

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Dizaina tehnoloģiju institūts

Galina Terļecka

Doktora studiju programmas “Apģērbu un tekstila tehnoloģija” doktorante

CILVĒKA KUSTĪBU ENERĢIJAS PĀRVEIDOTĀJA INTEGRĒŠANA APĢĒRBĀ

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
profesore *Dr. sc. ing.*
AUSMA VIĻUMSONE
profesors *Dr. phys.*
JURIS BLŪMS

RTU Izdevniecība
Rīga 2019

Terļeckā, G. Cilvēka kustību enerģijas pārveidotāja integrēšana apģērbā. Promocijas darba kopsavilkums. Rīga: RTU Izdevniecība, 2019. 35 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes “P-11” 2019. gada 26. jūnija lēmumu, protokols Nr. 1.



Šis darbs daļēji izstrādāts saistībā ar Eiropas Sociālā fonda līdzfinansēto projektu “Starpnozaru zinātniskās grupas izveidošana viedo tekstiliju jaunu funkcionālo īpašību attīstīšanai un integrēšanai inovatīvos izstrādājumos”, vienošanās Nr. 2009/0198/1DP/1.1.1.2.0/09/APIA/VIAA/148.

ISBN 978-9934-22-376-1 (print)
978-9934-22-377-8 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2019. gada 8. novembrī Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6, 117. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesore *Dr. habil. sc. ing.* Silvija Kukle,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesore *Dr. Eugenija Strazdiene*,
Viļņas Lietišķo zinātņu universitāte, Lietuva

Profesors *Dr. sc. ing. Rimvydas Milašius*,
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

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

Gaļina Terļeckā (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, trīs nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 91 attēls, 25 tabulas, četri pielikumi, kopā 138 lappuses. Literatūras sarakstā ir 262 nosaukumi.

SATURS

Darba vispārīgs raksturojums.....	5
1. Literatūras apskats	8
2. Materiāli un metodes	10
2.1. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja izveides materiāli	11
2.2. Mērīšanas un testēšanas metodes	11
2.2.1. Induktīvo elementu veidošanas tehnoloģija	11
2.2.2. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja darbības princips.....	14
3. Rezultāti un diskusijas	17
3.1. Elektromehāniskā pārveidotāja konstrukcijas elementu pētījumi.....	17
3.2. Elektromehāniskā pārveidotāja parametru optimizācija	18
3.3. Elektromehāniskā enerģijas pārveidotāja ievietošana valkājamās tekstilijās	21
3.3.1. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja ievietošana žaketē.....	21
3.3.2. Iespējamo elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja ievietošanas vietu analīze un testēšana	23
3.3.3. Enerģijas atkarība no magnēta kustības ātruma	26
3.4. Induktīvā elementa ilgmūžības prognoze	27
3.5. Salīdzinošā enerģijas pārveidotāja ģenerētās enerģijas, attīstītās jaudas un ģeometriskās formas analīze	28
Vispārīgi secinājumi.....	31
Literatūras saraksts	33

DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS

Promocijas darba tēmas aktualitāte

Pēdējā desmitgadē apgērba funkcijas būtiski paplašinājušās. Apgērbā tiek integrētas elektroniskas sistēmas, kas veic veselības stāvokļa kontroli, vides piesārņojuma pārraudzības, komunikācijas, atrašanās vietas noteikšanas un citas funkcijas. Praktiski visu sistēmu pamatā ir dažādu sensoru un aktuatoru integrēšana apgērba elementos. To sekmīgai darbībai ir nepieciešams mobils un vienkārši lietojams enerģijas avots. Lai integrēto elektronisko sistēmu padarītu neatkarīgu no ārējiem avotiem un to apkopes/maiņas, tiek pētīta iespēja tās darbināšanai izmantot cilvēka kustību enerģiju.

Darba mērķis

Integrēt tekstilijās elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju.

Darba uzdevumi

- Veikt analītisko apskatu par viedizstrādājumiem ar integrētiem elektroģeneratoriem/pārveidotājiem un to attīstības tendencēm.
- Izveidot elektromagnētiskos enerģijas pārveidotājus ar plakanu arhitektūru, kas būtu integrējami apgērbā, un optimizēt to parametrus.
- Izpētīt iespējamās elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju integrēšanas vietas apgērbā.
- Izpētīt hidrotermiskās apstrādes ietekmi uz pārveidotāja induktīviem elementiem.
- Izveidot induktīvos elementus, lietojot vairākas tehnoloģijas.
- Noteikt enerģijas pārveidotāja ģenerētās enerģijas daudzuma atkarību no induktīvā elementa formas.
- Izveidot viedā tekstilizstrādājuma prototipus, integrējot tajos elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju.

Aizstāvamās tēzes

- Izveidotais cilvēka kustību enerģijas pārveidotājs ir divdimensionāls un ir integrējams apgērbā, nemainot tā ārējo izskatu un funkcionalitāti.
- Izveidotā apgērba ar integrētiem enerģijas pārveidotājiem testēšanas metodika ļauj noteikt optimālo elementu izvietojumu un skaitu.
- Termoplastisko adhēzijas pārklājumu izmantošana ļauj izveidot pārveidotāja induktīvos elementus, kas iztur vairākkārtēju mazgāšanu.

Promocijas darba zinātniskais jauninājums, praktiskais lietojums

Pētījuma rezultātā izstrādāts apgērbā integrējams, plakans elektrodinamiskais mehāniskās cilvēka kustību enerģijas pārveidotājs elektriskajā enerģijā ar minimālu tilpumu un masu.

Eksperimentāli noteikta optimāla ģeneratora daļu konfigurācija un izvietojums apgērbā.

Promocijas darba aprobācija

Promocijas darba autore ir strādājusi par pētnieci zinātniskās pētniecības projektā “Starpnozaru zinātniskās grupas izveidošana viedo tekstiliju jaunu funkcionālo īpašību attīstīšanai un integrēšanai inovatīvos izstrādājumos”. Promocijas darba rezultāti daļēji iekļauti šī zinātniskā projekta atskaitē.

Promocijas darbā veikto pētījumu rezultāti ir atspoguļoti publikācijās starptautiskos zinātniskos izdevumos.

Nodaļa grāmatā

Blums J., Viļumsone A., Jurkans V., **Terļeckā G.** and Gorņevs I. “Wearable Human Motion and Heat Energy Harvesting System with Power Management” in *Energy Harvesting*, D. R. Manyala, Ed., Rijeka: InTechOpen, 2018.

Raksti zinātniskajos žurnālos

1. Blūms J., **Terļeckā G.**, Viļumsone A. The Electrodynamic Human Motion Energy Converter with Planar Structure // *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 222, pp. 36–39.*
2. Blūms, J., **Terļeckā, G.**, Gorņevs, I., Viļumsone, A. Flat Inductors for Human Motion Energy Harvesting. *SPIE Proceedings*, 2013, Vol. 8763: Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI, pp. 876311–876318. ISSN 0277-786X. Available: doi:10.1117/12.2016995.*
3. **Terļeckā G.**, Viļumsone A., Blūms J., Gorņevs I. The Structure of the Electromechanical Converter and Its Integration in Apparel. *RTU Scientific Proceedings Materials Science*, 2011, Vol. 6, pp. 123–129.
4. Eglīte, L., **Terļeckā, G.**, Blūms, J. Energy Generating Outerwear. *Materials Science. Textile and Clothing Technology*. Vol. 10, 2015, pp. 67–71. ISSN 1691-3132. e-ISSN 2255-8888. Available: doi:10.7250/mstct.2015.010.

Raksti zinātnisko rakstu krājumos

1. **Terļeckā G.**, Viļumsone A., Blūms J. The Electrodynamic Human Motion Energy Harvester in Smart Clothes // *150 Years of Research and Innovation in Textile Science: Book of Proceedings*. Vol. 2, France, Mulhouse, 8–10 June 2011. pp. 866–870.
2. **Terļeckā G.**, Viļumsone A., Blūms J. Washability for the Inductive Elements of the Energy Harvester Integrated into Clothing // *12th World Textile Conference AUTEX 2012 “Innovative Textile for High Future Demands”*: Book of Proceedings, Croatia, Zadar, 13–15 June, 2012. pp. 1459–1464.
3. Viļumsone, A., **Terļeckā, G.**, Blūms, J., Dāboliņa, I. Placement of Flat Generator in Garment. No: *XIIIth International Izmir Textile and Apparel Symposium*, Turkey, Izmir, 2–5 April 2014. Izmir: 2014, pp. 67–72. e-ISBN 978-606-33-8043-6.

* Zinātniskie raksti, kas indeksēti *Web of Science* un/vai *SCOPUS* datubāzē.

4. **Terļeckā, G.**, Blūms, J., Viļumsone, A., Pavāre, Z. Wearable Power Harvester for Medical Applications. No: 4th International Interdisciplinary Scientific Conference “Society. Health. Welfare”, Latvia, Riga, 22–23 November 2012. Scranton: Marywood University, 2014, pp.00046-1–00046-8. ISBN 978-2-7598-0801-4. Available: doi:10.1051/shsconf/20141000046

Konferenču tēzes

1. Blūms J., **Terļeckā G.**, Viļumsone A. The Electrodynamic Human Motion Energy Converter with Planar Structure // The 9th International Conference on Global Research and Education: Inter–Academia 2010: Digest, Latvia, Riga, 9–12 August 2010. pp. 80–81.
2. Blūms J., **Terļeckā G.**, Gorņevs I., Viļumsone A. Apģērbā integrējamais cilvēka kustību enerģijas pārveidotājs // Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress: sekcija “Tehniskās zinātnes”: tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.–27. oktobris, 2011. 26. lpp.
3. Viļumsone, A., Blūms, J., Vališevskis, A., Baltiņa, I., Krieviņš, I., Ziemeļe, I., Šitvjenkins, I., **Terļeckā, G.**, Parkova, I., Šahta, I., Ābele, I., Dāboliņa, I., Grecka, M. Viedie apģērbi cilvēka drošībai un veselībai // Apvienotais pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress “Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte”: tēžu krājums, Latvija, Rīga, 24.–27. oktobris, 2011. 25.lpp. ISBN 9789934102271.
4. **Terļeckā, G.**, Baltiņa, I., Viļumsone, A., Blūms, J. Durability for Smart Clothing with Wearable Energy Source. No: Riga Technical University 53rd International Scientific Conference : Dedicated to the 150th Anniversary and the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni: Digest, Latvia, Riga, 11–12 October 2012. Riga: RTU Press, 2012, pp. 285. ISBN 9789934103605.
5. Blūms, J., **Terļeckā, G.**, Gorņevs, I., Viļumsone, A. Human motion energy harvesters for wearables. No: 9th International Symposium on Flexible Organic Electronics. Workshop on Smart Textiles. Greece, Thessaloniki, 4–7 July 2016. ISFOE16, Book of Abstracts, p. 80.

1. LITERATŪRAS APSKATS

Attīstoties tehnoloģijām, rodas arī jauni risinājumi to lietojumam. Elektronikas funkcionālo iespēju paplašināšanās un elementu ģeometrisku izmēru, masas un patērējamās jaudas strauja samazināšanās, kā arī jauna veida materiālu lietojums to izgatavošanā rada iespēju tekstilizstrādājumos, apavos un aksesuāros ievietot vai integrēt elektroniskas sistēmas, padarot tās mobilas un piešķirot izstrādājumiem papildu funkcijas.

Integrēto elektronisko sistēmu sekmīgai darbībai nepieciešams enerģijas avots [1]. Šim nolūkam lielākoties izmanto atkārtoti uzlādējamus akumulatorus vai vienreiz lietojamās, maināmas baterijas [2], [3]. Lai gan šādi enerģijas avoti ir efektīvi, tomēr tie ne vienmēr ir ekoloģiski un ekonomiski. Baterijas pēc ekspluatācijas ir jāmaina, nepieciešama arī speciāla pārstrāde pēcekspluatācijas fāzē, savukārt akumulatori ir jāuzlādē no kāda cita enerģijas avota, tērējot elektroenerģiju un arī dabas resursus. Lai taupītu neatjaunojamus dabas resursus un samazinātu piesārņojumu, tiek pētītas iespējas par enerģijas avotiem izmantot atjaunojamus resursus [4]–[6], piemēram, vēja vai Saules enerģiju. Apģērbā integrētu elektronikas ierīču darbināšanai par enerģijas avotu iespējams izmantot arī cilvēka radītu enerģiju [6]–[8].

Alternatīvie elektronisko sistēmu barošanas avoti ļauj uzlādēt baterijas vai aizvietot tās, kā arī darboties ar tām kopā, tādējādi palielinot sistēmas darbības drošumu kopumā un novēršot iespējamus barošanas piegādes traucējumus.

Enerģijas pārveidotāji, kas pārveido cilvēka mehānisko kustību enerģiju elektrībā, pēc daudzu pētnieku domām ir uzskatāmi par perspektīvāko un universālāko valkājamo enerģijas avotu [9], [10].

Enerģijas pārveidošanas ierīces var klasificēt dažādos veidos, apsverot: kas nodrošina enerģiju pārveidei; kāda veida enerģija pārveidota; kāds ir enerģijas pārveides princips; kā ierīce izvietota utt. Balstoties uz literatūras analīzi var secināt, ka pastāv trīs veidi, kā iegūt enerģiju, izmantojot viedizstrādājumus:

- viedā izstrādājuma mijiedarbība ar cilvēku (izmantotas cilvēka ķermeņa mehāniskās kustības);
- mijiedarbība ar apkārtējo vidi (izmantota Saules un vēja enerģija);
- mijiedarbība gan ar cilvēku, gan ar apkārtējo vidi (izmantotas cilvēka ķermeņa vai/un vides temperatūras izmaiņas).

Enerģijas pārveidotājiem viedizstrādājumos ir jānodrošina:

- zemas apkalpošanas prasības: lietotājam nav katru dienu jātērē noteikts laiks akumulatoru nomaiņai vai uzlādēšanai;
- ilgstošs ekspluatācijas laiks: enerģijas pārveidotāja ekspluatācijas ciklam jābūt līdzvērtīgam vai jāpārsniedz objekta (apavu, apģērba vai citu priekšmetu, kuros tas integrēts) ekspluatācijas cikls;
- vizuāli neuzkrītošs: enerģijas pārveidotājam jābūt ar nelielu apjomu un svaru, ērti lietojamam, tas nedrīkst traucēt vai ietekmēt valkātāja kustības un radīt papildu slodzi;
- neatkarība no specializētas infrastruktūras: tam jādarbojas jebkurā vietā un jebkurā situācijā, jābūt ekoloģiskam un lētam.

Elektromehāniskie ģeneratori

Viena no iespējām izveidot apgērbā integrētai elektronikas sistēmai ekoloģisku, ekonomisku un mobilo enerģijas avotu ir cilvēka mehānisko kustību radītās enerģijas pārvēršana strāvā un tālāka tās uzkrāšana akumulatorā. Par šādu enerģijas pārveidotāju var kalpot indukcijas spole un magnēts, kuru darbība pamatojas uz elektromagnētiskās indukcijas rašanos vadītājā, mainoties magnētiskā lauka plūsmai.

Literatūras avotos ir sastopami daudzveidīgi apavos un citos valkājamos izstrādājumos integrējami vai portatīvi elektromagnētiskie ģeneratori: elektromagnētiskie rotācijas ģeneratori un ekscentriskie rotācijas ģeneratori (hibrīda ierīce, kas pārveido lineāro vibrāciju rotācijas kustībā), elektromagnētiskie lineārie ģeneratori ar magnēta kustību spolē, ar spoles kustību magnētā [11], ar magnēta kustību, kas ir balstīta uz tuvināšanu un attālināšanu spolei [12], ar magnēta kustību gar spoli, spolei esot paralēlā plaknē [13], bet nav sastopams elektromagnētiskais ģenerators, kas būtu paredzēts integrēšanai tieši apgērbā.

Induktīvo elementu veidi un to iestrādāšana viedapgērbā

Vairākās publikācijās parādīts, ka apgērbā kā valkājamus elektronisko sistēmu elementus [14]–[16] un elektromagnētiska enerģijas pārveidotāja induktorus [17]–[22] ir iespējams izmantot plakanas spirālveidīgas spoles. Apgērbā integrējamiem enerģijas avotiem ir jābūt pēc iespējas plakanākiem, lai tos varētu izvietot uz apgērba virsmas vai arī starp apgērba slāņiem.

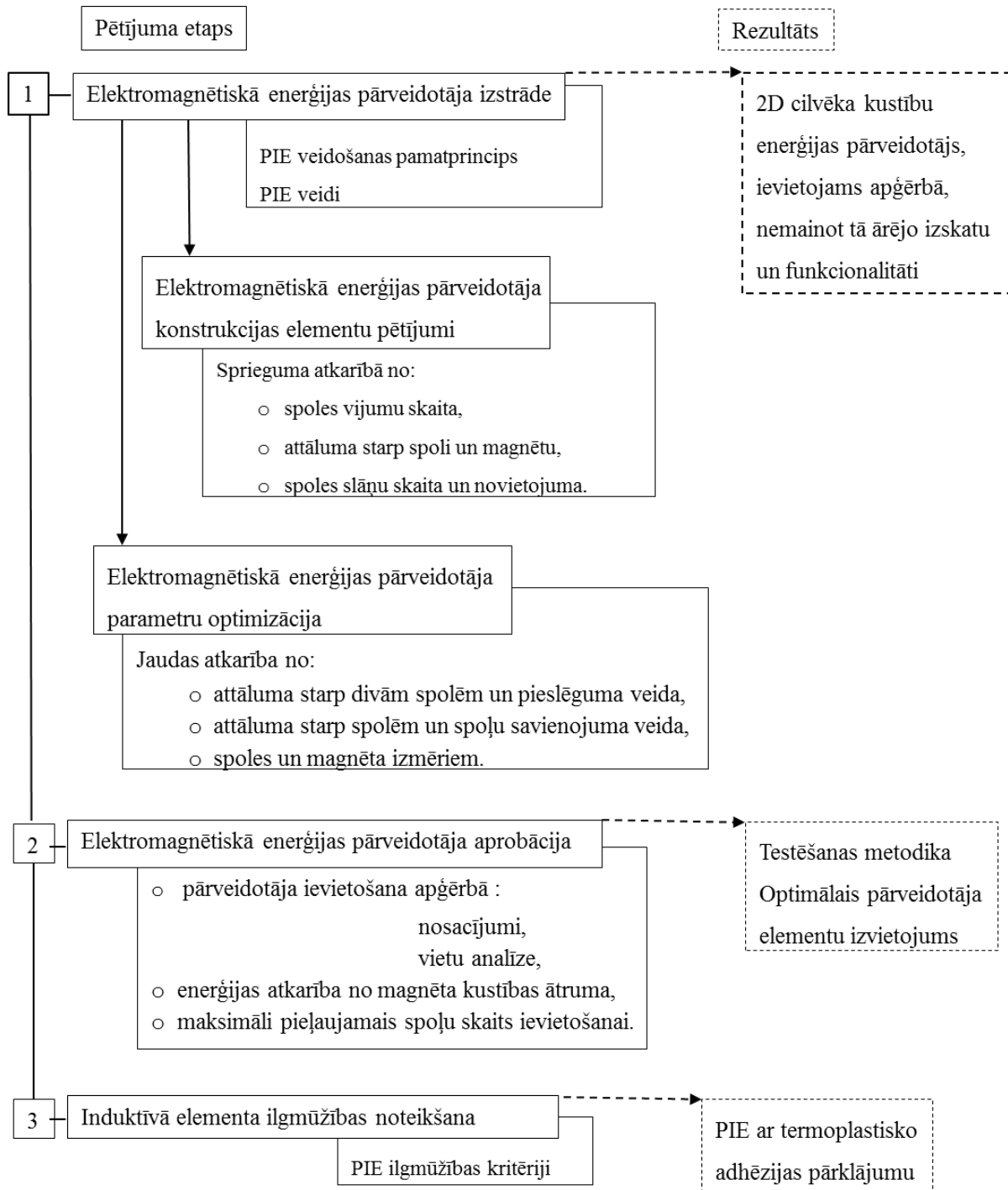
Plakano induktīvo elementu iestrādāšana viedapgērbā atkarībā no integrēšanas pakāpes var notikt divējādi, gan kā adaptēšana/ievietošana apgērbā, paslēpjot tos starp apgērba kārtām, gan arī izstrādājot induktīvos elementus uz tekstilmateriāla bāzes, proti, veidojot tos kā dizaina elementus. Induktīvos elementus kā apgērba dizaina elementus var izstrādāt gan manuāli dažādu rokdarbu tehnikās (izšūšana, tamborējums, tinums u. c.) [23], gan izmantojot strūkļas vai trafaretdruku tekstilmateriāla virsmas pārklājumu izveidei (elektrovadošās tintes, kodinājums folijā u. c.) [24], [25], gan izšujot vai uzšujot ar automatizētām šujmašīnām [14], [26].

Magnētu ietekme uz cilvēka veselību

Ņemot vērā magnēta ietekmi uz cilvēka veselību, tekstilizstrādājumu ar elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju ar plakanu struktūru deklarācijās (instrukcijās) būtu jāiekļauj informācija par iespējamiem veselības apdraudējumiem vai negatīvo ietekmi uz personām ar elektroniskiem kardiostimulatoriem un kardiodefibrilatoriem saistībā ar pastāvīgu magnēta klātbūtni.

2. MATERIĀLI UN METODES

Pētījumu struktūra redzama 2.1. attēlā.



2.1. att. Eksperimentu struktūra.

Lai sasniegtu pētījuma mērķi un atrisinātu pētījuma uzdevumus, promocijas darba izstrādes procesā plānoti un veikti eksperimentāli pētījumi, kuru gaitā katra nākamā eksperimenta veikšanas apstākļus noteica iepriekš veikto eksperimentu rezultāti. Izpētes process veikts trijos secīgos blokos.

2.1. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja izveides materiāli

Elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs sastāv no plakana indukcijas elementa (spoles) un pastāvīgā magnēta.

Induktīvajos elementos jeb spolēs atšķiras:

- vijumu skaits (no 5 līdz 25 pie nemainīga ārējā diametra (16 mm));
- vijumu skaits un diametrs (spoļu diametrs – no 4 mm (8 vijumi) līdz 80 mm (158 vijumi);
- vara vada diametrs (0,1 mm un 0,22 mm);
- slāņu skaits (no 1 līdz 5);
- izolējošais slānis starp spolēm un aizsargpārklājumu (2.5. un 2.6. att.);
- dizaina formu risinājumi (taisnstūra, astroīdas, hipocikloīdas un apaļa);
- materiāla veids (vara vads, elektrovadošs pavediens vai vara folija),
- izgatavošanas tehnoloģija (manuāla vai mehanizēta: izšūšana, uzšūšana vai kodināšana).

Eksperimentos izmantotajiem magnētiem ir atšķirīga:

- forma (taisnstūra paralēlskaltnis, gredzena daļa);
- magnēta sastāvs (neodims vai itrijs);
- lineārie izmēri;
- magnētiskā lauka indukcija (no 0,1 T līdz 4 T);
- magnētiskā lauka struktūra (parasta vai dubulta – divi magnēti savienoti virknē tā, lai pretējie poli būtu vienā plaknē).

2.2. Mērīšanas un testēšanas metodes

2.2.1. Induktīvo elementu veidošanas tehnoloģija

Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja spole veidota vienā plaknē kā spirālveidīga struktūra ar pieaugošu liekuma rādiusu, izvietojot vijumus tā, lai tie nesaskaras. Vijumu izolācija vienam no otra ļauj novērst nevēlamo elektrisko kontaktu starp blakus vijumiem apgērba daļu kustības un deformācijas dēļ. Plakanā spoles ģeometrija nodrošina pārveidotāja minimālu tilpumu, līdz ar to iespējams to pilnībā ievietot apgērbā.

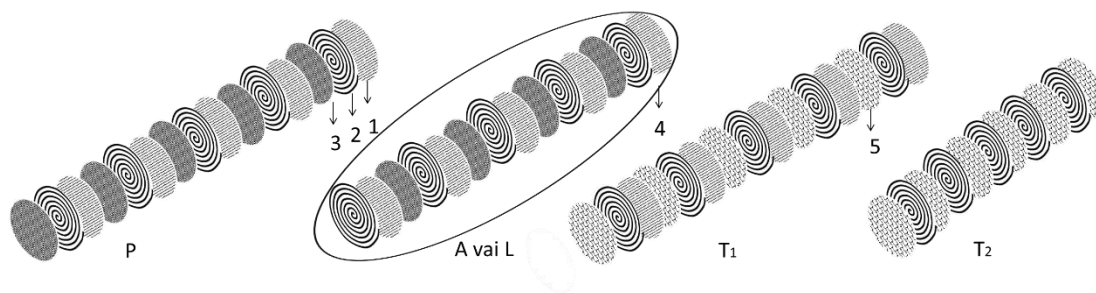
Pamateksperimentos izmantotas no vara vada Arhimēda spirāles formā manuāli uztītas spoles uz elastīgas un izolējošas pamatnes (neausta drāna ar adhēzijas slāni; 2.2. att.).



2.2. att. Vienslāņa spole.

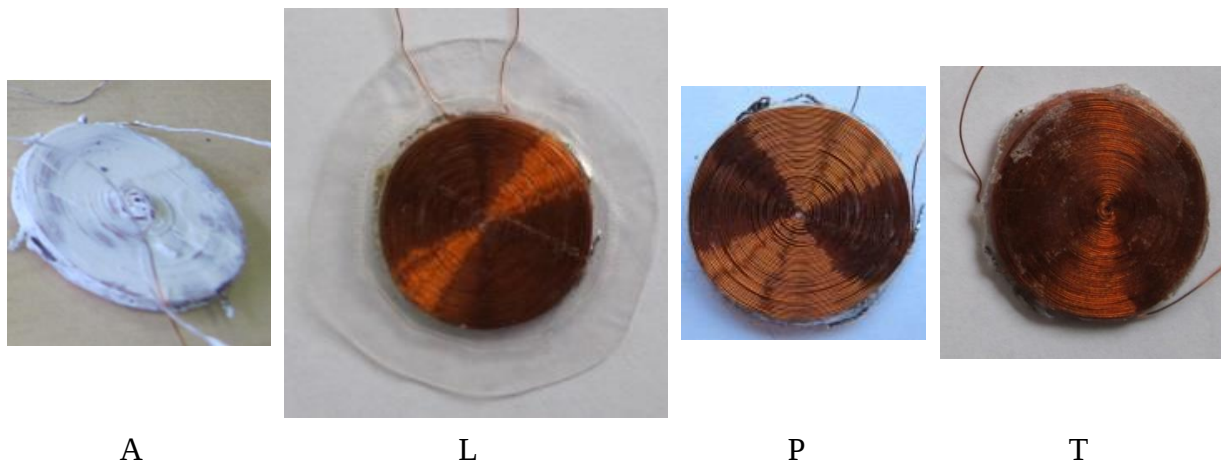
2.3. un 2.4. attēlā parādīta informācija par piecu slāņu spolēm ar dažādiem izolējošiem slāņiem, kas ir sagatavoti mazgāšanas testam:

- 1 – neausta, netermoplastiska drāna ar adhēzijas slāni;
- 2 – vara vada plakanā spole;
- 3 – plēve ar divpusīgo adhēzijas slāni;
- 4 – papild aizsargpārklājums – laminēšana vai aizsargpārklājums;
- 5 – termoplastiskais adhēzijas pārklājums (līmes tīmeklis).



2.3. att. Spoles slāņu veidi.

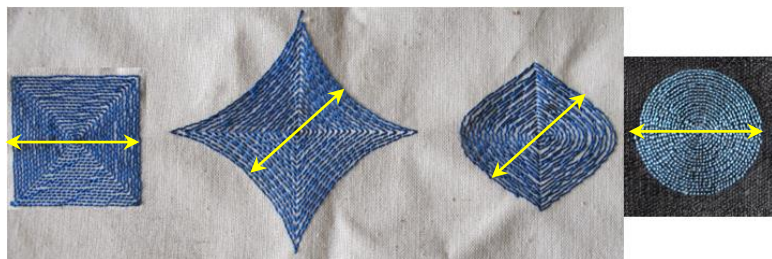
P – spole ar primāru vada pārklājumu. A – spole ar divpusēju aizsargpārklājumu. Aizsargpārklājums, kas nemaina biezumu un vienmērīgu struktūru ūdens iedarbības laikā, izveidots Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē (RTU), un to nosaukumi un apraksts šobrīd ir komerciāls noslēpums. Izmantojot laminēšanas ierīces un 125 mikronu biezu laminēšanas plēvi, izgatavota spole ar divpusēju aizsargpārklājumu (L). Termoplastiskais adhēzijas pārklājums izveidots, induktīvajam elementam uzklājot termoplastisko polimēra drānu (līmes tīmekli) (T1 un T2).



2.4. att. Induktīvais elements ar dažādiem aizsargpārklājumiem atbilstoši 2.3. attēlam.

Pētījumā izveidoti induktīvie elementi ar dažādajiem dizaina risinājumiem, izmantojot izšūšanas mašīnas (2.5. un 2.7. att.) un PCB (*Printed Circuit Board*) tehnoloģiju (2.9. att.).

Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja plakano induktīvo elementu automatizētā mašīnizšūšana veikta ar slēgdūriena *Brother PR600* izšūšanas mašīnu (2.6. att.). Pētāmo struktūru izšūšanai kā apakšējais spolītes diegs izmantots elektrovadošs pavediens, lai tas būtu mazāk pakļauts vairākkārtējai mehāniskai iedarbībai. Izšūšana notiek, iespīlējot drānu izšūšanas rāmī.

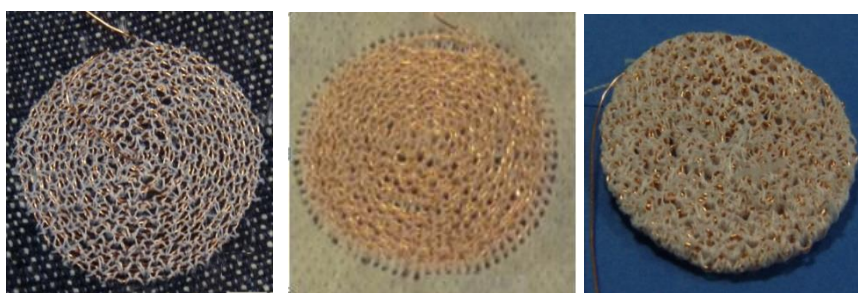


2.5. att. Automatizēti izšūtas plakanās spoles (taisnstūra, astroīdas, hipocikloīdas un spirālveida forma).



2.6. att. Izšūšanas process (autors U. Briedis).

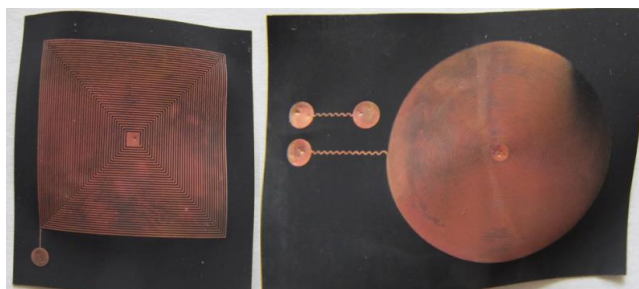
Vara vada plakano induktīvo elementu iespējams iegūt ne tikai manuāli, bet arī ar uzšūšanas tehnoloģiju, lietojot *SZK JCL 0100-585* automatizēto izšūšanas mašīnu. Uzšūšanas tehnoloģija ļauj izmantot elektrovadu (kas ir trauslāks par elektrovadošo pavedienu), jo uzšūšanas laikā elektrovadošs vads pakļauts mazākai slodzei, salīdzinot ar automatizēto izšūšanu. Elektrovadošs vads uz izšūšanas zonu padots atsevišķi ar speciālas pierīces palīdzību un piestiprināts pie drānas virsmas vai pie ūdenī šķīstoša palīgmateriāla ar zig-zag dūrieniem (2.7. un 2.8. att.). Spoles veidotas kā Arhimēda spirāles ar diametru 25 mm katra, un tās atšķiras ar vada diametru (0,2 mm un 0,3 mm) un vijumu skaitu (25 un 50).



2.7. att. Automatizēti uzšūtas plakanās spoles (uz drānas virsmas un uz ūdenī šķīstoša palīgmateriāla pirms un pēc ūdens iedarbības).



2.8. att. Uzšūšanas process (autore V. Mečnika).



2.9. att. Spoles ar *PCB* (*Printed Circuit Board*) tehnoloģiju.

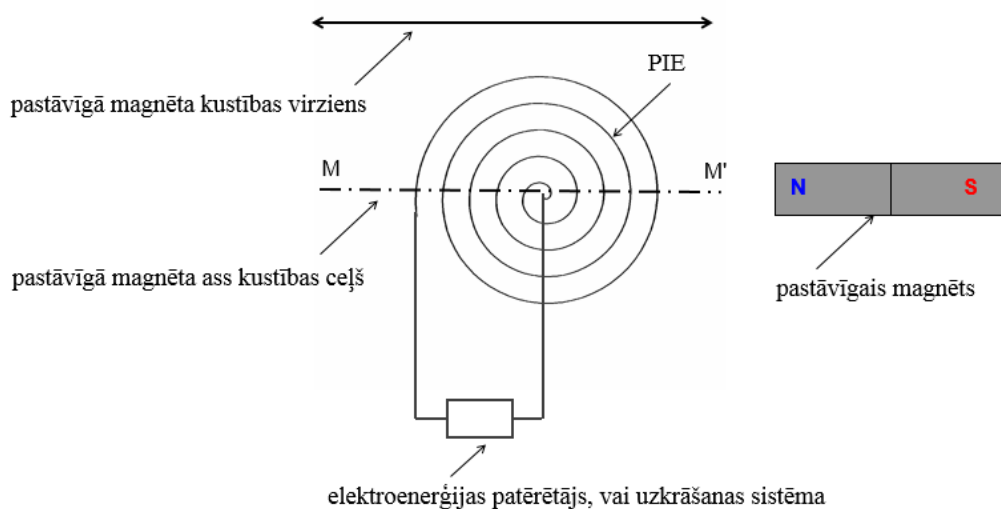
Spolēs ar *PCB* tehnoloģiju spirālveida elements izveidots ar elektroķīmiskas kodināšanas tehnoloģu uz lokanas dielektriskās pamatnes (2.9. att.).

Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja testēšanai izmantoti piecu un četru slāņu spirālveida indukcijas elementi. Daudzslāņu spoles izveidotas, salodējot virknē savienotas vienslāņa spoles, kas izvietotas viena virs otras ar vienādi vērstiem vijumu virzieniem un izolējošo slāni starp spolēm. Katras spoles diametrs ir 25 mm, un spoles vijumu skaits ir 50, vijumi veidoti no 0,22 mm diametra vara vada.

2.2.2. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja darbības princips

Elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs ar plakānu struktūru darbojas pēc elektromagnētiskās indukcijas principa, pārveidojot cilvēka mehāniskās kustības elektroenerģijā. Elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs sastāv no plakana indukcijas elementa (spoles) un pastāvīga magnēta (2.10. att.).

Magnēta periodiskās kustības gar spoli paralēlā plaknē veido magnētiskā lauka periodiski mainīgu plūsmu, kas šķērso spoli un rezultātā rada elektrisko strāvu spolē.

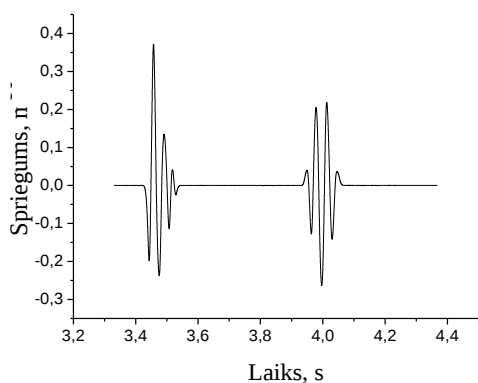


2.10. att. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja sastāvdaļas.

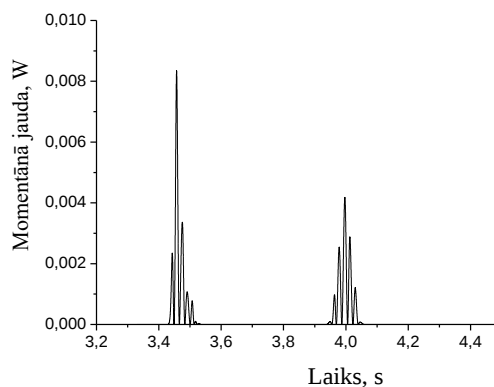
Nepārtraukti mainīgu magnētiskā lauka plūsmu iespējams panākt, ja pastāvīgā taisnstūra magnēta ass (dienvidu–ziemeļu virziens) sakrīt ar magnēta kustības virzienu attiecībā pret spoli. (2.10. att., taisne MM'). Šajā gadījumā ģenerējamās maiņstrāvas frekvence būs vienāda ar magnēta svārstību frekvenci (vienas spoles gadījumā), kas ir atkarīgs arī no magnētiskā lauka formas/struktūras. Lai magnētiskā lauka plūsmas izmaiņas ātrums katrā laika momentā, magnētam pārvietojoties virs spoles, būtu atšķirīgs no nulles, magnēta garumam ir jābūt tuvam vai jāsakrīt ar spoles ārējo diametru [28].

Plakanā elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja raksturlielumu noteikšana

Magnētam virzoties gar plakanajiem induktīvajiem elementiem (PIE), veidojas laikā mainīga magnētiskā lauka plūsma, kas inducē spolē indukcijas elektrodzinējspēku, kas savukārt noslēgtas ķēdes gadījumā veido elektrisko strāvu.



2.11. att. Plakanā induktīvā elementā ģenerētais elektrodzinējspēks.



2.12. att. Pārveidotāja attīstītā momentānā jauda.

Eksperimenta laikā noteikts inducētais spriegums uz PIE virknē savienotās rezistīvās slodzes (2.11. att., slodzes pretestība vienāda ar PIE pretestību). Atbilstoši 2.12. attēlam, summārā **enerģija**, kas impulsa laikā izdalās slodzē ir vienāda ar laukumu, kuru ierobežo P līkne un laika ass. Lai raksturotu enerģijas pārveidotāju prototipā, noteikta vidējā attīstītā jauda kā ģenerētā enerģija cilvēkam soļojot ar nemainīgu kustības ātrumu, dalīta ar kustības laiku.

Attīstītā **jauda** [W] aprēķināta kā vidējā momentānās jaudas vērtība laika periodā (2.13. att.):

$$P = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P dt = \frac{W}{\tau}. \quad (2.1.)$$

Lietderības koeficients jeb efektivitāte (ģenerētā enerģija kā magnēta kinētiskās enerģijas daļa, izteikta procentos)

$$k = \frac{2W}{mv^2} 100. \quad (2.2.)$$

Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja ievietošana apgērbā un testēšana

Uz apgērbā enerģijas pārveidotāja daļu plānotajās ievietošanas vietās (3.6. att.) piestiprināti magnēti ar marķieriem, ar kuru palīdzību, imitējot cilvēka soļošanu, apzīmēta magnētu kustības trajektorija. Iegūtā magnēta trajektorijas līkne atbilst EMP¹ induktīvo elementu centru novietojumam (3.8. att.).

Mazgāšanas procedūru raksturojums

Mazgāšana mājas apstākļos veikta saskaņā ar ISO 6330:2012 standartu [29].

Mazgāšanas procedūras raksturojums:

- izmantota automātiskā priekšējās ielādēs A tipa veļas mašīna, ūdens temperatūra – 40 °C mazgāšanas cikla ilgums – 70 minūtes, izmantojot mazgāšanas līdzekli *Persil Color Gel*, auksto skalošanas ciklu un izmazgātā parauga mehānisku ūdens aizvadīšanu;
- žāvēšana veikta istabas temperatūrā (22 ± 2) °C.

Visas spoles pirms mazgāšanas ievietotas žaketēs.

Induktīvā elementa **elektriskās pretestības mērījumi** veikti, izmantojot divkontakta digitālo multimetru *Velleman DVM860BL* (2.17. att.).

Izgatavotajām spolēm pārbaudīta elektriskās pretestības atbilstība pirms un pēc viena, pieciem un 10 mazgāšanas un žāvēšanas cikliem.



2.13. att. Elektriskās pretestības mērīšana.

EMP elektriskā sprieguma mērīšana un datu reģistrēšana veikta ar digitālo osciloskopu *Tektronix TDS 2014* un *Picoscope 2205*, lai novērotu elektriskā sprieguma maiņu konkrētā laika posmā.

Izmantojot *OriginPro 8.5* un *Excel* datorprogrammas, tika veikta apgērbā ievietotā enerģijas pārveidotāja eksperimentālo pētījumu **datu apstrāde**, kā arī ģenerētās enerģijas un jaudas aprēķini un statistiskā analīze, datu grafiskā vizualizācija un citas darbības.

¹ EMP – elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs

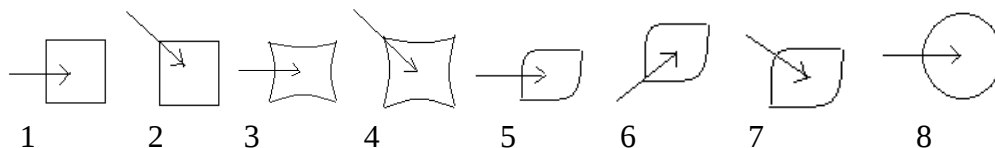
3. REZULTĀTI UN DISKUSIJAS

Līdz šim piedāvātie mehāniskās enerģijas pārveidotāji ir trīsdimensionālas ierīces, kas nav pieņemamas integrēšanai apgērbā. Aizvietojot tradicionālo cilindrisko induktīvo elementu (spoli) enerģijas pārveidotājā ar plakanu spirālveidīgu spoli un tradicionālo magnēta kustību spolē vai spoles kustību magnētā ar magnēta kustību gar plakanu induktīvo elementu (nešķērsojot tās plakni), ir iespējams izveidot cilvēka kustību mehāniskās enerģijas pārveidotāju no plakanas struktūras elementiem, kas pilnībā integrējams kustīgās apgērba daļās.

3.1. Elektromehāniskā pārveidotāja konstrukcijas elementu pētījumi

Pārveidotāja efektivitātes salīdzinājums, izmantojot dažādas formas un dažādos veidos izgatavotus induktīvos elementus

Par pārveidotāja efektivitātes kritēriju izvēlēts jaudas vērtības lielums. Lai uzzinātu, kā pārveidotāja efektivitāti ietekmē spoles ģeometriskās formas, izgatavošanas tehnoloģija un magnēta kustības virziens gar spoli, tiek salīdzināta attīstītā jauda *PBC* tehnoloģijās, uzšūtiem induktīviem elementiem un dažādas formas spirālveida izšūtiem induktoriem (3.1. att.). Skaitliskās vērtības ir apkopotas 3.1., 3.2. un 3.3. tabulā.



3.1. att. Spoles forma un magnēta kustības virziens.

3.1. tabula

Eksperimentāli noteiktie induktīvo elementu, kas iegūti ar *PCB* tehnoloģiju, darbības parametri

Spoles forma un magnēta kustības virziens atbilstoši 3.1. att.	Spoles veids un parametri	Vidējā enerģija, μJ	Vidējais laiks, s	Vidējā jauda, μW
8	Manuāli uztīta spole ar diametru 3 cm un vijumu skaitu 60. $R = 2,2 \Omega$	113,82	0,130	875,54
	Spirālveidīga spole ar <i>PCB</i> tehnoloģiju ar diametru 3 cm. $R = 116 \Omega$	4,31	0,146	29,62
1	Taisnstūra spole ar <i>PCB</i> tehnoloģiju. $R = 10,1 \Omega$	6,35	0,126	50,39
2		9,41	0,116	81,12

PCB tehnoloģijas spolei jaudas vērtības ir ievērojami mazākas nekā no vada manuāli veidotai spolei, jo tai ir ļoti liela iekšējā pretestība ļoti mazā vadu šķērsgriezuma dēļ. Rezultātā sprieguma vērtības ir augstākas (maksimums vienai spolei – 200 mV), savukārt izdalītās enerģijas daudzums – mazāks. Manuāli veidotai spolei ir lielāka attīstītā jauda

(praktiski 30 reizes augstāka, savstarpēji salīdzinot divas apaļas spoles), savukārt ģenerētais spriegums ir ar zemāku vidējo vērtību (maksimums – ap 120 mV). Tomēr jāatzīmē, ka taisnstūra PCB variantā spolei pretestība 11 reizes mazāka nekā apaļa variantā, turklāt vidējo enerģiju un jaudu var 1,5 reizes palielināt, pārvietojot magnētu pa diagonāli.

3.2. tabula

Eksperimentāli noteiktie izšūto inductīvo elementu darbības parametri

Spoles forma un magnēta kustības virziens atbilstoši 3.1. att.	Vijumu blīvums, līn./mm	Pretestība R_{sl} , Ω	Vidējā enerģija, μJ	Vidējais laiks, s	Vidējā jauda, μW
1	1,5	8,8	1,99	0,088	22,69
2			1,16	0,081	14,64
3	1,5	10,1	2,05	0,073	28,28
4			1,38	0,062	22,46
5	1,5	8,0	2,18	0,071	31,11
6			1,94	0,074	26,60
7			1,41	0,080	18,00
8	1,5	8,3	2,21	0,075	29,84

Izšūtajām spolēm ir mazāks vijumu skaits nekā manuāli izgatavotajai spolei un salīdzinoši liela iekšējā pretestība, tādēļ enerģijas un jaudas vidējas vērtības nav lielas, salīdzinot ar manuāli izgatavoto spoli. Pārvietojot magnētu pa diagonāli, vidēja enerģija un jauda samazinās.

3.3. tabula

Eksperimentāli noteiktie nošūto inductīvo elementu darbības parametri

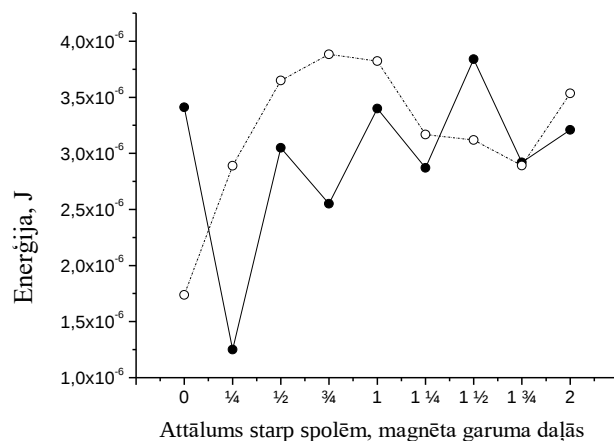
Spoles forma un magnēta kustības virziens atbilstoši 3.1. att.	Vara vada diametrs, mm	Pretestība R_{sl} , Ω	Vidējā enerģija, μJ	Vidējais laiks, s	Vidējā jauda, μW
8	0,2	0,70	6,62	0,072	91,25
	0,3	0,47	6,55	0,076	86,09

Uzšūtajām spolēm enerģijas un jaudas vērtības ir mazākas nekā manuāli izgatavotai spolei, kas ir izskaidrojams ar to, ka šādai spolei ir divas reizes mazāks vijumu skaits. Uzšūtajām spolēm jaudas vērtības ievērojami pārsniedz izšūto inductīvo elementa jaudu.

3.2. Elektromehāniskā pārveidotāja parametru optimizācija

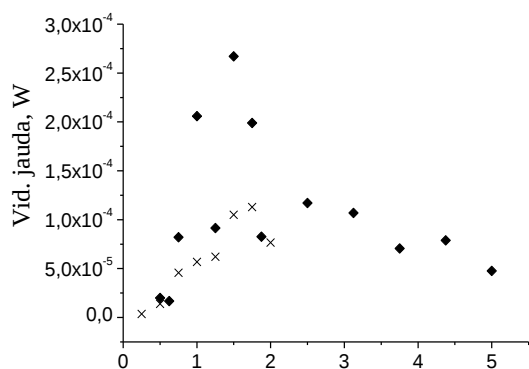
Lai optimizētu pārveidotāja parametrus, nodrošinot maksimāli lielu ģenerēto jaudu uz tilpuma vienību, pētījumi turpināti, mainot spoļu pieslēguma un savienojuma veidu, spoļu slāņu skaitu un to savstarpējo izvietošanu. Eksperimentāli ir noteikta:

- sprieguma atkarība no attāluma starp divām spolēm un pieslēguma veida (3.2. att.);
- attīstītās jaudas atkarība no spoles un magnēta izmēriem (3.3. att.);
- attīstītās jaudas atkarība no attāluma starp spolēm un spoļu savienojuma veida (3.5. att.).

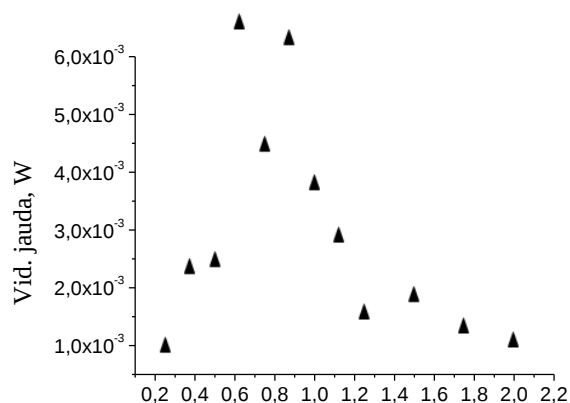


3.2. att. Ģenerējamā enerģija atkarībā no attāluma starp spolēm: o – enerģija, kas ģenerēta divās virknē savienotās spolēs; • – summārā enerģija, kas ģenerēta divās savstarpēji nesavienotās spolēs.

- Elektrodzinājspēki (EDS) būs vērsti vienā virzienā un pastiprinās viens otru, ja vienlaikus otrajā spolē veidosies viena magnēta pola pieaugošā plūsma, bet pirmajā spolē vēl eksistēs pretējā pola krītošā plūsma.
- Inducēto EDS konstruktīvās summēšanās (sprieguma impulsi pastiprina viens otru) visefektīvāk realizējas gadījumā, kad attālums starp spolēm ir $\frac{3}{4}$ no magnēta garuma; summārā ģenerētā enerģija ir ap 4 mJ, maksimālā attīstīta jauda – 58 mW, maksimālais EDS – 54 mV.



Spoles diametra un magnēta garuma attiecības, D/L



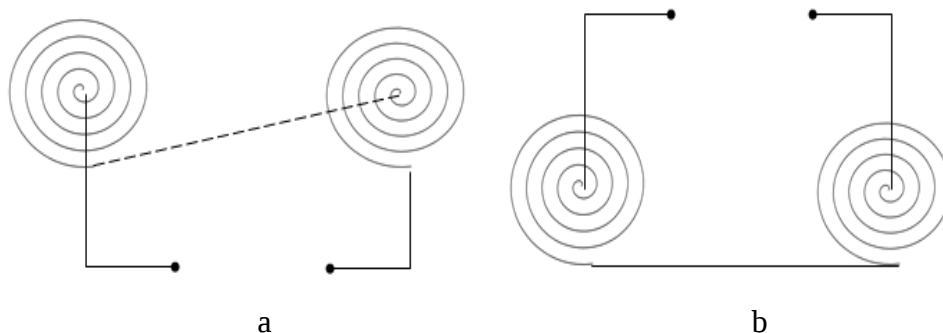
Spoles diametra un magnēta garuma attiecības, D/L

3.3. att. Ģenerētās jaudas atkarība no spoles diametra D un magnēta garuma L attiecības, D/L : “◆” – 1. magnēts $L = 8$ mm; “x” – 2. magnēts $L = 20$ mm, “▲” – 3. magnēts $L = 40$ mm.

Spoles diametrs tika mainīts no 4 mm (8 vijumi) līdz 80 mm (158 vijumi).

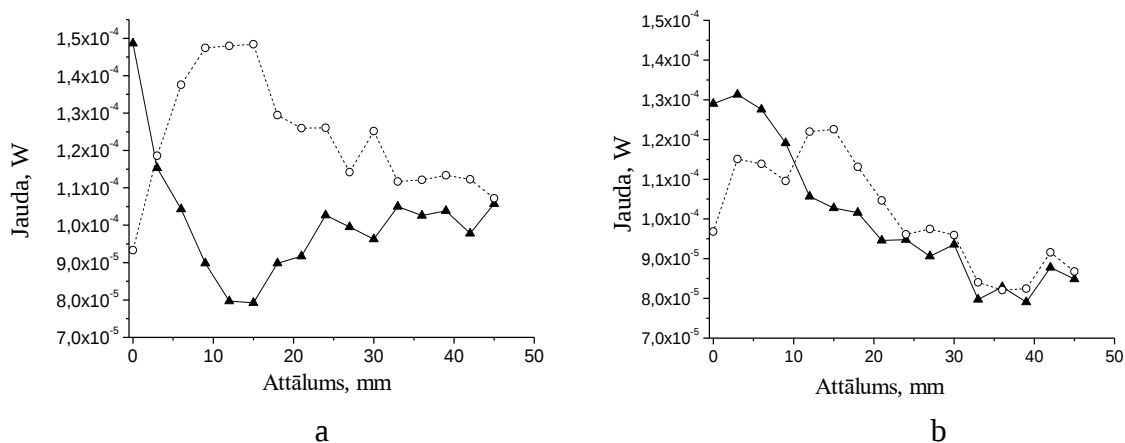
Novērots jaudas maksimums: taisnstūra magnētiem pie $D/L = 1,5$ (1. magnēts), $D/L = 1,75$ (2. magnēts) un lokveida magnētam (3. magnēts) $D/L = 0,625$.

Vislielākās attīstītās jaudas 6,83 mW iegūtas, izmantojot lokveida magnētu ar dubulto magnētiskā lauka struktūru (3. magnēts) un spoli ar 50 vijumiem un diametru 25 mm.



3.4. att. Spoļu savienojuma veids: a – sprieguma impulsiem ir vienāda polaritāti; b – sprieguma impulsiem ir pretēja polaritāte.

Eksperimenti veikti diviem spoļu savienojumiem: pirmajā gadījumā divas spoles savienotas tā, ka ģenerētie sprieguma impulsi ir ar vienādu polaritāti; otrajā gadījumā – sprieguma impulsiem ir pretēja polaritāte (3.4. att). Spolēs attīstītās jaudas atkarība no attāluma starp tām ir parādīta 3.5. attēlā.



3.5. att. Kopējā attīstītā jauda divām virknē savienotām spolēm kā funkcija attālumam starp spoļu malām: a – izmantots 4. magnēts ar dubulto magnētisko lauku, b – izmantots 5. magnēts: o – ģenerētajiem sprieguma impulsiem ir vienāda polaritāte, ▲ - ģenerētajiem sprieguma impulsiem ir pretēja polaritāte.

No spoļu savienojuma veida ir atkarīgs attālums starp spolēm, pie kura novērota attīstītās jaudas maksimālā vērtība. Savienojot spoles tā, ka ģenerētajiem impulsiem ir pretēja polaritāte, ir iespējams samazināt attālumu starp spolēm līdz nullei, tādējādi palielinot elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja attīstīto jaudu. Grafiks (3.5. att. a) rāda, ka praktiski to pašu jaudu var sasniegt pie vienādas polaritātes, palielinot attālumu starp spolēm (10–15 mm). Novērots jaudas maksimums (3.5. att. b) ģenerētajiem sprieguma impulsiem ar pretēju polaritāti (5 mm).

3.3. Elektromehāniskā enerģijas pārveidotāja ievietošana valkājamās tekstilijās

Efektīvai elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja darba nodrošināšanai ir nepieciešama vairāku nosacījumu izpilde:

- pārveidotāja detaļām jābūt izvietotām tā, lai tās kustības laikā attiecībā viena pret otru pārvietotos kopā ar atbilstošajām apgērba daļām;
- detaļām ar EMP daļām ir jāpārvietojas vienai gar otru pēc iespējas tuvāk;
- induktīvo elementu izvietojuma vietai jābūt maksimāli plakana un kustības laikā nav jāpakļaujas deformācijām;
- pārveidotāja detaļas nedrīkst mainīt apgērba īpašības un ārējo izskatu;
- vēlams nodrošināt maksimālo ātrumu magnēta kustībai gar induktīviem elementiem, jo ģenerētās enerģijas daudzums ir tieši proporcionāls magnēta kustības enerģijai.

Visi šie nosacījumi var tikt izpildīti, izvietojot elektropārveidotāja detaļas apgērba daļās, kas kustības laikā atrodas maksimāli tuvu viena otrai, tas savukārt cilvēka kustību laikā nodrošinās magnēta pārvietošanos attiecībā pret induktīvo elementu, tādējādi ievietotais pārveidotājs pārvērtīs cilvēka mehāniskās kustības elektroenerģijā.

3.3.1. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja ievietošana žaketē

Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja detaļas ievietotas apgērba elementos, kas cilvēka kustību laikā pārvietojas viens gar otru. Magnēta periodiskās kustības gar spoli veido periodiski mainīgu magnētiskā lauka plūsmu, kas šķērso spoli un ģenerē elektrisko strāvu spolē.

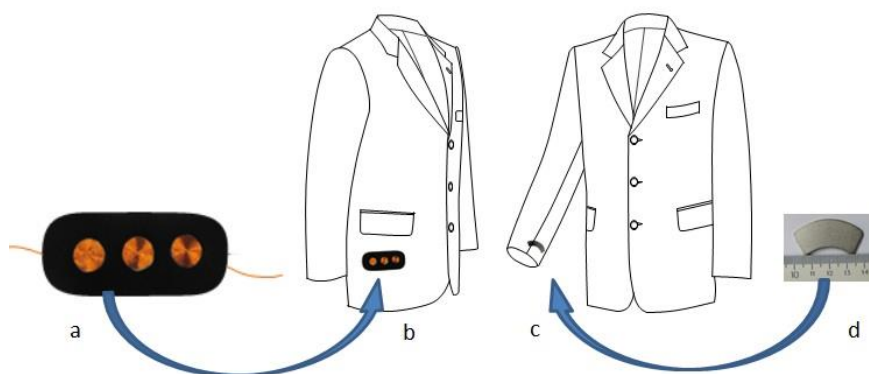
Spoles un magnēta izvietojuma vietas, spoļu slāņu un spoļu skaits noteikts eksperimentāli. Izveidotajā prototipā (vīriešu žakete) enerģijas pārveidotāja elementi ievietoti (3.6. att.) plaukstas pamata līmenī starp audumu kārtām, saglabājot simetriskumu:

- magnēts ievietots piedurknes apakšvīles dūrgala rajonā,
- induktīvais elements novietots žaketes priekšdaļā (sānkabatas rajonā).

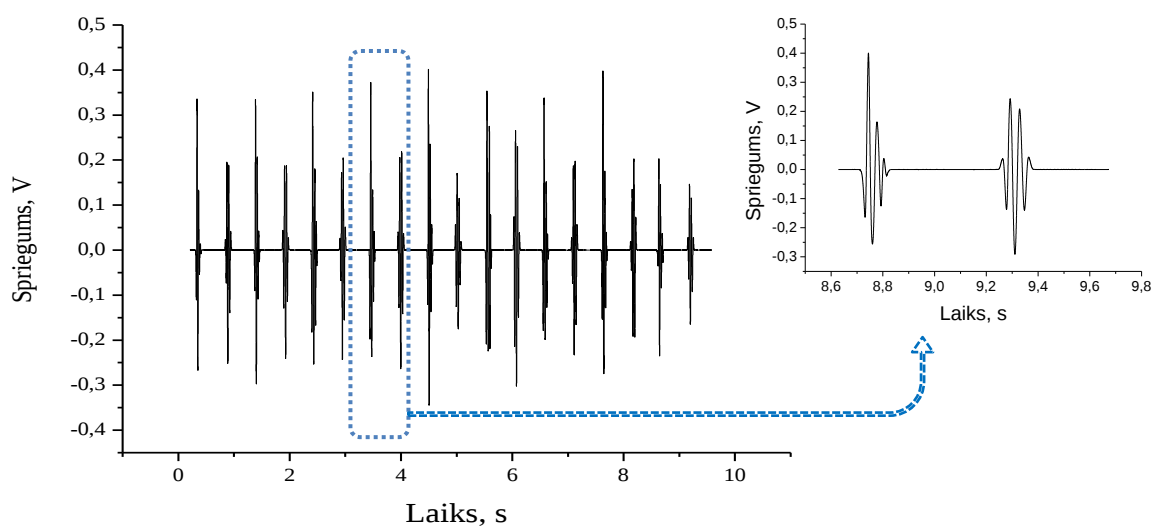
Magnētu un spoļu ievietošana panākta bez žaketes pamatkārtas deformācijām; to novietojums izstrādājuma virspusē praktiski nav redzams, kaut arī drānu paketes cietība, protams, ir palielinājusies.

Prototipā vienlaikus ievietoti divi enerģijas pārveidotāji – labajā un kreisajā pusē ar iespēju izvēlēties darba režīmu: EDS un rezistīvā režīmā. Elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs testēts, valkātājam veicot soļošanu ar ātrumu: 3 km/h; 4,5 km/h un 6 km/h, kas atbilst vīrieša lēnai, vidēji ātrai un ātrai soļošanai.

Labajā pusē divos režīmos testēts enerģijas pārveidotājs ar piecslāņu induktīvajiem elementiem. Testu laikā ar digitālo osciloskopu *Picoscope 2205* fiksēti pārveidotāja uz rezistīvās slodzes veidotie sprieguma impulsi (3.7. att.). 3.4. tabulā ir uzrādīti enerģijas pārveidotāja raksturlielumi.



3.6. att. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja elementi un to izvietojums apģērbā: a – spirālveida induktīvais elements, b – induktīvā elementa izvietojums, c – magnēta izvietojums, d – pastāvīgais magnēts.



3.7. att. Ģenerējamā sprieguma impulsu evolūcija deviņos pilnos soļošanas ciklos un viena cikla impulsi pie kustības ātrumā 6 km/h. Pilns soļošanas cikls – dubultā soļa periods – summējās, katrai rokai kustoties uz priekšu un atpakaļ.

Testu laikā novērots zināms impulsu nesimetriskums, kas saistīts ar piedurknes kustības trajektoriju un individuālo kustību stereotipu.

3.4. tabula

Enerģijas pārveidotāja ģenerētā jauda pie dažāda kustības ātruma

Kustības ātrums, km/h	Soļu skaits 1 minūtē	Maksimāla momentānā jauda, μW	Vidējā jauda $\pm$ absolūtā kļūda (ticamības varbūtība $p = 0,95$), μW	Relatīvā kļūda, %	Jaudas blīvums, $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
3,0	80	3000	37 ± 16	45,0	8
4,5	103	14 000	77 ± 20	25,5	16
6,0	115	10 000	199 ± 20	9,9	41

Maksimālā momentānā jauda ($14000 \mu\text{W}$) novērota pie kustības ātruma $4,5 \text{ km/h}$, maksimālā vidējā attīstītā jauda ir $199 \mu\text{W}$ (cilvēkam soļojot ar ātrumu 6 km/h). Testa rezultātus ar kustības ātrumu 6 km/h var uzskatīt par vienveidīgiem.

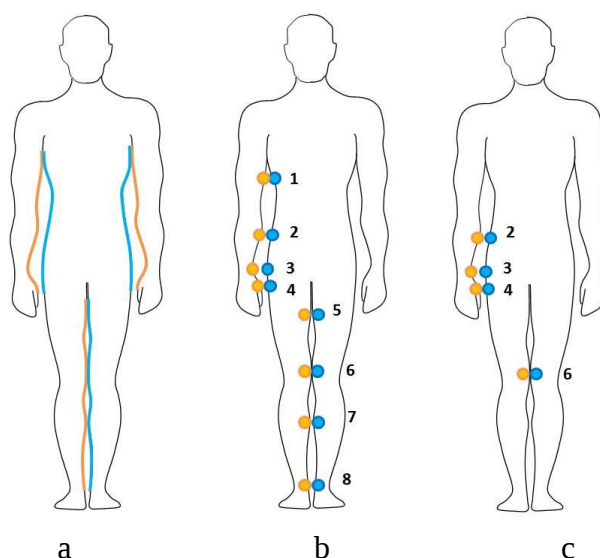
3.3.2. Iespējamo elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja ievietošanas vietu analīze un testēšana

Enerģijas pārveidotāja konstrukcijas elementi nav apvienoti vienā korpusā un tos var ievietot praktiski visu veidu apgērbos un/vai aksesuāros (piem., somās), kam ir divas cilvēka kustību laikā savstarpēji kustīgas detaļas, kas atrodas tuvu viena otrai.

Iespējamās vietas enerģijas pārveidotāja daļu izvietošanai ir rokas un virsmas, kas pakļautas neapzinātai dabiskai mijkustībai, kā arī kāju iekšējās virsmas. Iespējamās magnēta izvietojuma vietas ir apzīmētas ar oranžu krāsu, induktīvo elementu izvietojums – ar zilu krāsu (3.8. att. a).

Maksimālo ātrumu magnēta kustībai gar induktīviem elementiem iespējams sasniegt, izvietojot enerģijas pārveidotāja elementus 4. pozīcijā atbilstoši augšējā ķermeņa daļā un 8. pozīcijā pie apakšējām ekstremitātēm. Savukārt 1. un 5. pozīcijās ātrums ir minimāls.

No cilvēka ķermeņa anatomiskās uzbūves viedokļa vispiemērotākās vietas pārveidotāja ievietošanai ir augšējo ekstremitāšu un torša sānu daļā saskares vietas (1.–4. pozīcija). Vidēja augumlieluma gadījumā ir iespējams minimāls attālums starp enerģijas pārveidotāja elementiem 1. un 2. pozīcijās.



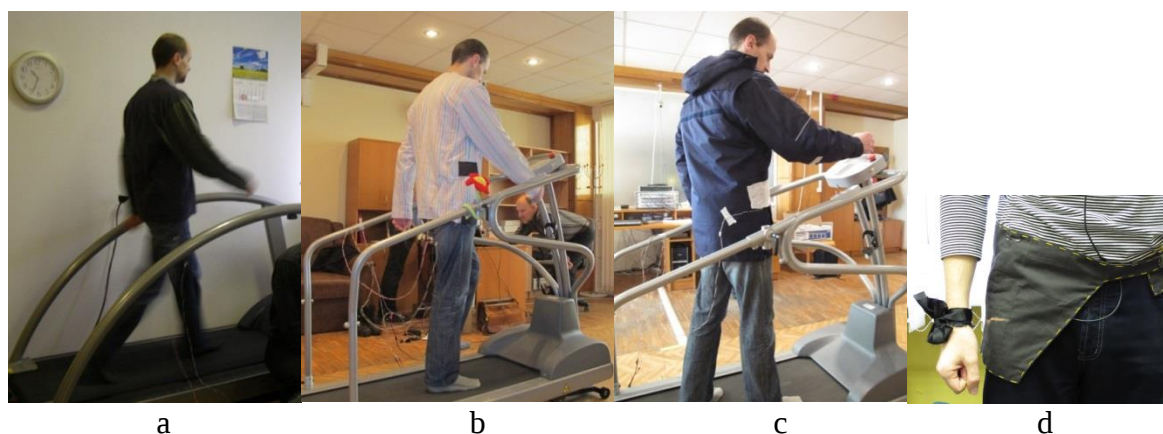
3.8. att. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja detaļu izvietojuma vietas: a – iespējamās izvietojuma vietas; b – sākotnējās testēšanas vietas; c – izvēlētās vietas testēšanas atkārtošanai.

Projektējot enerģijas pārveidotāja elementus to ievietošanai biksēs (5.–8. pozīcija), jāņem vērā ne tikai apakšējo ekstremitāšu forma, bet arī cilvēka gaitas īpatnības. Apakšējo ekstremitāšu forma var atšķirties no tipveida figūras ar izvietojumu un leņķiem, ko veido augšstilba un apakšstilba kauli. Tas nozīmē, ka ievietošanai 5.–8. pozīcijās jāveic individuālā korekcija, kas ne vienmēr būs veiksmīga [30].

Sākotnējā testēšana veikta, astoņās vietās (3.8. att. b) mērot elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja sprieguma impulsu vērtības. Ņemot vērā ģenerētā impulsa lielumu, izvēlētas labākās enerģijas pārveidotāja ievietošanas vietas (3.8. att. c.). Testējamām personām tās ir: 2. pozīcija – zarnu kaula priekšmailes līmenis / zarnu kaula virsējās šķautnes līmenis (apmēram 8 cm zem vidukļa); 3. pozīcija – plaukstas pamata līmenis; 4. pozīcija – plaukstas vidus līmenis; 6. pozīcija – ceļgala līmenis. Vietās, kas apzīmētas ar numuru 1, 5, 7 un 8, sprieguma impulsu nebija vai arī tas bija minimāls, jo nebija pietiekamas magnētu kustības amplitūdas gar induktīvo elementu (1. un 5. pozīcijā), kā arī lielā attāluma starp EMP daļām (7. un 8. pozīcija) dēļ, un tas saistīts ar indivīda anatomiskajām un gaitas īpatnībām.

Turpmākie eksperimenti notika Rīgas Stradiņa universitātes Gaitas analīzes laboratorijā Rehabilitācijas centrā “Vaivari”, kur bija iespēja izmērīt elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja sprieguma impulsus soļošanas laikā pie dažādiem fiksētiem testpersonas soļošanas ātrumiem: 3 km/h, 4,5 km/h un 6 km/h vīrietim un 2,6 km/h, 3,4 km/h, 4 km/h un 6 km/h sievietēm, kas atbilst lēnai, vidējai un ātrai soļošanai, kā arī noteikt EMP elementu kustības ātrumu soļošanas laikā (3.9. att.).

Pārveidotāja raksturlielumi pilnā soļošanas ciklā apkopoti 3.5. un 3.6. tabulā.



3.9. att. Elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja darbības testēšana: a – pirmās jakas makets; b – otrās jakas makets; c – virsjaka ar neaustu drānas siltinātāju; d – jostas soma un noņemama aproce.

3.5. tabula
Enerģijas daudzums pie dažādiem testēšanas nosacījumiem (sieviešu apģērbā)

Izstrādājuma veids	Kustības ātrums, km/h	Spoļu izvietojuma pozīcija	Vidējā jauda ± absolūtā kļūda, μW (ticamības varbūtība $p = 0,95$)	Relatīvā kļūda, %	Jaudas blīvums, $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Džinsi	4,0	6.	$179,03 \pm 33,33$	18,6	38,67
Žakete	6,0	2.	$269,18 \pm 85,97$	31,9	58,14
Žakete	4,0	2.	$135,12 \pm 37,40$	27,7	29,18
Žakete	4,0	3.	$133,03 \pm 47,77$	35,9	28,73
Žakete	3,4	3.	$73,86 \pm 46,50$	63,0	15,95
Žakete	2,6	3.	$119,89 \pm 48,28$	40,3	25,89
Jostas soma un noņemama aproce	4,0	3.	$90,80 \pm 80,21$	88,3	19,61

Maksimālā jauda $269 \mu\text{W}$ iegūta pie kustības ātruma 6 km/h , ja enerģijas pārveidotāja elementi bija sieviešu žaketē 2. pozīcijā. Otrais labākais rezultāts ir $179 \mu\text{W}$ pie kustības ātruma 4 km/h ar enerģijas pārveidotāja elementiem džinsos 6. pozīcijā.

3.6. tabula
Enerģijas daudzums pie dažādiem testēšanas nosacījumiem (vīriešu apģērbā)

Izstrādājuma veids	Kustības ātrums, km/h	Spoļu izvietojuma pozīcija	Vidējā jauda $\pm$ absolūtā kļūda, μW (ticamības varbūtība $p = 0,95$)	Relatīvā kļūda, %	Jaudas blīvums, $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Pirmās jakas makets (ar samazinātu apjomu dūrgalos un jakas lejasmaļās)	3,0	2.	$43,24 \pm 4,48$	10,4	9,34
		3.	$10,99 \pm 2,33$	21,2	2,37
	4,5	2.	$13,89 \pm 2,06$	14,8	3,00
		3.	$25,70 \pm 6,00$	23,3	5,55
	6,0	2.	$50,73 \pm 5,06$	10,0	10,96
		3.	$1,80 \pm 0,75$	41,5	0,39
Pirmās jakas makets	4,5	2.	$60,14 \pm 4,38$	7,3	12,99
		3.	$2,59 \pm 1,65$	63,6	0,56
Otrās jakas makets	3,0	4.	$6,00 \pm 1,04$	17,4	1,30
		2.	$33,27 \pm 8,43$	25,4	7,18
	4,5	4.	$13,10 \pm 2,85$	21,7	2,87
		2.	$53,96 \pm 10,73$	19,9	11,65
	6,0	4.	$15,79 \pm 10,66$	67,5	3,46
		2.	$52,81 \pm 10,19$	19,3	11,41
Jaka ar neaustu drānu siltinātāju	3,0	2.	$181,40 \pm 23,80$	13,1	39,18
	4,5	2.	$260,68 \pm 63,85$	24,5	56,30
	6,0	2.	$502,22 \pm 100,14$	19,9	108,47
Jostas soma un noņemamā aprobe	4,5	3.	$236,68 \pm 56,87$	24,0	51,12

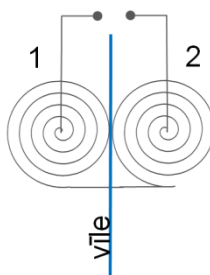
Labākie ģenerētās jaudas rezultāti $502 \mu\text{W}$ un $261 \mu\text{W}$ sasniegti ar ievietotām enerģijas pārveidotāja daļām 2. pozīcijā jakā ar neaustu drānu siltinātāju pie kustības ātruma 6 km/h un $4,5 \text{ km/h}$.

Rezultātā vislielākās iegūtās ģenerētās jaudas ir tad, ja attālums starp elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja daļām jakas apjoma un ķermeņa anatomisko īpatnību dēļ ir minimāls, magnēts ar spoli stabili turas piestiprinājuma vietās un ir nodrošināta precīza magnēta kustības trajektorija gar induktīvo elementu centriem.

Analīzes rezultāti ļauj secināt:

- vispiemērotākā EMP ievietošanas vieta pie jebkura ātruma ir apmēram 8 cm zem vidukļa plecgērbam un plaukstas pamata līmenis komplektam;
- lielākās jaudas vērtības sasniedzamas, cilvēkam ātri soļojot;
- par pārveidotāja ievietošanai vispiemērotāko apģērba veidu var uzskatīt virsjaku ar neaustu drānu siltinātāju, stabilu formu un nelielām krūšu un gurnu līmeņa virslaidēm.

Izvietojot siltinātā jakā apmēram 8 cm zem vidukļa divas virknē savienotas piecslāņu spoles (vijumu skaits 50), viena magnēta kustības ceļā pētīta sprieguma impulsu atkarība no spoles izvietojuma vietas. Spoles savienotas tā, ka ģenerētiem sprieguma impulsiem ir pretēja polaritāte un attālums starp spoles malām 0 mm. Spoles izvietotas tā, ka jakas sānu vīle² atrodas starp spolēm (3.10. att.). Pārvietojot spoles pa labi un pa kreisi par 1 cm, novērots, ka sprieguma impulsu lielākā vērtība sasniegta, kad jakas sānvīle atrodas starp spolēm.



3.10. att. Spoļu novietojuma pozīcija.

Pārveidotāja kopējās jaudas palielināšanai magnēta kustības ceļā tika izvietotas četras spoles ar iepriekš minētajiem nosacījumiem ar mērķi noteikt maksimāli pieļaujamo spoļu skaitu ievietošanai jakā. Pētīti sprieguma impulsa lielumi katrai spolei, mainot spoles pozīcijas attiecībā pret jakas sānu vīli. Eksperimentā tika noteikts, ka maksimāli pieļaujamais spoļu skaits ievietošanai jakā ir trīs.

3.3.3. Enerģijas atkarība no magnēta kustības ātruma

Eksperimentā infrasarkano starojumu atstarojošus marķierus piestiprina cilvēka ķermenim divas pozīcijas: 2. pozīcijas punkts izvietots apmēram 8 cm zem vidukļa, 4. pozīcijas un PIE punkti izvietoti plaukstu līmenī (3.8. att.). Izmantotajā sistēmā ciparu kameras ieraksta cilvēka marķēto anatomisko punktu kustību trajektorijas trīs dimensijās. No iegūtajiem datiem datorprogramma izveido virtuālu modeli tālākai analīzei [31]. Apstrādājot iegūtos datus, aprēķināti ātrumi un citi parametri atsevišķiem punktiem, brīdī, kad magnēts (4. pozīcijā) pārvietojas gar spolēm (punktā PIE) (3.7. tabulā).

Magnēta pārvietošanās ātrumu ietekmē gan cilvēka kustības ātrums, gan arī tā kustības īpatnības un iespējas, kas savukārt ir atkarīgas no ķermeņa uzbūves īpatnībām. Piemēram, pārvietošanās ātrums nav atkarīgs no ķermeņa izmēriem. Noteiktas kustības, piemēram, viena soļa izpildes laiks pieaug proporcionāli ķermeņa lineāro izmēru pieaugumam (pie citiem vienādiem nosacījumiem), savukārt maksimālā kustību intensitāte samazinās proporcionāli tam, kā palielinās ķermeņa lineārie izmēri [32]. 3.7. tabulā ir redzams, ka magnēta kustības ātrumu palielinājums ir proporcionāli saistīts ar soļošanas ātrumu.

² Sānu vīle šajā darbā vienmēr novietota sānu virsmas vidū (priekšdaļas un mugurdaļas platums vienāds).

Pārveidotāja darbības parametri

Soļošanas ātrums, km/h	Punktu kustības ātrumi, m/s			Magnēta relatīvais ātrums attiecībā pret spoli, m/s	Ģenerētā enerģija, μJ	Impulsa periods, s	Vidējā jauda, μW
	4. pozīcija	2. pozīcija	PIE	4. pozīcija + PIE			
3,0	0,9	0,6	0,26	1,16	7,53	1,25	6,00
4,5	1,4	0,8	0,3	1,7	14,44	1,10	13,13
6,0	2,0	1,2	0,4	2,4	15,58	1,00	15,58

3.4. Induktīvā elementa ilgmūžības prognoze

Viedā apgērba izgatavošanas procesā jāreķinās ar diviem faktoriem: jānodrošina apgērba komforts un dizains, tai pat laikā – arī enerģijas pārveidotāja funkcionalitāte un lietojamība, kā arī kopā – ilgmūžība un drošums [33].

Radot apgērbi ar ievietotu elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju, ir būtiski saglabāt apgērba kopšanas iespējas. Visbiežāk izmantotais apgērba kopšanas veids ir mazgāšana mājas apstākļos. Svarīgi, lai pēc viedā apgērba ar enerģijas pārveidotāju izmazgāšanas tas nezaudētu savu kvalitāti, izmērus, ārējo izskatu un enerģijas pārveidotāja darbības spējas un efektivitāti. Mazgāšanas procesu var aprakstīt kā fizikāli ķīmisko un mehānisko faktoru kopumu. Pie fizikāli ķīmiskajiem faktoriem pieskaitāma mazgāšanas līdzekļu iedarbība, temperatūra un mitrums, pie mehāniskajiem – slapjo materiāla daļu savstarpējā berze un kontakts ar veļas mazgājamās mašīnas virsmām, daudzkārtējā stiepes, spiedes un vērpes deformācija.

Pētīta mazgāšanas ietekme uz PIE ilgmūžību. Par PIE ilgmūžības noteikšanas kritērijiem, kas nosaka spoles nepiemērotību tālākai ekspluatācijai, izvēlēti:

- neapmierinoša spoles elektrovadītspēja;
- spoles destrukcija (bojāta spoles struktūra).

Eksperimentā izmantotas piecslāņu spoles ar atšķirīgu aizsargpārklājuma veidu un izolējošo slāni (2.3 un 2.4. att.).

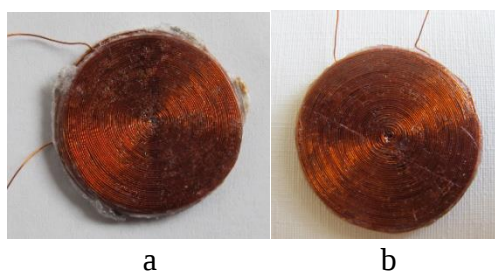
Spoles struktūras pārbaudes un spoļu elektriskās pretestības mērījumi veikti pirms un pēc pirmā, piektā un desmitā mazgāšanas un žāvēšanas cikla, mērījumiem izmantojot digitālo multimetru *Velleman DVM860BL*. Mērījumu rezultāti apkopoti 3.8. tabulā.

Turpmākiem eksperimentiem induktīvā elementa ar termoplastisko adhēzijas pārklājumu struktūra tika pilnveidota. Induktīvais elements veidots manuāli – tā, lai visi pieci slāņi būtu uztīti nepārtraukti no pirmā slāņa līdz piektajam viens virs otra bez spoles vada pārrāvuma, kas izslēdz lodēšanas procedūru un padara spoles malas gludākas (3.11. att.).

3.8. tabula

Elektrisko pretestību vērtības spolēm pirms un pēc mazgāšanas

Spoles simbols	Pirms mazgāšanas		Pēc mazgāšanas		
	Sākuma pretestība, Ω	Pretestība pēc aizsargpārklājuma uznešanas, Ω	Pretestība pēc pirmās mazgāšanas, Ω	Pretestība pēc piektās mazgāšanas, Ω	Pretestība pēc desmitās mazgāšanas, Ω
A	5,7	5,7	5,7		
L	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
			5,4	5,4	Bezgalīgi liela
P	5,5	–	5,5	Bezgalīgi liela	
T₁	–	5,6	5,6	5,6	5,6
T₂	–	5,4	5,4	5,4	Bezgalīgi liela
		5,6	5,6	5,6	5,6



3.11. att. Induktīvais elements pirms (a) un pēc (b) pilnveidošanas.

3.5. Salīdzinošā enerģijas pārveidotāja ģenerētās enerģijas, attīstītās jaudas un ģeometriskās formas analīze

1. Apģērbā ievietojamais enerģijas pārveidotājs testēts, izmantojot mehānisko stendu magnēta kontrolētai pārvietošanai, lai nodrošinātu konstantu magnēta kustības ātrumu (1 m/s) un attālumu starp spoli un magnētu (~5 mm). Attīstītā jauda ir $(2610 \pm 149) \mu\text{W}$. Salīdzinot enerģijas pārveidotāja testēšanas rezultātus ar cilvēka ķermeņa (līdzsvarotas kustības gadījumā) rezultātiem (3.6. tab.), ir redzams, ka jaudas izmantojamā daļa ir 7 % pie kustības ātruma 3 km/h (atbilst 1 m/s magnēta kustības ātrumam). Palielinot kustības ātrumu, ir iespējams palielināt jaudas izmantojamo daļu līdz 19 %.
2. Uzkrājot prototipa ražoto enerģiju vienas soļošanas stundas laikā, tā var nodrošināt elektronisko ierīču darbību atbilstoši 3.9. tabulai (dati no enerģijas pārveidotāja testēšanas žaketē). Tabula adaptēta pēc [34]. 3.9. tabulā publicētie dati norāda, ka enerģijas pārveidotāja attīstītā jauda ir pietiekama, lai darbinātu apģērbā integrētos sensorus.

3.9. tabula

Enerģijas patēriņš ar bateriju darbināmās ierīcēs

Ierīces tips	Jaudas patēriņš	Enerģijas autonomija	Enerģijas pārveidotāja barošanas iespējas
Viedtālrunis	1 W	5 h	2 s
MP3 atskaņotājs	50 mW	15 h	30 s
Dzirdes aparāts	1 mW	5 dienas	0,4 h
Elektrokardiostimulators	50 μ W	7 gadi	8 h
Kvarca pulkstenis	5 C	5 gadi	80 h
Bezvada sensora mezgls	100 μ W	mūžīga (akumulators + enerģijas pārveidotājs)	4 h

- Iegūtie jaudas blīvumi ir salīdzināmi ar citu pētnieku dažādas formas elektrodinamisko pārveidotāju rezultātiem, kas apkopoti *Mitcheson* un līdzautoru rakstā [9], bet, ņemot vērā, ka minētie pārveidotāji darbojas pie augstākām frekvencēm (piemēram, [35] $P/V = 2200 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ pie $f = 320 \text{ Hz}$), var redzēt, ka, izmantojot plakanos spirālveida induktorus, ir iespējams iegūt jaudas blīvuma vērtības, kas pie vienādām darbības frekvencēm ir salīdzināmas ar labākajiem trīsdimensiju pārveidotājiem.
- Salīdzinot izveidoto enerģijas pārveidotāju ar citu pētnieku plakanas formas elektromagnētiskiem enerģijas pārveidotājiem, kas apkopoti *Zhao* darbā [36] (3.10. tab.), var redzēt, ka ne viens no tiem nav paredzēts integrēšanai apģērbā.

3.10. tabula

Plakanas formas elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja raksturlielumi

Pētnieki	Tilpums, cm^3	Masa, kg	Jauda, W	Lietojums
<i>P. Zeng et al.</i>	116	0,86	0,83	Kājas uzlika
<i>Z. Yang et al.</i>	520	3,25	7,20	Mugursoma
<i>P. Niu et al.</i>	903	2,00	0,784	Mugursoma
<i>I. Stamenkovic et al.</i>	10	0,096	0,059	Kājas uzlika

- Salīdzinot enerģijas pārveidotāja testēšanas rezultātus ar citu pētnieku dažādu veidu pārveidotāju rezultātiem pēc enerģijas iegūšanas avota, kas apkopoti *Carroll* darbā [37] (3.11. tab.), var redzēt, ka, izmantojot plakanos spirālveidīgos induktorus, ir iespējams iegūt jaudas vērtības, kas ir salīdzināmas ar citu pārveidotāju vidējo ģenerēto enerģiju.

3.11. tabula

Roku kustību enerģijas pārveidotāju raksturlielumi

Pētnieki	Jauda	Tilpums, cm^3
<i>Niu</i>	10 mW	Nav minēts
<i>Nightstar</i>	200 mW	Nav minēts
<i>Renaud</i>	40 μ W	<1
<i>Renaud</i>	47–600 μ W	14
<i>Li</i>	0,3 μ W	Nav minēts

Piedāvātajam enerģijas pārveidotājam ir vairākas priekšrocības:

- enerģijas pārveidotāja **svars ir nenozīmīgs**, salīdzinot ar izstrādājuma svaru un **nodrošina** tādu pat **pārvietošanās brīvību**, kā apgērbā bez enerģijas pārveidotāja;
- enerģijas pārveidotājam ar plakānu indukcijas elementu **nav nepieciešams papildu tilpums magnēta kustībai**, jo spole un magnēts izvietoti dažādās apgērba daļās, kas, valkātajam pārvietojoties, kustas viena attiecībā pret otru, to var ievietot praktiski jebkurā apgērbā;
- enerģijas pārveidotāja elementi ir plakāni, ar nelielu svaru, līdz ar to ir iespējama to **ievietošana bez apgērba formas un ārējā izskata izmaiņām**;
- pateicoties izveidotā pārveidotāja divdimensionālajai ģeometrijai, **apgērba elementu kustības** valkātajā kustību laikā var **tikt tieši izmantotas enerģijas pārveidotāja darbināšanai**;
- enerģijas pārveidotāja konstrukcijas elementi **nav apvienoti vienā korpusā** un var tikt izvietoti praktiski **jebkura veida apgērbā**, ņemot vērā to darbības principus, piemeklējot apgērbam piemērotus struktūrelementus (magnētu un induktīvo elementu) un ievietošanas vietas;
- mainot induktīvo elementu izmēru, materiālu, ģeometriju, spoļu slāņu skaitu un to savstarpējo izvietojumu, **var mainīt enerģijas pārveidotāja parametrus**;
- pārveidotāja plakānā ģeometrija ļauj **minimizēt** pārveidotāja **aizņemto tilpumu**, samazinot to līdz elementu kopējam tilpumam, kas, salīdzinot ar citiem pārveidotājiem, nodrošina **lielāku jaudas blīvumu**;
- par vēl vienu priekšrocību var uzskatīt izveidotā enerģijas pārveidotāja **neinerģiālo raksturu**, kas nodrošina vienādi labu darbību plašā frekvenču diapazonā nevis noteiktā rezonanses frekvencē, attiecīgi šāda sistēma nav jāpielāgo konkrēta lietotāja (apgērba valkātajā) kustību ātrumam, toties kustību trajektoriju īpatnības var samazināt iekārtas ģenerēto enerģiju. Lai samazinātu šo negatīvo efektu, jāpiemeklē apgērba vietas, kas konkrētajam valkātajam kustību laikā pārvietojas vistuvāk viena otrai;
- pētāmais elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs ir **vienkāršs lietošanā** un var tikt izmantots kā **mobils un dabai draudzīgs enerģijas avots**.
- **par trūkumu** var uzskatīt enerģijas pārveidotāja izejas parametru atkarību no magnēta pārvietošanās ātruma un attāluma līdz PIE, ko ietekmē cilvēkfaktora kritēriji – gan valkātajā kustības ātrums un veids (sabalansēta vai nesabalansēta kustība), gan arī cilvēka kustību īpatnības, kas savukārt ir atkarīgas no ķermeņa uzbūves īpatnībām. Enerģijas pārveidotāja darbību ir iespējams kontrolēt, bet ir sarežģīti to prognozēt, jo izmantojamā enerģiju ģenerējošā sistēma ir atkarīga no iepriekšminētajiem cilvēkfaktora kritērijiem.

VISPARĪGI SECINĀJUMI

1. Līdz šim piedāvātie mehāniskās enerģijas pārveidotāji (ģeneratori) ar tradicionālo cilindrisko induktīvo elementu (spoli) vai plakanu spoli ir veidoti kā trīsdimensiju ierīces, kas nav piemērotas integrēšanai cilvēka apģērbā. Promocijas darbā ir attīstīts cilvēka mehānisko kustību elektromagnētisko enerģijas pārveidotājs elektriskajā enerģijā ar plakanu arhitektūru un eksperimentāli pētītas iespējas optimizēt (panākt maksimāli lielu ģenerēto jaudu uz tilpuma vienību) enerģijas pārveidotāja parametrus, mainot spoļu pieslēguma un savienojuma veidu, spoļu slāņu skaitu un to savstarpējā izvietojumu. Ģenerētā enerģija un attīstītā jauda pieaug līdz ar spoles vijumu un slāņu skaita palielināšanu, virknē savienojot spoles tā, ka ģenerētajiem impulsiem ir pretēja polaritāte un attālums starp spolēm ir nulle.
2. Darbā pētīti mehanoelektriskās (elektromagnētiskās) enerģijas pārveidotāju integrēšanas apģērbā vēlamie nosacījumi: apģērba sortimenta, apjoma, induktīvo elementu izvietojuma ietekme uz ģenerētās enerģijas daudzumu. Lielāko jaudu $502 \mu\text{W} \pm 100 \mu\text{W}$ un $261 \mu\text{W} \pm 64 \mu\text{W}$ izdevās iegūt ar integrētām enerģijas pārveidotāja daļām apmēram 8 cm zem vidukļa jakā ar neaustu drānu siltinātāju pie kustības ātrumiem attiecīgi 6 km/h un 4,5 km/h.
3. Mazgāšanas ietekmes pētījumi uz induktīvo elementu ilgmūžību rāda, ka induktīvie elementi ar laminēšanu un ar termoplastisko adhēzijas pārklājumu pēc mazgāšanas nav mainījuši elektrisko pretestību, tomēr laminētajiem induktīvajiem elementiem palielinās gabarītizmērs.
4. Lai izslēgtu PIE elektrovadošā vada pārrāvumu mazgāšanas laikā, elektromagnētiskā enerģijas pārveidotāja elementu ievietošanu jāparedz tā, lai pirms mazgāšanas un kopšanas to būtu iespējams izņemt no apģērba.
5. Plakano induktīvo elementu var adaptēt viedapģērbam ar apģērba tehnoloģijām vai izveidot tos kā dizaina elementus uz tekstilmateriāla bāzes ar pārklājumu tehnoloģiju, un/vai integrēt elektropavedienus vai elektrovadus. Salīdzinot manuālas, izšūšanas, uzšūšanas un drukāšanas tehnoloģijas plakanu indukcijas spoļu izgatavošanai, konstatēts, ka manuāli izgatavotajam spolēm enerģijas un jaudas vērtības ir lielāka nekā ar citām tehnoloģijām veidotām spolēm. Tas izskaidrojams ar to, ka uzšūtajai spolei ir divas reizes mazāks vijumu skaits, izšūtajām spolēm ir mazāks vijumu skaits un salīdzinoši liela iekšējā pretestība un PCB tehnoloģijas spolēm ir liela iekšējā pretestība mazā šķērsriezuma laukuma dēļ.
6. Piedāvātais elektromagnētiskais enerģijas pārveidotājs var tikt izmantots kā mobils un labai draudzīgs enerģijas avots, kas būtiski nemaina apģērba tekstildrānu struktūras vizuālās īpašības, gabarītizmērus un svaru. Darba izpildes laikā izstrādātā metodika PIE integrēšanai apģērbā ļauj noteikt optimālo integrēto elementu izvietojumu un skaitu.

7. Ģenerēto elektrisko enerģiju var izmantot dažādu ierīču (sensoru, detektoru u. c.) darbināšanai, informācijas nosūtīšanai attālinātiem uztvērējiem un/vai uzkrāt vēlākai izmantošanai.
8. Ņemot vērā magnētu ietekmi uz cilvēka veselību, tekstilizstrādājumu ar elektromagnētisko enerģijas pārveidotāju ar plakanu struktūru deklarācijās (instrukcijās) būtu jāiekļauj informācija par iespējamiem veselības apdraudējumiem vai negatīvo ietekmi uz personām ar elektroniskajiem kardiostimulatoriem un kardiodefibrilatoriem saistībā ar pastāvīgu magnētu klātbūtni.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. **LVS CEN/TR 16298:2012.** *Tekstilizstrādājumi un tekstilpreces. Viedie tekstilizstrādājumi. Definīcijas, klasifikācija, lietojumprogrammas un standartizācijas nepieciešamība.* Standarts.
2. *Powerful change Part I: Batteries and possible alternatives for the mobile market.* **Starner, T.** IEEE, 2003. Pervasive Computing, Vol. 2, pp. 86–88.
3. *Breathing detection: towards a miniaturized, wearable, battery-operated monitoring system.* **Corbishley, P., Rodriguez-Villegas, E.** 2008. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 55, pp. 196–204.
4. *Energy scavenging for mobile and wireless electronics.* **Paradiso, J. A., and Starner, T.** 2005. Pervasive Computing, IEEE, Vol. 4, pp. 18–27.
5. **Roundy, S., Wright, P. K., and Rabaey, J. M.** *Energy Scavenging For Wireless Sensor Networks : With Special Focus On Vibrations.* Norwell : Kluwer Academic Publishers, 2004. p. 210. ISBN 1-4020-7663-0.
6. *Human-powered wearable computing.* **Starner, T.** 3&4, IBM, 1996. gada, IBM Systems Journal, Vol. 35, pp. 618–629.
7. *Human Powered Piezoelectric Batteries to Supply Power to Wearable Electronic Devices.* **Gonzalez, J. L., Rubio, A., and Moll, F.** 1, 2002. International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources, Vol. 10, pp. 34–40.
8. *Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques.* **Yildiz, Faruk.** 1, 2009. The Journal of Technology Studies, Vol. 35, pp. 40–48.
9. **Mitcheson, P. D., et al.** *Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices.* *Proceedings of the IEEE.* 2008. Vol. 96(9), pp. 1457–1486.
10. *Generation of electrical energy for portable devices. Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system.* **Poulin, G., Sarraute, E., Costa, F.** 3, 2004. Sensors and Actuators A, Vol. 116, pp. 461–471.
11. *Review of Microscale Magnetic Power Generation .* **Arnold, D. P.** 11, 2007. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 43, pp. 3940-3951.
12. **Hoffman, N. G.** *A miniature electromechanical generator design utilizing human motion.* California Naval Postgraduate School. Monterey : California Naval Postgraduate School, 2010. pp. 98, Master's thesis.
13. *Design and Performance of Linear Biomechanical Energy Conversion Devices.* **Niu, P., Chapman, P.** Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE. pp. 1– 6.
14. *Wearable textile antennas.* **Roh, J.-S., Chi, Y.-S., and Kang, T. J.** 2010. International Journal of Fashion Design, Technology and Education , Vol. 3, pp. 135–153.
15. *Electrical Characterization of Screen-Printed Circuits on the Fabric.* **Kim, Y., Kim, H., and Yoo, H.-J.** 2010. IEEE Transactions on Advanced Packaging , Vol. 33, pp. 196–205. ISSN :1521-3323.

16. *Textile Materials for the Design of Wearable Antennas: A Survey*. **Salvado, R., et al.** 2012. *Sensors*, Vol. 12, pp. 15841–15857. ISSN 1424-8220.
17. *Design and performance of a centimetre-scale shrouded wind turbine for energy harvesting*. **Howey, D. A., Bansal, A., Holmes, A. S.**, *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing Ltd, 2011, Vol. 20 (8): 085021, pp. 1–12.
18. *BubbleWrap: a textile-based electromagnetic haptic display*. **Bau, O., Petrevski, U., and Mackay, W.** 2009. CHI EA '09: Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems. ACM. pp. 3607–3612.
19. *Electromagnetic Inertial Generators for Vibrational Energy Scavenging Compatible with Si Technology*. **Perez-Rodriguez, A., et al.** 2005. The Fifth International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications. pp. 57–60.
20. *An efficient electromagnetic power harvesting device for low-frequency applications*. **Sardini, E., Serpelloni, M.** 2011. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 172, pp. 475–482.
21. *Autonomous Sensor Applications*. **Marioli, D., Sardini, E., Serpelloni, M.** [ed.] Brugger J. and Briand D. 2009. *Procedia Chemistry*, Vol. 1, pp. 469–472.
22. *Body Motion for Powering Biomedical Devices*. **Romero, E., Warrington, R. O., and Neuman, M. R.** 2009. *Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 2752–2755. E-ISBN: 978-1-4244-3296-7.
23. *Plakano induktīvo elementu dizains*. **Dāboliņa, I., Blūms, J.** 9. sēr., *Materiālzinātne*, Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2011. RTU zinātniskie raksti, Sēj. 6, 105.–109. lpp. ISSN 1691-3132.
24. *Hierarchical nanostructured conducting polymer hydrogel with high electrochemical activity* PNAS. **Pan, L. et al.** 24, *National Academy of Sciences*, 2012. PNAS, Vol. 109, pp. 9287–9292. ISSN-0027-8424.
25. **Suh, Minyoung.** *Development of Wireless Transmission Between Inductively Coupled Layers in Smart Clothing*. Textile Technology Management, Raleigh, North Carolina State University. 2011. Doctoral dissertation.
26. *Characterization of embroidered inductors*. **Roh, J.-S., Chi, Y.-S., Lee, J.-H., Nam, S., and Kang, T. J.** 2010, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19 (11): 115020, pp. 1–12.
27. **Blūms, Juris.** *Elektromehāniskais ģenerators*. LR Nr. 14168, 2010. g
28. **LVS EN ISO 6330.** *Latvijas Standarts Tekstilizstrādājumi. Mazgāšanas un žāvēšanas procedūras mājas apstākļos tekstilizstrādājumu testēšanai*. Rīga: LVS, 2012. ISO 6330:2012.
29. **Дунаевская, Т. Н. и др.** *Основы прикладной антропологии и биомеханики*. [ed.] Е.К. Коблякова. Москва: Информационно-издательский центр МГУДТ, 2005. ISBN 5-87055-069-6.
30. *Bezkontakta 3D pozicionēšanas metodes izmantošana antropometriskajā modelēšanā*. **Dāboliņa, I., Viļumsone, A., Fjodorovs, A.** 9, *Materiālzinātne*, Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, 2009. RTU zinātniskie raksti, Sēj. 4, 138.–145. lpp.

31. **Ламаш, Б. Е.** Индивидуальные и групповые особенности моторики. *Лекции по БИОМЕХАНИКЕ*. Владивосток : Дальневосточный государственный университет (ДВГУ), 2009.
32. **Cho, G., Lee, S., and Cho, J.** Review and Reappraisal of Smart Clothing. [ed.] Gilsoo Cho. *Smart Clothing: Technology and Applications*. London : CRC Press Taylor & Francis Group, 2010, pp. 1–37.
33. *Micropower energy harvesting*. **Vullers, R. J. M., et al.** Solid-State Electronics, Elsevier Ltd, 2009. Vol. 53 (7), pp. 684–693. ISSN: 0038-1101.
34. *Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator*. **El-hami, M., et al.**, 2001. Sensors Actuators A, Physical, Vol. 92, pp. 335–342.
35. **Zhao, W.** *Design Optimization of a Linear Generator With Dual Halbach Array for Human Motion Energy Harvesting*. Lincoln , 2015. A Thesis for the Degree of Master of Science.
36. **Carroll, J. D.** *Miniaturised Electromagnetic Generators for Portable Applications*. National University of Ireland. Galway , 2012. Doctoral theses.