steel yarns, in others it changes individually (see fig. 8);
- ✓ Voltage loss (at 50 mA current) is lowest for the silver coated Elitex 110 dtex/f34x2-ply yarn – 1.5 V/20 cm (see fig. 9);
- ✓ Suitability for sewing with sewing machine: as shuttle thread and needle thread Elitex 110 dtex/f34x2-ply and Shieldex 110 dtex/f34x2-ply yarns, but as shuttle thread – most part of the silver coated polyamide yarns;
- ✓ Silver coated polyamide yarns without insulation and spun yarn with polyamide and metal staple fibres (suitable for manufacture of sensors as well) are suitable for knitting.

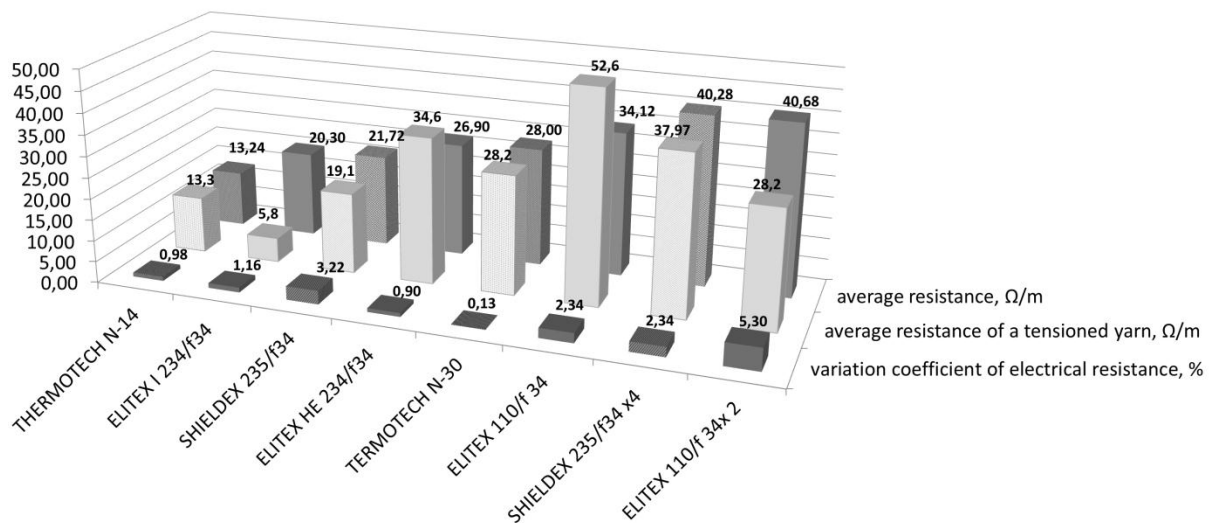


Fig. 8. Average resistance of conductive yarns (in free state), average resistance of a tensioned yarn (20 g load) and the variation coefficient of electrical resistance

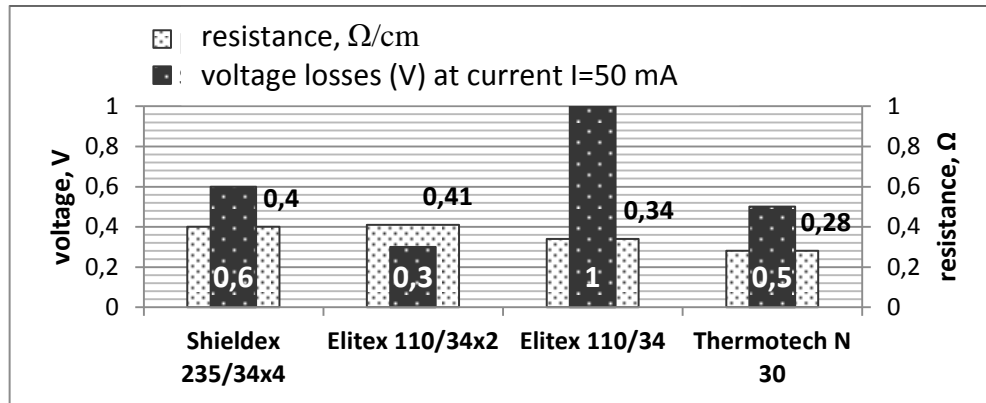


Fig. 9. Voltage losses (V) of conductive yarns (20 cm long) at the current $I=50\text{ mA}$

For integration of electroconductive systems in light emitting clothes as well as for manufacture of resistive heating element basically Elitex 110 dtex/f34x2-ply silver coated polyamide yarn was used. This yarn is suitable both for sewing and knitting, as well as it demonstrates optimal electrical and operating properties (see fig. 10).

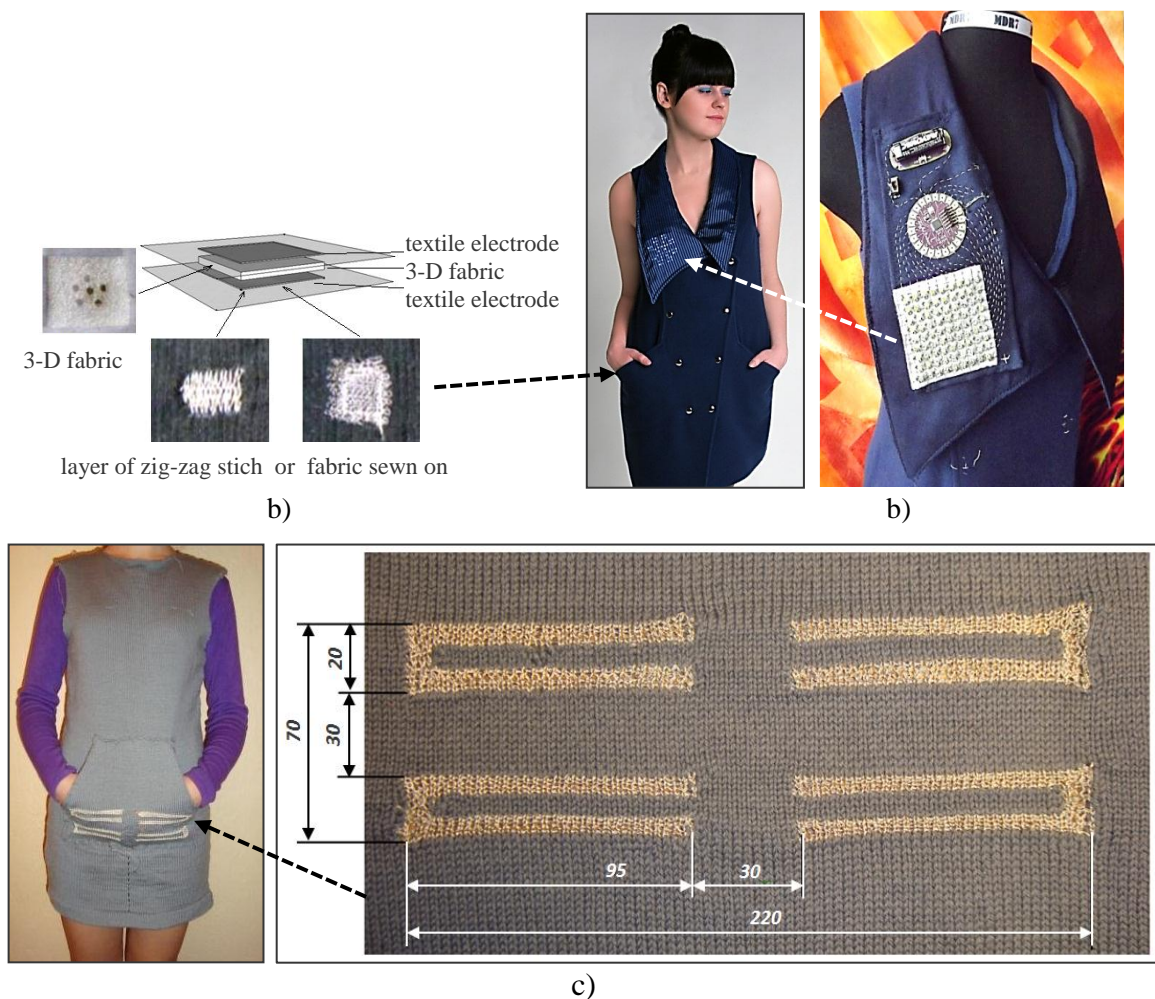


Fig. 10. Integration of electrically conductive yarn into clothing: a) sewn display and traces connecting conductive elements; b) sewn push switch; c) knitted resistive heating element

Table 3

Summary of the tested electroconductive yarns

No.	Thread description	Electrical resistance, Ω/m	Variation coefficient (resistance)	Resistance changes of tensioned yarn (20g), %	Voltage loss At I=50 mA, V/m	Suitability for sewing machine	Suitability for machine knitting	Suitability for element manufacture
Stainless steel multifilamentary yarns								
1.	Thermotech N-14	13	0.98	0	<i>Not determined</i>	Additional finish	Not suitable	Conductive trace, heating element
2.	Thermotech N-30	28	0.13	0	2.5	Shuttle thread	Suitable partly	Conductive trace, heating element
Silver coated multifilamentary polyamide yarns								
3.	Elitex I 234dtex/f34	20	1.16	(-)71	<i>Not determined</i>	Additional finish	Not suitable	Conductive trace
4.	Elitex 235dtex/f34	22	3.22	(-)14	<i>Not determined</i>	Shuttle thread	<i>Not determined</i>	Sewn electrode and trace
5.	Elitex HE 234dtex/f34	27	0.9	(+)30	<i>Not determined</i>	Shuttle thread	Suitable	Elastic electroconductive trace
6.	Elitex 110dtex/f34	34	2.34	(+)56	5	Shuttle thread	Suitable	Sewn electrode, trace, knit heating element
7.	Elitex 110dtex/f34x2	41	5.3	(-)32	1.5	Needle and shuttle thread	Suitable	Sewn electrode, trace, knit heating element
8.	Shieldex 235dtex/f34x4	40	2.34	(-)5	3	Shuttle thread	<i>Not determined</i>	Sewn electrode, trace, knit heating element
9.	Shieldex 110dtex/f34x2	~ 850	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	Needle and shuttle thread	Suitable	<i>Not determined</i>
10.	Shieldex 110dtex/f34 Z	> 2000	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	Shuttle thread	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>
Steel and polyester staple fibre spun yarn								
11.	Nm10/3	> 1000	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	<i>Not determined</i>	Additional trim	Suitable	Knit tension sensor

Electroconductive components of the microclimate control system incorporated in clothes, using the methods of integration and adaption: sewn conductive tracks integrated into communication panel (sewn with electroconductive thread, see fig. 13) and a finger push switch, and electronic parts: system control unit, lithium ion batteries, LCD display are inserted in the pockets, but the Peltier element system – in a special sewn detail which can be attached and taken off (see fig. 11, 1 – batteries, 2 - electronic control unit, 3 - LCD display, 4 - Peltier elements with heat transfer foils, fig. 12).

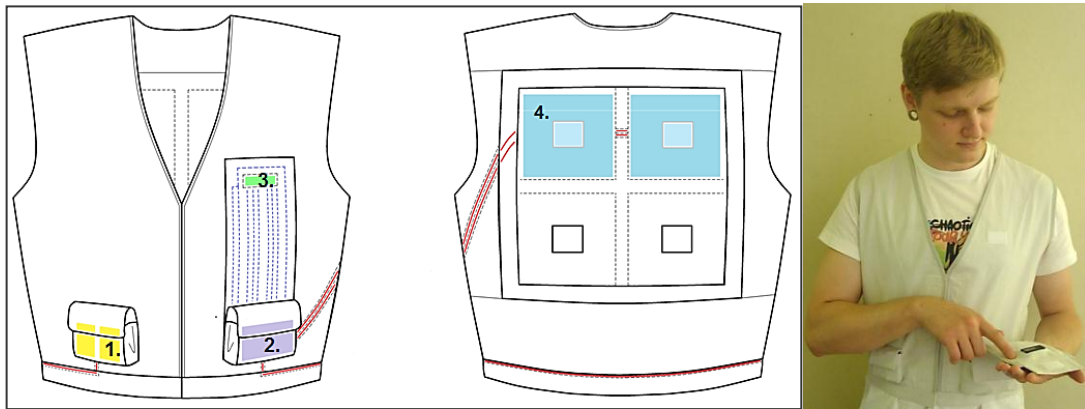


Fig. 11. Scheme of the system elements location in clothing and use when wearing

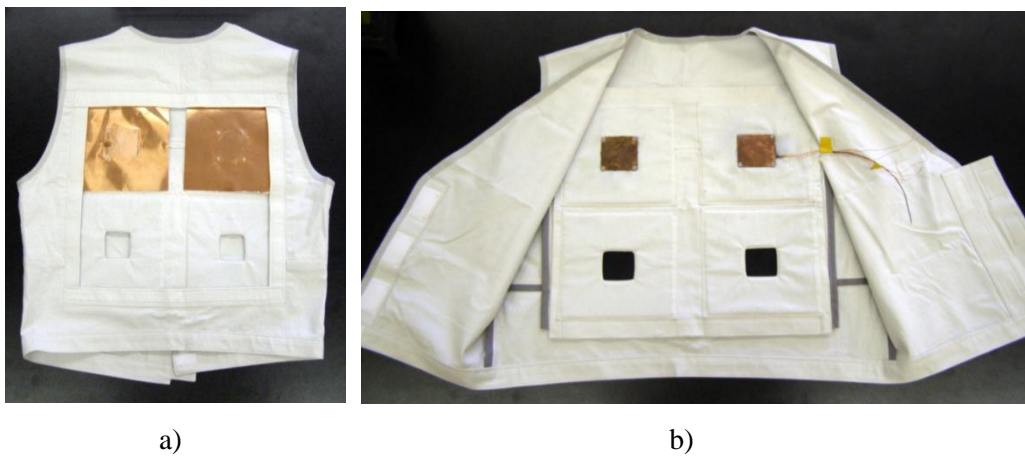


Fig. 12. Incorporation of Peltier elements into the clothing: a) sewn detail with an insulating layer for insertion of Peltier element; b) the system of Peltier elements incorporated into the vest

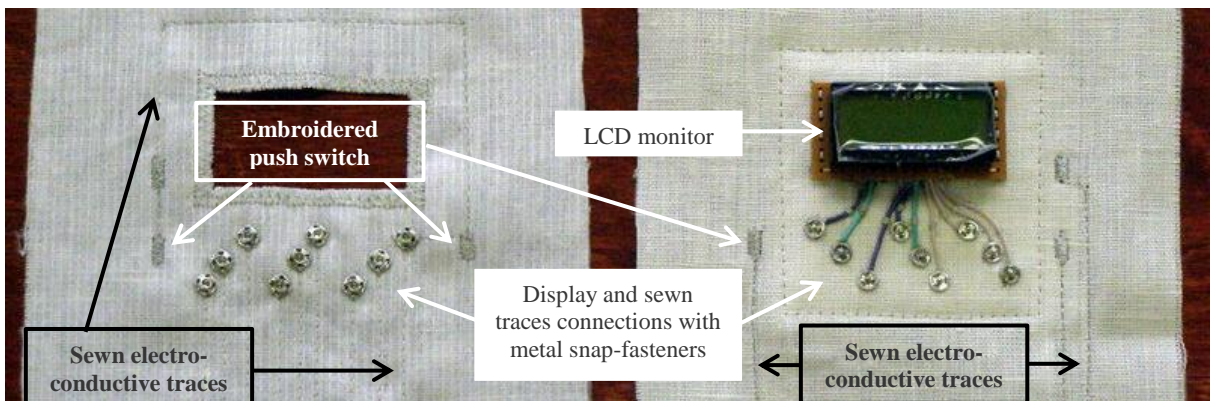


Fig. 13. Processing of communication panel parts and elements integration

The work of the system and heat transfer efficiency of Peltier element with attached foils is assessed according theoretic, prognosticating analysis and by experiments under conditions of human physical activity. In the analysis the clothing insulation coefficient and metabolism rate under conditions of heavy physical load have been taken into account. The analysis allows concluding that under particular conditions (room temperature of 20° C, 60 % air humidity and air velocity of >0.1 m/s) with the Peltier element system it would be possible to transfer 53 – 61 % of superfluous heat produced by the body during physical activity.

In order to check the system operation under conditions of physical load a series of experiments have been made with the initially created and later optimized thermoregulatory system. In general the experiments may be subdivided into 3 stages:

1) **Determination of cooling system operation efficiency and assessment of its effect on body microclimate indices** (temperature, humidity).

The location plan of temperature sensors has been elaborated taking into account thermoregulation principles of humans, zoning of perspiration intensity and temperature accordingly: temperature sensors 1 - 5 are located in the back left part in the shoulder-blade area between the first layer of clothes and the cooling clothing where cooling with Peltier element is envisaged. To obtain control parameters the temperature sensor 11 is located in the back right part, where cooling is not envisaged. The temperature sensors 6 - 8 serve for monitoring of temperature changes on the Peltier element cooling system with copper foil radiators (see chapter 7, fig. 5).

In the measurements diagram – with a switched on cooling system and two physical activities – temperature decrease can be observed in all the measurement points after the first physical activity (see fig. 14), which reaches its maximum during the second activity at the time when a rapid temperature decrease happens in the cooling system in response to increase of the body microclimate temperature.

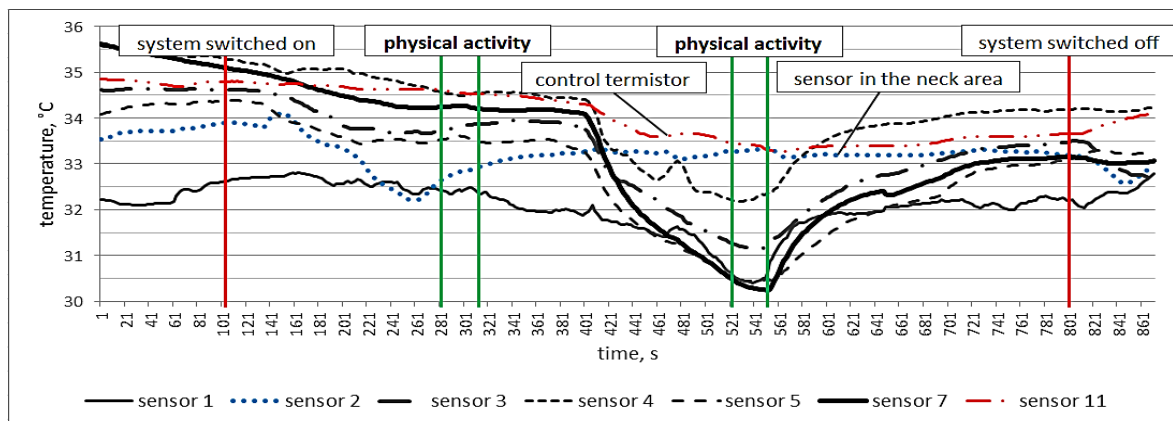


Fig. 14. Measurements with switched on cooling system and physical activities

As a result of the experiment a negative fact is found: due to the high temperature difference on the element surfaces the copper foils cannot transfer the heat produced by the element fast enough and the system overheats. It indicates the necessity of electronic optimization of the system.

2) Influence of the area covered by the system with Peltier element system (elements 2 and 4) on the microclimate indices.

The experiment allows to conclude that the temperature using 4 Peltier elements on the system increases more rapidly than with 2 Peltier elements, both on the hot and on the cooling surfaces of the Peltier element system (see fig. 15, temperature sensor 6 is located on the cold surface of Peltier element, and sensor 7 – on the cooling copper foil; sensor 8 – on the Peltier element hot surface and sensor 16 – on the heat transferring copper foil).

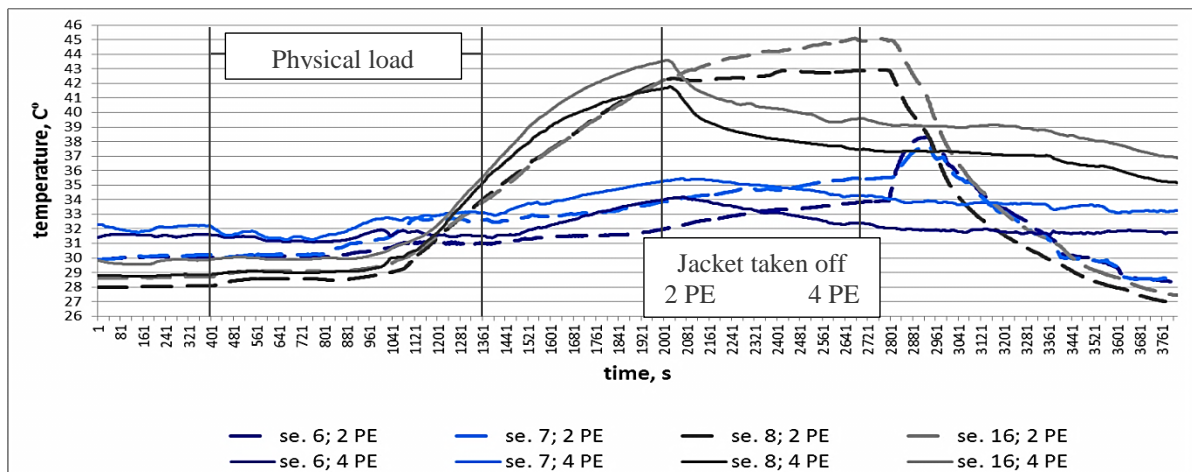


Fig. 15. The measurements with 2 and 4 Peltier coolers results comparison

After running and taking the jacket off the system with 2 Peltier elements is cooling faster acquiring lower temperature than with 4 elements. In general the experiment results are indicative of the fact that increasing of the body area covered with Peltier elements have a negative effect on the system response to switching on and operation, likewise the Peltier element system makes transfer of water vapours difficult.

3) Assessment of the optimized system (with recuperation – partial energy recovery for generation of current) efficiency during physical activity.

The efficiency of the cooling system has been assessed in comparison with the same clothes without the electroconducting cooling system with Peltier elements. The temperature measurement results are compared separately for each sensor (sensors location see chapter 7, fig. 7) finding the difference between the highest temperature increase points in measurements without the cooling system and the measurements at the respective points with the cooling system (see fig. 16).

Partial return of energy for current generation reduces the heat emission from heated surface of the Peltier element and the amount of heat that is necessary to drain with the help of a copper foil to do not overheat the system and provide the necessary cooling effect.

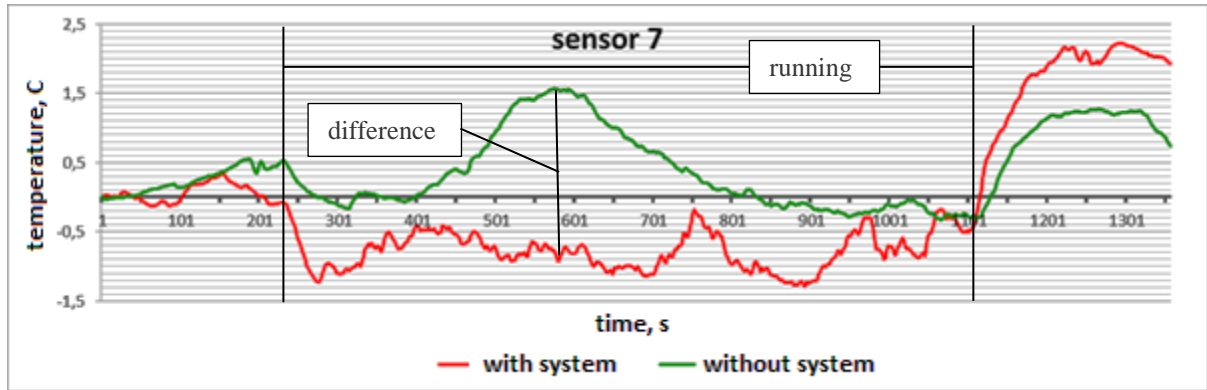
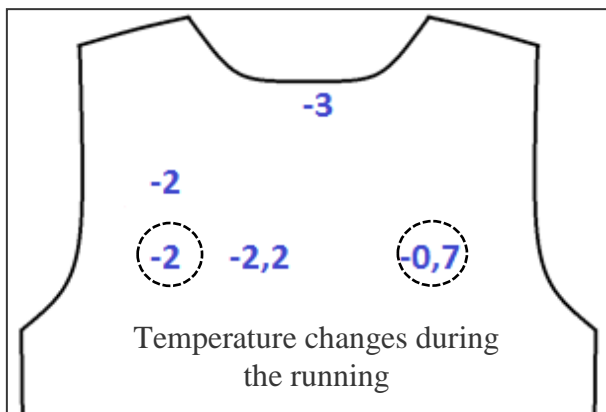


Fig.16. Example of temperature comparison at respective sensors

In general average temperature difference of the sensors during running is 1.7 °C, but after running the temperature difference changes and with the cooling system it is higher in average by 1.4° C, the temperature difference varies also over both halves of the back part: on the left it is approximately 2° C, but on right only 0.7° C (see fig. 17).



Item No.	No. of sensor	Temperature changes, °C	
		during the running	after the running
1.	6.	-2	3
2.	7.	-2.2	1
3.	8.	-2	1.3
4.	9.	-0.7	1
5.	10.	-3	1
6.	11.	-1	1
7.	12.	-0.8	1.4
8.	average	-1.7	1.4

Fig. 17. The temperature differences on measurement locations

During physical activity the optimized system can ensure the temperature balance in the system area, preventing extreme temperature changes and only after physical activities a slight temperature increase is found. Thus in general the work of the system can be assessed as effective during physical activities. In order to improve the system further research should be carried out of another type of the heat transfer material, as well as the material connecting the Peltier elements and the radiator or the connecting technologies that would provide more effective heat conduction as compared with the current system with the copper foils and conductive glue connection.

CONCLUSIONS AND RESULTS

Upon making experiments conclusions and observations have been summarized regarding several kinds of electroconductive yarns made by different manufacturers. The yarns differ by their structure (multifilamentary twisted, slightly twisted and twisted yarn), by the conductive material (steel filaments for staple fibre and silver coating), by additional processing (insulation cover (I), core covered with elastic yarn (HE), impregnation with PTFE). In general electroconductive yarn properties are as described below:

- Stainless steel multifilamentary yarns have lower electric resistance than polyamide yarns coated with silver; they have a lower coefficient of variation (of electrical resistance) and their electrical resistance actually does not change as a result of tension. Nevertheless these yarns are less elastic and are not suitable for integration into the structure of fabrics applicable for manufacture of clothing.
- Silver coated multifilamentary polyamide yarns are elastic, flexible and in respect of their textile properties correspond to the “conventional” textile yarns. They are suitable for integration into the fabric structure by sewing and knitting. For use with a sewing machine suitable are only 110 dtex/f34x2-ply twisted yarns.
- Elitex 110dtex/f34x2-ply twisted yarn has a comparatively higher electric resistance and the biggest coefficient of variations among yarns having similar structure and materials. Nevertheless this yarn has the lowest voltage loss (measured at 50 mA current) of the measured yarns, and it is suitable for manufacture of conductive elements including, knitted electric resistance heating element.
- During laundering the electric resistance of silver coated yarns increases. It is obvious that metal particles wash off under influence of friction and detergent. But the electric resistance of stainless steel multifilamentary yarns increases only a little as a result of laundering.
- In order to protect the silver coated multifilamentary yarns from the negative influence of laundering as well as to protect the conductive yarns against mutual contact and contact with human skin it is possible to cover them with a strip of fabric, silicone tape or a strip of adhesive fabric as well as sew into a seam during manufacturing process of the textile.
- Advantage of electroconductive yarns as compared with wires or thin wires is the possibility to integrate them into the fabric structure using different textile technologies ensuring retaining of the fabric properties (e.g. flexibility elasticity) in the process of wearing.

Overall 20 experiments have been made with the developed thermoregulatory clothing prototype both with the cooling garment in switched on and switched off mode, with and without it. In experiments with the developed thermoregulatory clothing system the most important conclusions can be summarized:

- During experiments it was observed that the temperature in the microclimate spaces in the measurements with 4 Peltier elements on the system rises more rapidly than with 2 Peltier elements, both on the hot and cooling surfaces of the Peltier element system. Also the system with 2 Peltier elements cools faster after running than the one with 4 elements.
- The number of Peltier elements has no significant influence on the rate of humidity transfer, but it influences the temperature increase in the microclimate space under the elements due to lack of movement through the copper foil.
- Upon comparison of the work of the clothing with the optimized system against the clothing without the system it can be observed that the temperature difference on the average is lower by 1.7° C during running as compared to the measurements with the clothing without the system, while with the cooling system after running it increases on the average by 1.4° C.

Upon analysing the obtained dates of experiments and the thermoregulatory clothing prototype developed as a result of the work conclusions must be drawn that on the whole it corresponds to the concept of smart clothing, because the temperature sensor incorporated in the system provides for the clothing response to the temperature changes in the human microclimate space changing the system parameters and this system should be evaluated as an active thermoregulatory clothing. At the same time the experiments with the clothing prototype have demonstrated the ability of the system to sustain the temperature balance preventing extreme increase or decrease during physical activity. The developed clothing prototype is comparatively light, suitable for wearing and for convenient use of the electronic system. Before laundering and cleaning of the garment the system part with the Peltier element together with the detail where the elements are inserted should be taken off.

The concept of thermoregulatory clothing with Peltier elements elaborated in the doctoral theses may serve as basis for solutions of special tasks clothing to provide cooling functions. The research material summarized in the thesis on conductive yarns, possibilities of their application and properties is envisaged for practical application in the study process in RTU as well as for further research in smart textile materials and product manufacture. In the same time the summary of smart textiles inter-sectorial terms explanations will serve for the study and research process.