

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības fakultāte

**Vjačeslavs LAPKOVSKIS**  
Programma BDS0 doktorants

**FEROMAGNĒTISKO PULVERMATERIĀLU  
PĀRVIETOŠANA AR IMPULSA  
ELEKTROMAGNĒTISKO LAUKU**

**PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS**

Promocijas darba vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**V. MIRONOVS**

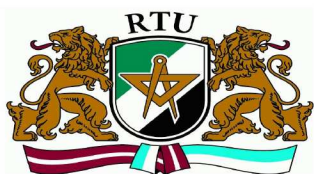
Rīga 2012

UDK 621.762(043.2)

La 597 c

Lapkovskis V. Feromagnētisko pulvermateriālu pārvietošana ar impulsa elektromagnētisko lauku.  
Promocijas darbbna kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-39 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU TMF Aeronautikas institūtā 2012.gada 26. septembra lēmumu, protokols Nr. 02/2012.



This work has been supported by the European Social Fund  
within the project "Support for the implementation of  
doctoral studies at Riga Technical University"

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā  
«Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN 978-9934-507-19-9



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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2012. gada 27. decembrī plkst 12:00 RTU Transporta un satiksmes zinātnes nozares Promocijas padomes P-20 atklātajā sēdē Rīgā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.sc.ing. Jānis Bērziņš  
Latvijas Jūras akadēmija, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Prof. Jānis Rudzītis  
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvia

Profesors, Dr.ing. Prof. Matthias Kolbe  
University of Applied Sciences of Zwickau, Vācija

**APSTIPRINĀJUMS**

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

Vjačeslavs Lapkovskis .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 6 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 51 zīmējumus un ilustrācijas, 9 tabulas kopā 114 lappuses. Literatūras sarakstā ir 119 nosaukumi.

---

# SATURA RĀDĪTĀJS

<b>1.PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS.....</b>	<b>5</b>
1.1.Darba aktualitāte.....	5
1.2.Darba mērķis.....	5
1.3.Darba uzdevumi .....	6
1.4.Darba zinātniskā novitāte.....	6
1.5.Darba praktiskā vērtība.....	7
1.6.Pētniecības metodes.....	7
1.7.Darbā aizstāvamās tēzes.....	7
1.8.Darba sastāvs un apjoms.....	8
1.9.Darba aprobācija un publikācijas.....	9
<b>2.PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA.....</b>	<b>12</b>
<b>3.DARBA SATURS.....</b>	<b>13</b>
3.1.Pirmā nodaļa. Literatūras apskats par feromagnētisko pulveru transportēšanas sistēmām.....	13
3.2.Otrā nodaļa. Teorētiskie jautājumi transportēšanai ar impulsa elektromagnētisko lauku.....	15
3.3.Trešā nodaļa. Procesu modelēšana vertikālās caurulēs.....	16
3.4.Ceturtā nodaļa. Eksperimentāla aprīkojuma izstrāde un eksperimentālā daļa.....	19
3.5.Piektā nodaļa. Pārvietošanas ar impulsa elektromagnētisko lauku fenomena pielietojumi.....	24
<b>4.SECINĀJUMI .....</b>	<b>26</b>
<b>5.TURPMĀKAIS DARBS.....</b>	<b>26</b>
<b>6.AUTORA PUBLIKĀCIJAS UN PATENTI.....</b>	<b>29</b>
6.1.Publikācijas zinātniskos žurnālos.....	29

6.2.Publikācijas zinātnisko konferenču krājumos .....	30
6.3.Patentu saraksts.....	32

## **7.AUTORA CURRICULUM VITAE.....33**

## **8.BIBLIOGRAFIJAS AVOTU SARAKSTS.....34**

# **1. PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĪGS RAKSTUROJUMS**

## **1.1. Darba aktualitāte**

- Modernas ražošanas procesos ir nepieciešami dažādi transportēšanas paņēmieni dažādiem beramiem materiāliem, tostarp feromagnētiskiem pulveriem.
- Feromagnētiskie materiāli (dzelzs pulveri, dzelzs skaidas, mazas metāla detaļas (piem., uzgriežņi), plāva un rūdas) var tikt transportēti, izmantojot pneimatiskos vai mehāniskos konveijerus (skrūvju, plākšņu vai kausa tipa konveijerus). Viens no perspektīviem risinājumiem feromagnētisko pulveru transportēšanai - impulsu elektromagnētiskā lauka izmantošana, ieskaitot pulvermateriālu detaļu transportēšanu.
- Impulsa elektromagnētiskā lauka izmantošana feromagnētisko materiālu transportēšanai ir sevišķi svarīga pulvermetālurģijā un radniecīgajās nozarēs, lai uzlabotu tehnoloģisko procesu efektivitāti, kura saistīta ar smalka pulvera materiālu piegādi.
- Impulsa spēka avota izmantošana (impulsa magnētisko lauku ieguvei) ir būtiska pulvermetālurģijas nozarē, jo tas veicina jaunu tehnoloģisko procesu attīstīšanu, kā piemēram, pulveru presēšana un formēšana, pulveru materiālu saķepināšana.

## **1.2. Darba mērķis**

Feromagnētisko materiālu transportēšanas ar impulsa elektromagnētisko

lauku parādības izpēte un tā izmantošana, procesa parametru noteikšana un to ietekmes uz procesu noskaidrošana.

### 1.3. Darba uzdevumi

- Informācijas pārskats par nepārtraukta transporta sistēmām feromagnētisko materiālu, feromagnētisko pulveru un pulvermetallurģijas detaļu transportēšanai, to raksturojums.
- Eksperimentālo zemsprieguma iekārtu izstrāde pulvermateriālu praviētošanas procesu izpētei.
- Pielāgot metodes un aparatūru mūsdienīgo impulsu parametru mērišanai.
- Procesu feromagnētisko materiālu transportēšanai ar impulsu elektromagnētisko lauku modelēšanas paņēmienu izstrāde.
- Ieteikumu formulēšana par impulsu elektromagnētisko lauku turpmāko izmantošanu feromagnētisko materiālu transportēšanai.

### 1.4. Darba zinātniskā novitāte

- Ir parādītas iespējas dispersu materiālu transportēšanai ar impulsu elektromagnētisko lauku.
- Ir piedāvāts modelis feromagnētisko materiālu transportēšanai ar elektromagnētisko impulsu lauku.
- Ir izstrādāta sistēma parametru mērišanai feromagnētisko materiālu transportēšanai ar elektromagnētisko lauku.
- Tika konstatēts, ka viens no svarīgākajiem parametriem ir attālums starp spoli un feromagnētiskā pulvera virsmu, kas nodrošina maksimālu lietderīgu transportēšanas procesā.
- Tika konstatēta materiālu masas, tās dispersijas un īpašības ietekme uz transportēšanas efektivitāti un attālumu.
- Tika novērtēta procesa parametru ietekme uz materiālu transportēšanas efektivitāti.

## 1.5. Darba praktiskā vērtība

Tika demonstrēta feromagnētisko pulveru transportēšana ar impulsa elektromagnētisko lauku dažādās vidēs un virzienos, kas ir apstiprināts ar attiecīgiem patentiem (līdzautors).

Ierīces modelis, kurš ļauj veikt ilgtermiņa eksperimentālus pētījumus, ir izstrādāts un izgatavots. Iekārtas dizains ir demonstrēts vairākās konferencēs un izstādēs gan Latvijā, gan arī ārzemēs.

Pamatojoties uz eksperimentāliem pētījumiem, ir definētas praktiskas piemērošanas sfēras: pulvermetallurģija, civilā inženierija, mašīnbūve.

Tika izstrādāti zemsprieguma (<1000 V) transportēšanas iekārtu projektēšanas principi.

Pētniecības rezultātā tika izstrādātas sekojošas eksperimentālas iekārtas: vertikālais konveijers, iekārta dozēšanai, pulveru maisītājs un iekārtas pulvermateriālu presēšanai.

## 1.6. Pētniecības metodes

Izmantojot FEA modelēšanas programmatūru (FEMM un LUA skripta valodu), promocijas darbā pētīts fenomens feromagnētisko pulvermateriālu pārvietošanai ar impulsa elektromagnētisko lauku. Tika definēti feromagnētisko pulvermateriālu pārvietošanas galvenie parametri. Darbā ir izmantota datu matemātiskā apstrāde ar LibreOffice un SciDavis programmatūras palīdzību, kā arī izveidota slow-motion video ierakstīšanas un analīzes sistēma (izmantojot Avidemux programmatūru Linux vidē). Īstenoti pulvermateriālu pārvietošanas procesa eksperimentālie pētījumi, izmantojot speciālo zemsprieguma (līdz 1000 V) laboratorijas iekārtu.

## 1.7. Darbā aizstāvamās tēzes

1. Izstrādāts fiziskais modelis feromagnētisko pulvermateriālu (dzelzs pulveris, plāva u.c.) pārvietošanai vertikālās caurulēs, izmantojot impulsa elektromagnētisko lauku.
2. Izmantojot FEMM un LUA programmatūru, ir izstrādāts galīgo elementu

analīzes (FEA) modelis feromagnētisko pulvermateriālu mijiedarbības ar elektromagnētisko lauku izpētei.

3. Izstrādāta speciāla zemsprieguma (līdz 1000 V) laboratorijas iekārta feromagnētisko pulvermateriālu pārvietošanai vertikālajās caurulēs ar maksimālu pacelšanas augstumu līdz 2 m un maksimālu ražīgumu 2-3 t/h.

4. Izstrādāti un pārbaudīti sekojošie feromagnētisko pulvermateriālu pārvietošanas ar elektromagnētisko lauku pielietojumi laboratorijas mērogā: feromagnētisko materiālu sviešana un samaisīšana dažādās vidēs, kas apstiprināts ar Latvijas Republikas patentiem LV14382(B) un LV14383(B).

5. Konstatēts, ka metode var tikt izmantota feromagnētisko pulveru un granulveida materiālu ar plašu daļiņu izmēru diapazonu (no 20  $\mu\text{m}$  līdz 10 mm) pārvietošanai.

6. Apskatītas perspektīvas pulvera materiālu sajaukšanas un samaisīšanas metodes.

## 1.8. Darba sastāvs un apjoms

Promocijas darbs satur 5 nodaļas, secinājumus un bibliogrāfiju.

- Pirmā nodaļa aplūko informācijas avotus par feromagnētisko pulveru un materiālu transportēšanas metodēm, un informāciju par transportēšanu ar impulsa elektromagnētisko lauku.
- Otrajā nodaļā tiek dots teorētiskais pamatojums par transportēšanu ar impulsa elektromagnētisko lauku.
- Trešajā nodaļā tiek aprakstīta transportēšanas modelēšana ar impulsa elektromagnētisko lauku, mijiedarbības modelēšana starp elektromagnētisko lauku un feromagnētiskiem materiāliem.
- Ceturtnā nodaļa aptver transportēšanas ar impulsa elektromagnētisko lauku procesu eksperimentālus pētījumus.
- Piektajā nodaļā tiek piedāvāti pārvietošanas ar impulsa elektromagnētisko lauku fenomena pielietojumi.

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 5 nodaļas,

secinājumus, literatūras sarakstu, 6 pielikumus, 51 zīmējumus un ilustrācijas, 9 tabulas kopā 114 lappuses. Literatūras sarakstā ir 119 nosaukumi.

## 1.9. Darba aprobācija un publikācijas

Promocijas darba rezultāti ziņoti un apspriesti sekojošās starptautiskās konferencēs:

1. V. Mironov, J. Vība, and V. Lapkovsky, "Lifting of disperse materials with pulse electromagnetic field." *Nanomaterials and Nanotechnologies (NENAMAT-2005), Riga, Latvia, 2005.*
2. V. Mironovs, J. Vība, and V. Lapkovskis, "Investigation of impulse system for moving powder materials in vertical pipe," *1st Int. Conference on vibro-impact systems ICoVIS, Loughborough, UK, 2006.*
3. V. Mironov, I. Boyko, and V. Lapkovsky, "Intensification of manufacturing processes by transportation of bulk materials by a pulsed magnetic field / In Russian/," *Powder materials and processes of their production, Minsk, Belarus, 2008.*
4. V. Mironov, J. Vība, and V. Lapkovsky, "Electromagnetic transportation of ferromagnetic powders in pipes /in Russian/," *Poroshkovaya metallurgiya, Minsk, Belarus, 2010.*
5. V. Lapkovsky, V. Mironovs, A. Shishkin, and Zemch, "Conveying of Ferromagnetic Powder Materials by Pulsed Electromagnetic Field," *EuroPM-2011, Barcelona, Spain, 2011.*
6. V. Lapkovskis and V. Mironovs, "Single-stage Electromagnetic Elevator Modelling in FEMM software," *8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering", Tallinn, Estonia, 2012.*
7. V. Lapkovsky and V. Mironov, "Conveying of ferromagnetic powders by impulse electromagnetic field," in 5th International Conference on High Speed Forming ICHSF-2012, Dortmund, Germany, 2012.

Promocijas darbs ir apspriests sekojošos zinātniskos semināros:

- a) Pulvermateriālu zinātniskās laboratorijas semināros, Rīgas Tehniskā

universitāte (2010-2012);

- b) RTU Būvniecības fakultātes zinātniskos semināros (2011);
- c) RTU Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģijas institūtā doktorantu zinātniskos semināros (2010-2012);
- d) zinātniskajā seminārā Fraunhofera ražošanas tehnoloģiju un progresīvo materiālu (*Advanced Materials The Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials*) (IFAM) institūtā, Drēzdenē, Vācijā (2011);
- e) zinātniskajā seminārā Cvikavas universitātē (*University of Applied Sciences of Zwickau*), Vācijā (2011);
- f) zinātniskajā un praktiskajā konferencē ICHSF-2012 (*Institut für Umformtechnik und Leichtbau*), Dortmundē, Vācijā (2012)

Laika periodā no 2005-2012 pavisam ir publicētas 30 publikācijas. Svarīgākās no tām ir:

žurnālos uz konferenču krājumos:

1. V. Mironov, J. Vība, and V. Lapkovsky, "Lifting of disperse materials with pulse electromagnetic field," in *Nanomaterials and Nanotechnologies (NENAMAT)*, Riga, Latvia, 2005, pp. 118-120.
2. V. Mironovs, J. Vība, and V. Lapkovskis, "Investigation of impulse system for moving powder materials in vertical pipe," in *Book of abstracts of the 1st Int. Conference on vibro-impact systems*, 2006, p. 30.
3. V. Mironov, I. Boyko, and V. Lapkovsky, "Intensification of manufacturing processes by transportation of bulk materials by a pulsed magnetic field / In Russian/," *Powder materials and processes of their production*, vol. 31, pp. 101-104, 2008.
4. V. Mironov, J. Vība, and V. Lapkovsky, "Electromagnetic transportation of ferromagnetic powders in pipes /in Russian/," *Poroshkovaya metallurgiya*, vol. 33, pp. 53-59, 2010.
5. V. Lapkovsky, V. Mironovs, A. Shishkin, and Zemch, "Conveying of Ferromagnetic Powder Materials by Pulsed Electromagnetic Field," in *EuroPM-2011 – Tools for Improving PM: Modelling & Process*

*Control*, 2011, pp. 253-258.

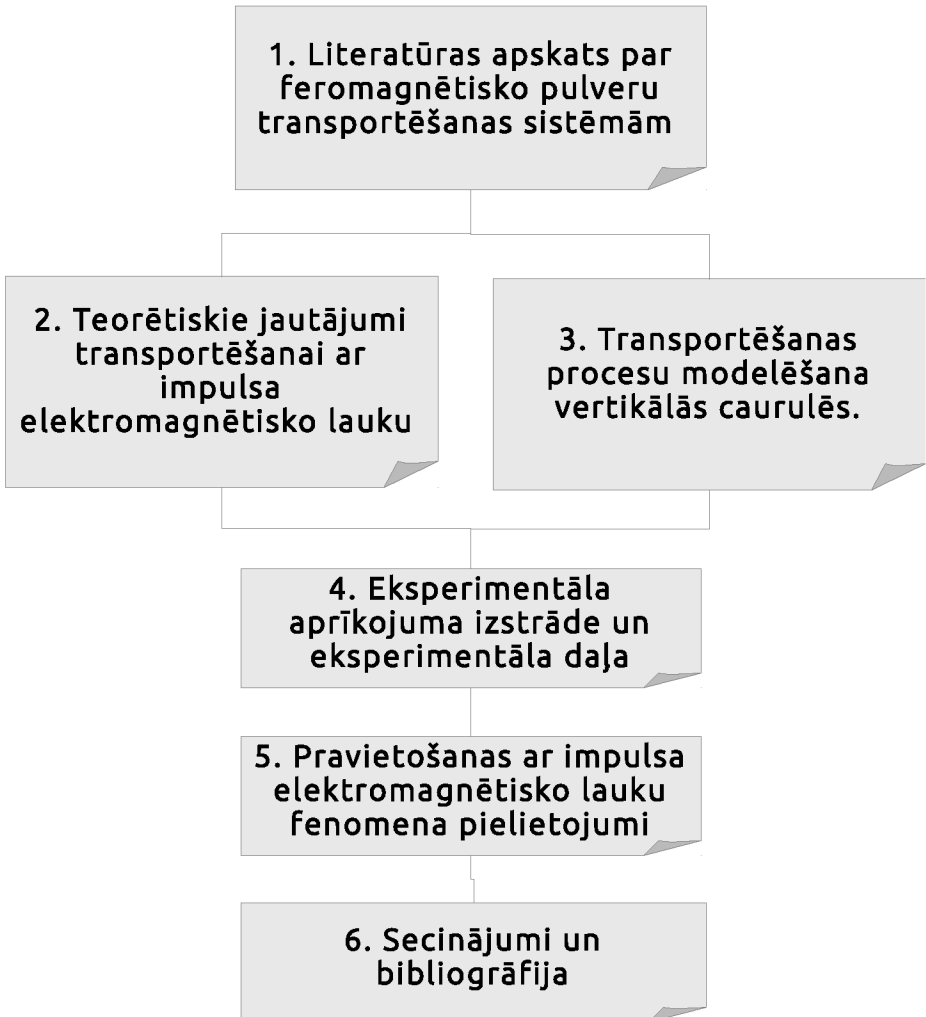
6. V. Lapkovskis and V. Mironovs, "Single-stage Electromagnetic Elevator Modelling in FEMM software," in *8th International DAAAM Baltic Conference "Industrial Engineering,"* 2012, no. April, pp. 321-325.

Laika periodā no 2005-2012 notika piedalīšanās vairākās Latvijas un starptautiskajās izstādēs.

Svarīgākās no tām ir:

1. EuroPM-2010, International Conference and exhibition, Florence, Itālija.
2. Izgudrotāju diena 2010, 2011, Rīgas Tehniskā Universitāte, Rīga, Latvija
3. Tech Industry 2011, Pulvera materiālu transportēšana ar impulsu elektromagnētisko lauku, Rīga, Latvija
4. ICHSF-2012, 5th International Conference on High Speed Forming, Dortmund, Vācijā, 2012.

## 2. PROMOCIJAS DARBA STRUKTŪRA



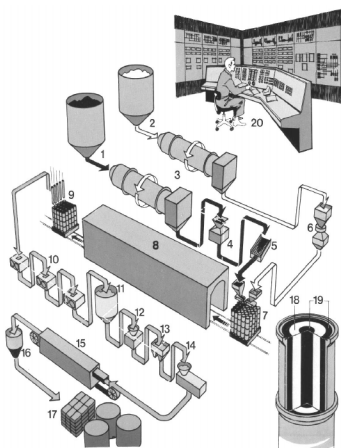
### 3. DARBA SATURS

#### 3.1. Pirmā nodaļa. Literatūras apskats par feromagnētisko pulveru transportēšanas sistēmām.

Šī nodaļa aplūko informācijas avotus par feromagnētisko pulveru un materiālu transportēšanas metodēm, un informāciju par transportēšanu ar impulsa elektromagnētisko lauku.

Feromagnētiskie pulvera materiāli [1] ir ārkārtīgi svarīgi dažādu pulvera detaļu ražošanas procesos gandrīz visos ražošanas posmos [2], [3]. Visbiežākās operācijas, kādas notiek, transportējot materiālu, ir: vertikāla, horizontāla un slīpa transportēšana, dozēšana, iekraušana un izkraušana no konteineriem (3.1.1. att.) [4], [5].

Īpaši lielas enerģijas un darbietpības izmaksas rodas, organizējot feromagnētisko pulveru un to maisījumu ražošanu [6]. Šajā gadījumā pulveri tiek transportēti sasmalcināšanai, apdedzināšanai, atdalīšanai un citām darbībām [7].



3.1.1. att. Tehnoloģiskā procesa diagramma dzelzs pulvera ražošanas (Höganäs AB)

Mehāniskās un pneimatiskās transportēšanas sistēmas tiek plaši izmantotas pulverveida materiālu, piemēram, dzelzs pulveru transportēšanai.

Mills savas grāmatas ziņojumos [8] norāda, ka augstspiediena pneimatiskās sistēmas ir piemērotas dzelzs pulvera ar šķietamo blīvumu  $2,4 \text{ g/cm}^3$  transportēšanai. Šīs metodes trūkums - tās ierobežots piemērojums smagajiem pulveriem, jo ir nepieciešama augstspiediena sistēma, lai transportētu smagās daļiņas.

Ķēžu un kausu konveijerus parasti izmanto nepārtrauktās transporta sistēmās smago pulveru, ieskaitot dzelzs

pulveri, un rūdas ražošanā, kā arī pulveru šķirošanā [9]. Vairāki Eiropas uzņēmumi (Idealtec Powder (Italy), Schrage Rohrkettensystem GmbH (Vācija)) izstrādājuši īpašus ķēžu konveijerus pulveriem, tostarp dzelzs pulveriem [10], [11]. Šiem paņēmieniem piemīt sekojoši trūkumi: liela ražošanas metālietilpība un intensīvs materiālu nodilums.

Vertikālie vītņu transportieri pārstāv tradicionālo pieeju dzelzs pulveru transportēšanā [12]. Šajā metodē galvenokārt tiek izmantota īsos transportēšanas attālumos un to raksturo liels materiālu nodilums.

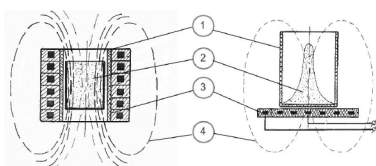
Rīgas Tehniskās universitātes (Latvija) impulsu elektromagnētisko lauku pētījumi melno un krāsaino metālu materiālu apstrādē galvenokārt bija saistīti ar metāla un nemetāla pulvera presēšanas un presēto pulveru apstrādi ar pulsējošu elektromagnētisko lauku [13]. Īpašu interesi izraisīja impulsa strāvas ģenerators izstrāde un ražošana kā arī spoles piemērošana pulveru materiālu presēšanai un deformēšanai.

Sakarā ar nepārtraukto pieprasījumu no rūpniecības puses, Rīgas Tehniskajā universitātē tika uzsākta feromagnētisko materiālu transportēšanas jauno metožu izstrāde un pētījumi ([14]).

Hipotēzes par feromagnētisko materiālu transportēšanu elektromagnētiskajā laukā formulēja Rīgas Tehniskās universitātes profesors V. Mironovs [15]. Vēlāk profesors V. Mironovs un profesors J. Vība izstrādāja feromagnētisko materiālu transportēšanas elektromagnētiskajā laukā darbības principus [16].

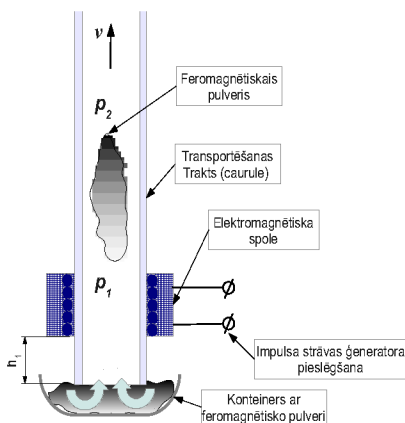
Pašreizējais darbs ir veltīts parādību pētījumiem un feromagnētisko materiālu transportēšanas īstenošanai ar impulsa elektromagnētisko lauku, procesa parametru definēšanai un to ietekmes novērtēšanai uz transportēšanas efektivitāti.

### 3.2. Otrā nodaļa. Teorētiskie jautājumi transportēšanai ar impulsa elektromagnētisko lauku.



3.2.1. att. Pulvera pārvietošana ar elektromagnētisko lauku.

1 – caurule, 2- feromagnētisks materiāls, 3 – spole, 4 – elektromagnētiskā lauka līnijas



3.2.2. att. Shēma pulveru pārvietošanas ar impulsa elektromagnētisko lauku.

Šajā nodaļā tiek dots teorētiskais pamatojums transportēšanai ar impulsa elektromagnētisko lauku. Tiek prezentēts impulsa strāvas ģenerators un spoles, kuras tika izmantotas laboratorijas iekārtu projektēšanā.

Feromagnētisko materiālu uzvedība magnētiskajā laukā ir labi pazīstama un tiek izmantota dažādu procesu realizācijai [17]. Pastāv daudzi tehniskie pielietojumi materiālu apstrādei ar elektromagnētisko lauku. Daži no tiem ir: magnētiski-abrazīvā apstrāde [18], materiālu magnetizācija un demagnetizēšana [19], termomagnētiskā cietēšana [20]. Pulveru transportēšanas procesu (3.2.1. att.) var izteikt, kā noteikta masas centra kustību zem pulsa spiediena iedarbības (3.2.2. att.). Spēks, kurš izraisa feromagnētiska materiāla pārvietošanos ir elektromagnētiskais spēks  $F_m$ , kuru var izteikt ar sekojošu vienādojumu:

$$F_m = \mu_0 \mu k \left( \frac{|i(t)|}{n} \right) \frac{r}{z}, \quad (3.1)$$

kur:

$\mu_0$  - magnetiskā caurlaidība vakuumā,  $\mu$  - pulvera magnētiskā caurlaidība,  $k$  – spole-pulveris faktors,  $i(t)$  - spoles impulsu strāva,  $n$  – spoles vītņu skaits,  $r$  - vidējais spoles rādiuss,  $z$  – attālums starp spoles un feromagnētisko materiālu.

Elektromagnētiskā paātrinājuma procesa īpatnība ir īsu elektromagnētisku impulsu ietekme. Laikā no tā izbeigšanās punkta (milisekundēs) feromagnētiskais materiāls turpina savu kustību (pacelšanos) ar iegūto inerci. Svarīgākie pulsa parametri: amplitūda, ilgums un rīšanas pakāpe.

Šajā gadījumā, spole ir galvenā ķēde, kura ir induktīvi savienota ar paceļamo ķermeni (feromagnētisks pulveris), kas darbojas kā sekundārā ķēde. Kondensatora izlāde uz spoles induktora, strāvai plūstot primārajā kontūrā, izraisa strāvas plūsmu sekundārajā kontūrā. Spole un paceļamais ķermenis izraisa magnētisko lauku divos pretējos virzienos. Tas noved pie strauja ponderomotīvā spēka pieaugumu [21], un paceltais pulveris iegūst sākotnējo ātrumu. Tā kondensatora enerģija tiek pārvērsta magnētisko lauku inducējošā enerģijā un pēc tam uz mehāniskā pulvera enerģijas rēķina izmet no spoles elektromagnētiskās savienojuma zonas, un daļēji pāriet siltumā.

### 3.3. Trešā nodaļa. Procesu modelēšana vertikālās caurulēs.

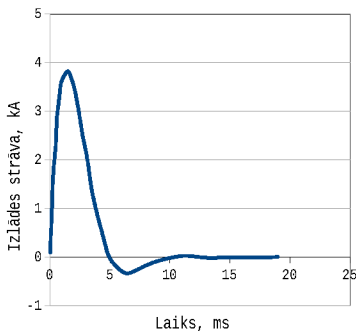
Šajā nodaļā veikta transportēšanas modelēšana ar impulsa elektromagnētisko lauku, mijiedarbības modelēšana starp elektromagnētisko lauku un feromagnētiskiem materiāliem.

Darbā tiek piedāvāts elektromagnētiskā konveijera modelis. Transportēšanas sistēmas modeli var raksturot ar vienu otrās kārtas diferenciālo vienādojumu (3.2) poraina materiāla masas centra kustībai [22] (3.2.2. att.).

$$m \ddot{x} = p_1 S_1 - p_2 S_2 - mg - F_T + C_0 (\Phi)^2 \operatorname{sgn} x \quad , \quad (3.2)$$

kur  $x$  - masas centra pārvietojums;  $m$  - pārvietotā masa;

$p_1, p_2$  - spiediens zem un virs pārvietojamā pulvera;  $S_1, S_2$  - atbilstošais laukums;  $g$  - brīvā kritiena paātrinājums;  $F_T$  - berzes spēks starp cauruli un pulveri;  $\Phi$  - magnētiskā plūsma;  $C_0$  - koeficients.



3.3.1. att. Impulsa strāvas grafiks pamatojoties uz modeļa.

Spiediena  $p_1, p_2$  aprēķināšanai tika izmantota pneimatisko sistēmu teorija [23].

Attiecīgi spoles izlādes strāva iedarbojas uz magnētisko spēku vai magnētisko sitienu. Induktora izlādes strāvas  $i(t)$  var izteikt šādā veidā (3.3).

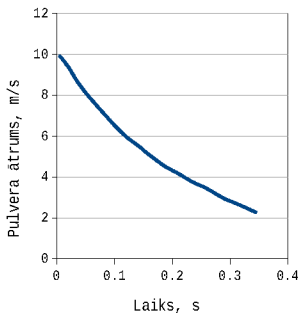
$$i(t) = I_m \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega t), (3.3)$$

kur  $I_m, \alpha$  - konstantes;  $\omega$  - izlādes strāvas leņķiskā frekvence, kuru var raksturot ar šādu vienādojumu (3.4).

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}, (3.4)$$

kur  $L$  - izlādētās ķēdes induktīvā pretestība,  $C$  - kondensatora kapacitāte izlādes laikā.

Impulsa strāvas izmaiņa laika domēnā ir parādīta (3.3.2. att.).

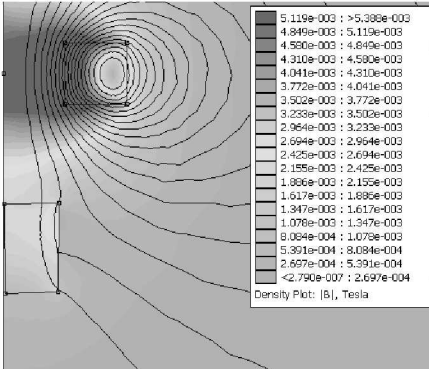


3.3.2. att. Pulvera ātruma grafiks laika periodā.

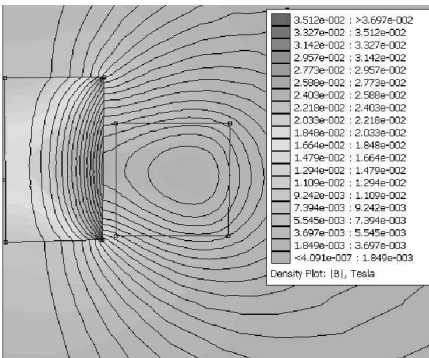
Turpmākā modelēšana liecina, ka kustības vienādojumu (3.1) var pārveidot un

sadalīt divos posmos, kas ietver strauja procesa modelēšanu priekš magnētiskās ķēdes pie neliela pulvera pārvietojuma, izsakot ar inženieraprēķiniem (3.5):

$$m \ddot{x} = p_1 S_1 - p_2 S_2 + F_m \quad (3.5)$$



3.3.3. att. Magnētiskā lauka blīvuma diagramma sakuma pozīcijā (Spole: Coil(01)).

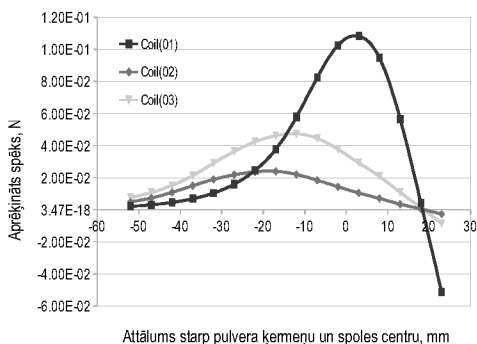


3.3.4. att. Magnētiskā lauka blīvuma diagramma gala pozīcijā (Spole: Coil(01)).

Pulvera ātruma modelēšana laika domēnā ir attēlota (3.3.3. Att.).

Šeit mijiedarbībai starp feromagnētisku materiālu un elektromagnētisko lauku ir svarīga nozīme materiālu transportēšanas parādības izpratnē. Elektromagnētiskās plūsmas sadalījuma modelēšana un elektromagnētisko spēku iedarbības novērtējumi uz feromagnētisko materiālu tika veikti, izmantojot FEA programmatūras ar FEMM un LUA skriptu valodas palīdzību [24].

Tika ņemti vērā šādi FEMM modeļa pieņēmumi: stabila strāva (spolē), bez virpuļstrāvām, pulvera ķermeņa simulācijas katrā pozīcijā (pozīcijas izmaiņas) gar Z asi tika aprēķinātas līdzsvara apstākļiem.



3.3.5. att. Magnētiskā lauka spēks, kas iedarbojas uz feromagnētisko materiālu atkarība pret attālumu no spoles.

att.).

Tādējādi pētījuma rezultāti un izstrādātie paņēmieni var tikt izmantoti turpmākajos inženiertehniskajos uzdevumos.

### 3.4. Ceturtā nodaļa. Eksperimentāla aprīkojuma izstrāde un eksperimentālā daļa.

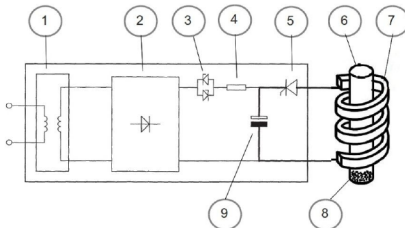


3.4.1. att. RTU EMC-05 laboratorijas mēroga elektromagnētiskais elevators.

Šī nodaļa aptver transportēšanas ar impulsa elektromagnētisko lauku procesu eksperimentālus pētījumus.

Pateicoties atbalstam, ko sniedz Eiropas Sociālā fonda doktorantūras studijām, Rīgas Tehniskajā universitātē laboratorijas mērogā tika izstrādāta zemsprieguma (<1000 V) elektromagnētiskā iekārta EMC-05 [25] feromagnētisko pulveru transportēšanai (3.4.1. att.).

Iekārta pulvera elektromagnētiskai transportēšanai sastāv no: impulsa strāvas ģeneratora (ISG), caurules pulvera transportēšanai un induktora (spoles), kurš veido tiešu elektromagnētisko lauku. Ierīces shēma ir parādīta (3.4.2. att.).



3.4.2. att. Elektromagnētiska elevatora EMC-05 shēma.

1 – transformators, 2 – taisngriezis, 3 – tiristors, 4 – uzlādēs rezistors, 5 – izlādes tiristors, 6 – konveijera trakts (caurule), 7 – spole, 8 – feromagnētiskais pulveris, 9 - kondensators.

Instrumentu komplekts tika pielāgots procesa parametru mērījumiem. Starp tiem: impulsa strāvas mērīšana, izmantojot Rogovska spoli, [26] un lēnas kustības (*slow motion*) video izmantošana, lai novērotu pulvera pārvietojumu.

Testiem tika izmantoti komerciāli pieejamie feromagnētiskie pulveri [27] [28] (3.4.1. tabula.). CMS pulveris un dzelzs plāva tika izvēlēti salīdzināšanas nolūkos, jo tie atšķiras no frakcionētiem dzelzs pulveriem. Tika izstrādātas vairākas spoles feromagnētisku pulveru transportēšanai (3.4.2. tabula.).

### 3.4.1. tabula. Feromagnētiskie pulveri, kuri izmantoti laboratorijas mēroga eksperimentos.

<b>Feromagnētiskais pulvera materiāls</b>	<b>Daļiņu izmērs, μm</b>	<b>Fe saturs, %</b>	<b>Bēruma blīvums, g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Īss apraksts</b>
NC100.24 (Höganäs pulveris)	20-180	~99.9	2.45	Tīrs porains dzelzs šķirņu pulveris
ASC100.29 (Höganäs pulveris)	20-180	~99.9	2.98	Tīrs atomitātes dzelzs pulveris ūdens vidē
M20/80-19 (Höganäs pulveris)	40-200	~99	2.60	No oglekļa reducēts porains dzelzs pulveris
Somaloy 500 (Höganäs pulveris)	50-100	~95	3.20	Izotropisks augstas tīrības dzelzs pulveris
Distaloy AE (Höganäs pulveris)	50-100	~95	3.05	Difūzijas legēts dzelzs pulveris
CMS pulveris (filtra nogulsnes no Höganäs ražotnē)	10-60	~99	2.85	Dažādu dzelzs pulveru kombinācija
Fe plava (pulveris)	50-200	~65-69	2.30	Dzelzs oksīdu un dzelzs pulveru maisījums

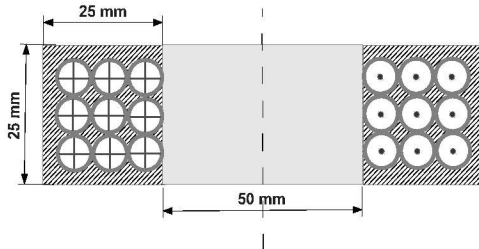
### 3.4.2. tabula. Spoles, kuras izmantotas laboratorijas mēroga eksperimentos.

Spole Nr.	Vijumu materiāls	Spoles izmēri: platums, augstums, mm	Vijumu vada diametrs, mm (ar izolāciju), mm	Vijumu materiāla elektrovādītspēja, MS/m	Vijumu skaits	Spoles induktivitāte, μH
01	Cu vads	25 x 25	5 (7)	59.6	9	132
02	Al vads	25 x 90	4.5 (7.5)	35	30	197
03	Cu vads	40 x 75	3.5 (5.5)	59.6	12	164
04	Al vads	75 x 40	4.5 (7.5)	35	16	71

Viena no eksperimentos izmantotajām spolēm ir parādīta (3.4.3. att.) un (3.4.4. att.).



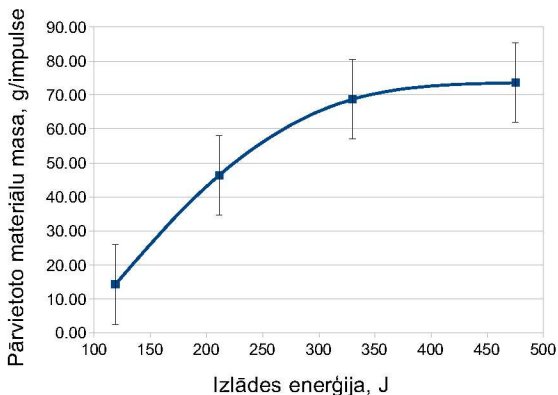
3.4.3. att. Cilindriska spole: (Coil(01)) ar Cu vadu.



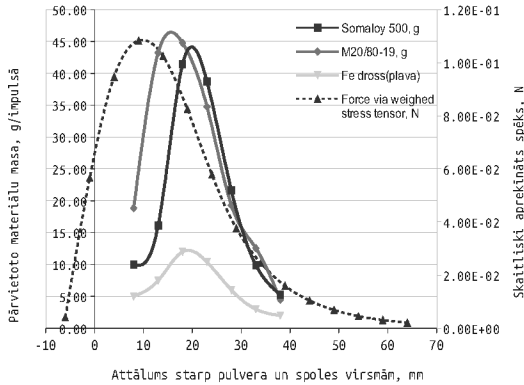
3.4.4. att. Cilindriska spole: Coil(01): Viju-  
mu shēma.

Tika novērtēti dažādi elektromagnētisko transportēšanu ietekmējoši parametri:

- attiecība starp izlādi un pārvietotā pulvera materiāla daudzumu augstumā līdz 1,5 m (3.4.5. att.);
- spoles ģeometriskā (un tīšanas materiāla) iedarbība, lai paaugstinātu jaudu pie dažādiem pulvera materiāliem;
- attāluma ietekme starp spoles virsmu (apakšējā daļā) un pulvera materiāla virsmu (3.4.6. att.).

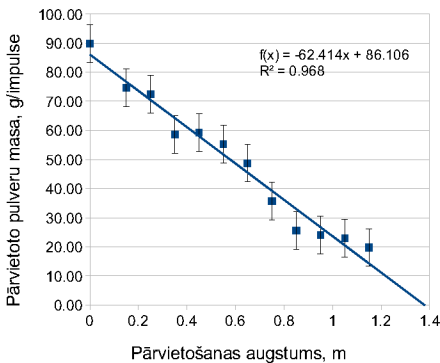


3.4.5. att. Pārvietota pulvera daudzuma attiecība pret izlādes enerģiju spolē (Coil(01)).



3.4.6. att. Mijiedarbība starp spoles virsmu (apakšējā daļā) un pulvera materiāla virsmu.

Atkarība starp izlādes spriegumu (enerģijas) un pārvietoto materiālu apjomu tika analizēta laboratorijas mēroga apstākļiem (darba spriegums: 50-140 V).



3.4.7. att. Pārvietotā materiāla daudzums atbilstība pret transportēšanas augstumu.

Pārbaudes pētījumi dažādiem feromagnētiskiem materiāliem ir uzrādījušas izteiktu atkarību starp maksimālo pacelšanas augstumu un attālumu starp elektromagnētisko spoli un feromagnētiskā pulvera virsmu (3.4.6. att.).

Izpētot transportēšanas procesu, tika konstatēts, ka pastāv lineāra sakarība starp pārvietoto materiālu daudzumu un izmērīto augstumu, kurā pulveris ir pārvietots. Pārvietotā pulvera apjoms vienā impulsā ir

parādīts (3.4.7. att.).

Gala rezultātā ar pētījumu ir pierādīta feromagnētisko pulveru transportēšanas iespēja ar eksperimentālo elevatoru. Tika definētas dažādas attiecības starp ietekmējošiem parametriem uz transportēšanas efektivitāti. Tika noteikts, ka pulveru uztveršanas efektivitāte ir atkarīga no attāluma starp spoli un pulvera virsmu. Tika definēta pārvietotā materiāla masas atkarība no daļiņu izmēriem un pārvietošanas augstuma.

### 3.5. Piektā nodaļa. Pārvietošanas ar impulsa elektromagnētisko lauku fenomena pielietojumi.

Pamatojoties uz eksperimentālajiem darbiem, ir izstrādāti zemāk sekojošie ieteikumi. Lai izstrādātu efektīvu iekārtu feromagnētisko pulvera transportēšanai ar impulsa elektromagnētisko lauku, jāņem vērā vairākus nozīmīgus parametrus. Kritisks parametrs elektromagnētiskai transportēšanai – attālums starp spoles un pulvera virsmām. Laboratorijas pārbaudes un modelēšana liecina, ka attālumam starp spoli un pulvera virsmu  $h_1$  (3.2.2. att.) jābūt diapazonā no  $0,5h < h_1 < h$ , kur  $h$  - spoles augstums. Citi parametri, kuriem būtu ietekme uz elektromagnētiskā konveijera produktivitāti ir šādi: izlādes enerģija un transportēšanas attālums.



3.5.1. att. Maisīšana ar impulsa elektromagnētisko lauku (dzelz pulveris ūdens šķīdumā)

Tika veikti papildus eksperimenti, pārvietojot dažādus materiālus ar elektromagnētisko lauku. Papildus eksperimentālais darbs tika veikts kvazi-reālos apstākļos, kad dzelzs pulveris M20/80-19 tiek pārvietots no lielāka rezervuāra uz mazāku konteineri augstumā

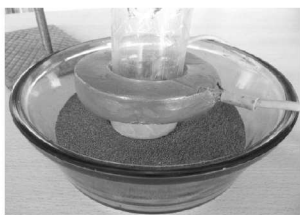
līdz 2 metriem, imitējot lielu maisu (*big bag*) ar pulveri (3.5.1. att.).

Izpildītie testi (3.5.2. att.) ir parādījuši, no vienas puses, elektromagnētiskā konveijera iespējamību, no otras puses - tehniskā projekta papildus pētījuma nepieciešamību.

Tika testēta sablīvētu pulveru daļiņu un cietu metāla ķermeņu (uzgriežņu) transportēšana [29].



3.5.2. att. Big bag (500, 1000 kg) ar feromagnētiskiem pulveriem.



3.5.3. att. Pulvera M20/80-19 pārvietošana kvazi-reālos apstākļos (maks. augstums ~2 m)

Feromagnētisko materiālu sviešana ar impulsa elektromagnētisko lauku tika veikta laboratorijas apstākļos. Dotā metode var būt izmantota materiālu velvju sagraušanai koniskos rezervuāros (krājīvertnes) [30].

Ir izstrādāta pieeja dažādas vides samaisīšanai ar elektromagnētisko impulsa lauku [31] [32]. Apskatīti vairāki iespējamie materiālu varianti sajaukšanai - pulveris-pulveris, pulveris-šķidrums (3.5.3. att.), šķidrums-šķidrums (izmantojot feromagnētisko materiālus kā darba ķermeni), un magnētiskais šķidrums [33].

Uzskatot pulvermetallurģiju par nozīmīgāko nozari, kura nodarbojas ar feromagnētiskiem pulveriem, elektromagnētiskā transportēšana pati par sevi vai apvienojumā ar citiem procesiem var rast pielietojumu pulvermetallurģijas procesos [34] [35], ieskaitot pulvermateriālu elektromagnētisko iešļircināšanu [36].

Viens no svarīgākajiem laboratorijas sistēmu kritērijiem ir iespēja laboratorijas mēroga iekārtu parametrus paplašinot līdz to rūpnieciskai piemērošanai. Nākamā tabula 3.5.1 atspoguļo prognozes elektromagnētiskā konveijera EMC-05 parametru paplašināšanu līdz rūpnieciskajam mērogam.

### 3.5.1. tabula. Elektromagnētiskā konveijera EMC-05 mērogojamības potenciāls.

<b>Parametrs</b>	<b>Laboratorijas līmenis</b>	<b>Perspektīvais industriālais pielietojums</b>
Impulsa strāvas ģenerators enerģija W, kJ	0.3-1.6	20
Maksimālā strāva spolē I, kA	0.15-2	5
Darbības spriegums U, V	50-200	1000
Kondensatoru kapacitāte, $\mu\text{F}$	30000-66000	1000-100000
Impulsu skaits, imp/min	10-60	Up to 100
Transportēšanas ātrums, m/s	5-10	Up to 30
Maksimālais transportēšanas augstums, m	0.5-2.0	3-6
Celšanas jauda	0.5-2.0 kg/min	0.5-5 t/h

## 4. SECINĀJUMI

- ✓ Pētījumi ir apstiprinājuši feromagnētisko pulveru transportēšanas iespēju ar impulsa elektromagnētisko lauku. Šī metode paver jaunas iespējas dzelzs un tērauda pulveru, kā arī citu feromagnētisko materiālu transportēšanai ar impulsa elektromagnētisko lauku.
- ✓ Ir izstrādāti feromagnētisko materiālu transportēšanai impulsa elektromagnētiskajā laukā procesu modelēšanas paņēmieni.
- ✓ Ir izstrādātas eksperimentālās zemsprieguma iekārtas impulsa elektromagnētiskā lauka procesa pētīšanai.
- ✓ Ir izstrādātas un pielāgotas metodes transportēšanas ar impulsa elektromagnētisko lauku eksperimentālo parametru mērījumiem.
- ✓ Ir formulēti ieteikumi turpmākajam feromagnētisko materiālu transportēšanas ar impulsa elektromagnētisko lauku pielietojumam.
- ✓ Elektromagnētiskais konveijers var būt ieteikts kā risinājums noteiktos rūpnieciskos procesos, īpaši pulvermetallurģijā un citos saistītos procesos.

## 5. TURPMĀKAIS DARBS

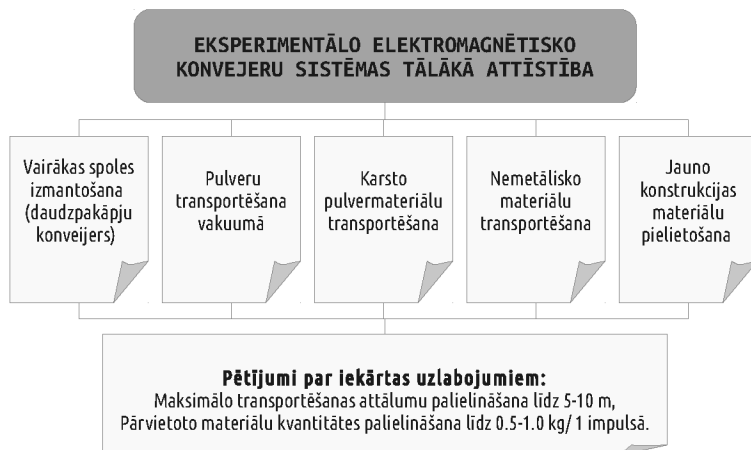
Neskatoties uz to, ka pašreizējā izpēte ir apstiprinājusi feromagnētisko

pulvermateriālu transportēšanas iespēju ar impulsa elektromagnētisko lauku, ir daudzi praktiski jautājumi, kas jāizpēta, lai ieviestu elektromagnētisko transporta sistēmu liela mēroga rūpnieciskajās iekārtās.

Tiek plānoti nepieciešamie pētījumi, lai:

- palielinātu transportēšanas distanci;
- uzlabotu iekārtas ražīgumu;
- uzlabotu aparatūras drošumu;

Ir paredzēta arī jaunas iekārtas izstrāde speciāliem pielietojumiem (mikro- un nanodaliņās transportēšana un dozēšana, pulvera materiālu samaisīšana, feromagnētisko daļiņu pārvietošanā vakuumā un aizsardzības vidē) (5.1. att.).



5.1. att.: Turpmāko elektromagnētisko konveijeru sistēmas pētījumu diagramma.

Pateicoties ilgai sadarbības vēsturei starp Rīgas Tehnisko universitāti un Rietumu Saksonijas Lietišķo zinātņu universitāti Cvikavā (Vācijā) (West Saxon University of Applied Sciences of Zwickau) [37], būs iespējams turpināt pētnieciskās darbības, izmantojot iekārtas (5.2. att.) [38], kopējas zināšanas un spēkus, lai izstrādātu un īstenotu jaunas transportēšanas sistēmas.



5.2. att. Elektromagnētiska iekārta uzstādīta Cvikavas universitātē (Zwickau university of Applied Sciences) (2011. g.).

## 6. AUTORA PUBLIKĀCIJAS UN PATENTI

### 6.1. Publikācijas zinātniskos žurnālos

J1. В. Миронов, В. Лапковский. Трубчатые изделия с высокой проницаемостью по технологии МИОМ. В сб. «Порошковая металлургия» № 27, Минск, Беларусь, 2004, стр. 188-191.

J2. Миронов В., Лапковский В. Модель осесимметричного уплотнения порошковых материалов в металлической оболочке в импульсном электромагнитном поле. В сб. «Порошковая металлургия», № 31, Минск, Беларусь, 2008.

J3. Миронов В., Бойко И., Лапковский В. Интенсификация процессов производства и транспортирования сыпучих материалов импульсным магнитным полем. В сб. «Порошковая материалы и технологические процессы их получения», выпуск 31, Минск, Беларусь, 2008, стр. 101-104.

J4. V.Lapkovsky, V.Mironov, V.Zemchenkov, I.Boyko „Tubular metal powder permeable materials with anisotropic structure and their application” // International Scientific Journal „University Review” on Physics of Materials, Alexander Dubcek University of Trencin, 2008., Vol.2, No.3, p.35-38. (published in 2009.g.)

J5. V.Mironov, I.Boyko, V.Lapkovsky „Properties and quality of the surface of iron-copper powder details” // International Scientific Journal „University Review” on Physics of Materials, Alexander Dubcek University of Trencin, 2008., Vol.2, No.3, p.41-45. (publicēts 2009.g.)

J6. V. Mironov, V. Zemchenkov, V. Lapkovsky. Model of the Magnetic-pulse packings of dispersed materials. Transactions of the VŠB- Technical University of Ostrava. Czech Republic, Ostrava, 2009, p. 249-253.

J7. Mironov V., Boyko I., Lapkovsky V. Composite details from Fe-Cu powder materials. Medžiagotyra (Materials science). Vol. 15, No. 1. 2009 , pp. 44-47. /reference in the conference abstracts: Proceeding of 17th Int. Conf. „Materials Engineering”. Kaunas, Lithuania, 2008, p. 7-8.

J8. Миронов В., Виба Я., Лапковский В. Электромагнитное транспортирование ферромагнитных порошков в трубах. В сб. Порошковая Металлургия, вып. 33, Минск, Беларусь, 2010, с. 53-59.

## 6.2. Publikācijas zinātnisko konferenču krājumos

K1. V. Mironov, V. Lapkovsky. Tubular articles with the high permeability by uses of the MIOM technology. In proceeding of 8th Int. Baltic conf. "Engineering materials and Tribology-2004", Rīga, Latvia, Sept. 2004, p. 201-205.

K2. V. Mironov, J. Vība, V. Lapkovsky. Lifting of disperse materials with pulse electromagnetic field. 1. Latvijas konf. "Nanomateriāli un nanotehnoloģijas" rakstu krājums, Rīga, Marts 2005, p. 118-120.

K3. Миронов В.А., Лапковский В.Ф. Оценка методов неразрушающего контроля для использования в серийном производстве железомедных порошковых деталей. В трудах Межд. симпозиума «Прогрессивные процессы порошковой металлургии». Минск, Беларусь, Март, 2005, с. 48-52

K4. V. Mironov, V. Lapkovskis, F. Muktepavela. Processing of sintered porous materials in pulsed electromagnetic field. In proceedings of the 7th Int. Technical Scientific Conf. New Materials and Technologies: Powder Metallurgy, Composite Materials, Protective Coatings, Minsk, Belarus, 2006.

K5. V. Mironovs, J. Vība, V. Lapkovskis. "Investigation of impulse system for moving powder materials in vertical pipe". Book of abstracts 1st Int. Conf. on vibro-impact systems, July 2006, ICOVIS, Loughborough, UK, p. 30.

K6. Boyko I., Mironov V., Lapkovsky V. Research of accuracy of powder billets and details. 5th Intern. Conf. „Metals, Welding & Powder Metallurgy” (MET-2007), Latvia, Rīga, 2007, pp. 85 – 87.

K7. Lapkovsky V.. High-porous materials made of metallic powders /In Russian: Высокопористые материалы из металлических порошков/. In proceedings of 5th Intern. Conf. „Metals, Welding & Powder Metallurgy” (MET-2007), Latvia, Rīga, 2007, p. 79-80.

K8. Boyko I., Mironov V., Lapkovsky V. Welding and The Soldering of Powder

Fe-C-Cu Details, 3rd Intern. conf. on total welding management in industrial applications. Finland, Lappeenranta University of Technology, 2007. g., 228 – 234, 2235 – 239..

K9. Boyko I., Mironov V., Lapkovsky V. Property and Structure Changes of Sintered Powder Materials by The Treatment in The Pulse Electromagnetic Field. // In: Proc. of EURO PM – 2007 Conf., Toulouse, France. – Vol. 3. – p. 439-444.

K10. V.Lapkovsky, V.Mironov, V.Zemchenkov, I.Boyko. Tubular metal powder permeable materials with anisotropic structure and their application. In Proceeding of 13th International Conference on Problems of Material Engineering, Mechanics and Design, Rajecke Teplice, Slovakia, 2008, p.100-103.

K11. V.Mironovs, I.Boyko, V.Lapkovsky. Properties and quality of surface of iron-copper powder details". In Proceedings of The 13th International Conference on Problems of Material Engineering, Mechanics and Design, Rajecke Teplice, Slovakia, 2008, p.117-120.

K12. I. Boyko, V. Lapkovsky, V. Mironov, V. Zemchenkov. Research on technology and equipment for pulse stud welding. In proceeding of Int. Conf. EUROJOIN-7, Venice, Italy, 2009.

K13. V. Mironov, V. Lapkovsky, I. Boyko. Use of a pulse magnetic field for metal part joining. In proceeding of Int. Conf. EUROJOIN-7, Venice, Italy, 2009.

K14. V. Lapkovsky, V. Mironov. Perspective technologies for joining of details made of metallic powders. In proceeding of Int. Conf. EUROJOIN-7, Venice, Italy, 2009.

K15. V. Lapkovsky, V. Mironov, V. Zemchenkov, I. Boyko. Processing of Powder Materials by Pulse Electromagnetic Field, Proceedings of World Powder Metallurgy Congress PM2010, 10-14 October, 2010, Florence, Italy, Volume 1, pp. 519-524.

K16. A. Shishkin, V. Mironov, D. Goljandin, V. Lapkovsky. Mechanical disintegration of Al-W-B waste material. In Proceedings of World Powder Metallurgy Congress PM 2010; Florence, Italy, 2010, vol II. pp. 597-601.

K17. Миронов В.А., Шипица Н.А., Бойко И.Ю., Шишкин А.Ю., Лапковский В.Ф. Некоторые трибологические свойства Al-W-B материалов. В сб. 9-я

Межд. Н.-техн.конф. «Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка.». Минск, Беларусь, 2010, с.83-87.

K18. A.Shishkin, V.Mironov, D.Goljandin, V.Lapkovsky, I.Pavlovsk. Disintergration of Al-W-B composite material: particle morphology and energy consumption analysis. Book of abstracts of the 5th Baltic Conference on Silicate Materials - Baltsilica 2011, Riga, Latvia, 2011, p. 83-85. (full text to be reviewed)

K19. V.Mironov, I.Boiko, V.Lapkovskis. Production of Fe-C-Cu powder coatings by pulse magnetic pressing and infiltration. Proceedings of 15th International Research/Expert Conference TMT-2011, Prague, Czech Republic, Sept. 2011, pp. 137-140.

K20. V.Lapkovsky, V.Mironov, A.Shishkin, V.Zemchenkov. Conveying of ferromagnetic powder materials by pulsed electromagnetic field . Proceedings of EuroPM-2011 Congress and Exhibition, Barcelona, Spain, Oct. 2011, pp. 253-258.

K21. V. Mironovs, V. Lapkovskis, J. Treijs, and E. Teirumnieks, "Ferromagnetic Sorbents for Collection and Utilization of Oil Products" MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA), p. 5, 2012. (in print).

K22. V. Lapkovskis and V. Mironovs, "Single-stage Electromagnetic Elevator Modelling in FEMM software," in 8th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, Tallinn, Estonia, 2012, no. April, pp. 321-325.

RTU Conferences:

K23. V. Mironovs, V. Lapkovskis. Permeable materials made of metallic powders and its applications for ecological tasks. In 46th Annual RTU Scientific Conference, sec. Architecture and Construction Science, Oct. 2005, Riga, Latvia.

### **6.3. Patentu saraksts**

P1. V. Mironovs, V. Lapkovskis. Permeable elements (in Latvian: Caurlaidīgs elements. LR Patent LV 13524 B, 20.05.2007.

P2. V. Mironovs, V. Lapkovskis. Method for manufacture of articles made of

powder materials (in Latvian: Detaļu izgatavošanas paņēmieni no pulvermateriāliem). LR Patent LV 13655 B, 20.03.2008.

P3. V. Mironovs, V. Lapkovskis, V. Zemčenkovs. Sorbent for collection of the flowed out petroleum products (in Latvian: Sorbents naftas produktu savākšanai). LR Patent LV 13927 B, 20.08.2009.

P4. V. Mironovs, A. Šiškins, V. Lapkovskis, J. Baroniņš. Magnetic stirrer (in Latvian: Magnētiskais maisītājs). LR patents LV 14382 B, Int. Cl. B01F13/00, B01F15/00. 20.12.2011.

P5. V. Mironovs, V. Lapkovskis, A. Šiškins, J. Baroniņš. Method and device for mixing of powder materials (in Latvian: Pulvermateriālu sajaukšanas paņēmieni un iekārta tā īstenošanai). LR patents LV 14383 B, Int. Cl. B22F9/02. 20.12.2011.

## 7. AUTORA CURRICULUM VITAE

<b>Personas dati</b>	
	VJACESLAVS LAPKOVSKIS, 08.11.1972. Jūrmala, Latvija. <a href="mailto:vjaceslavs.lapkovskis@rtu.lv">vjaceslavs.lapkovskis@rtu.lv</a>
<b>izglītība</b>	
09/1994 - 06/1997	Maģistra grāds (M.Sc.), Latvijas Universitāte, Latvija.
09/1990 - 06/1994	Bakalaura grāds (B.Sc.), Latvijas Universitāte, Latvija.
<b>Papildu mācības</b>	
09/1996 - 05/1997	Pre-MBA kurss, RTU Riga Business School, Latvija.
10/2003 - 06/2004	Intelektuālā īpašuma aizsardzība, Profesionālā apmācība, Promolazio/Promex SpA (Itālija), ILBC (Latvija).
09/2000 - 11/2001	Cilvēku resursu vadības kurss, Meta International (USA), PPS (Latvija).
1996, 1999	Itāļu valodas programma ārvalstu studentiem, Itālija.
03/1999 - 11/1999	ISO standartizācijas un kvalitātes pārvaldības kursi, Itālija.
11/1998 - 12/1999	Biznesa organizācijas kursi, European Credit Transfer System (ECTS), Itālija.

<b>Darba pieredze</b>	
10/2006 līdz šim brīdīm	Pētnieks, BF, Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija.
12/2001 līdz šim brīdīm	Projektu vadītājs, Orions Llc, Ekoloģisko iekārtu ražošana, Latvija.
11/1998 - 08/2000	Projekta attīstītājs, CINSA/Sipsa Srl., Ekoloģisko iekārtu ražošana, Itālija.
11/1998 - 08/1999	Atkritumu pārstrādes tehnoloģijās izstrādātājs, Kaljari Universitāte, Mašīnbūves departaments., Itālija.
09/1996 - 11/1998	IT un personāla administrators, Art&Area Llc, Latvija.
03/1996 - 06/1996	Internship, projekta attīstītājs (ABB Italia), Mašīnbūves departaments, Kaljari Universitāte, Itālija.
10/1994 - 12/1995	Pētnieks, Latvijas Universitāte, Latvija.
<b>Valodu prasmes</b>	
	Krievu –dzimtā valoda, Latviešu – brīvi, Angļu – brīvi, Itāļu– brīvi, Franču – vidējais līmenis.
<b>Datorprasmes</b>	
	Programmatūra ar atklāto kodu (Linux, LibreOffice), zinātnes programmatūra (SciDavis, FEMM etc.), komerciālās inženierijas programmatūra FLUENT/ANSYS, Microsoft programmatūras produkti.

## 8. BIBLIOGRAFIJAS AVOTU SARAKSTS

- [1] A. Goldman, *Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*. Kluwer Academic Publishers, U.S.A., 2002, p. 651.
- [2] *Introduction to powder metallurgy*. European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury, UK, 2010, p. 36.
- [3] W. Schatt and K.-P. Wieters, *Powder metallurgy: processing and materials*. EPMA, Shrewsbury, UK, 1997, p. 492.
- [4] N. Z. Pozdnyak and A. N. Krushinsky, *Design and equipment of powder metallurgy plants /in Russian/*. Moscow, Mashinostroeniye, 1965, p. 297.

- [5] *Höganäs handbook of sintered components: Material and powder properties*. Höganäs AB, 1997.
- [6] P. D. Johnston, "The energy economics of a new route to iron and alloying metal powders," in *4th International Symposium on Plasma Chemistry*, 1979, pp. 703-707.
- [7] *Höganäs handbook for machining guidelines*. Höganäs, 2004, p. 135.
- [8] D. Mills, *Pneumatic conveying design guide*. Butterworth-Heinemann, 2004, p. 637.
- [9] N. E. Romakin, *Mashini nepriivnogo transporta /in Russian/*. Akademia, Moscow, 2008, p. 428.
- [10] "Schrage Rohrkettensystem GmbH Conveying Systems." [Online]. Available: <http://www.schrage.de/en/schrage-informs/glossary/glossar-db/tube-chain-conveyor.html>. [Accessed: 05-Feb-2012].
- [11] "Idealtec Powder handling machines." [Online]. Available: <http://www.idealtecsrl.com>. [Accessed: 07-Feb-2012].
- [12] A. Kurjak, "The vertical screw conveyor- powder properties and Screw conveyor design (Master Thesis)," Lund Institute of Technology, 2005.
- [13] V. A. Mironov, *Magnitno-impulsnoe pressovaniye poroshkov /in Russian/*. Riga, Zinatne, 1980, p. 196.
- [14] V. Mironov and J. Viba, "Device for transportation of powders in a vertical pipe by a pulse of electromagnetic field," in *Proc. of the 3rd International conference of DAAAM National Estonia*, 2002, pp. 193-196.
- [15] "Mironov V., Kolosov V. Lifting of powder materials. LR Patent. LV-12785B, Int.cl. 7B65G54/02, H02K44/02, 20.03.2002."
- [16] V. Mironov and J. Viba, "Lifting of powder with pulse electromagnetic field," in *9. Proc. of 12th Int.l Baltic Conf.. "Engineering Materials & Tribology". BALTMATTRIB - 2003*, 2003, pp. 30-31.
- [17] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, UK, 2009, p. 619.
- [18] M. Raghuram and S. Joshi, "Modeling of Polishing Mechanism in Magnetic Abrasive Polishing," in *The 12th International Conference IACMAG*, 2008, pp. 1-6.

- [19] N. Dobrynin, V. Barthem, and D. Givord, "Revisiting magnetization processes in granular hard magnetic materials," *Applied Physics Letters*, vol. 95, no. 5, p. 052511, 2009.
- [20] C. Papadatu and I. Ștefănescu, "an overview of researches regarding the change of mechanical characteristics by thermomagnetic treatment," *The annals of university "Dunărea de Jos" of Galați Fascicle viii, Tribology*, pp. 94-97, 2003.
- [21] D. Langemann, "Total Ponderomotive Force on an Extended Test Body," *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, vol. 2009, pp. 1-12, 2009.
- [22] V. Mironovs, J. Viba, and V. Lapkovskis, "Investigation of impulse system for moving powder materials in vertical pipe," in *Book of abstracts of the 1st Int. Conference on vibro-impact systems*, 2006, p. 30.
- [23] E. V. Gerc and G. V. Kreinin, *Dynamics of pneumatic drives of automatic machines /in Russian/*. Mashinostroenie, Moscow, 1964, p. 236.
- [24] V. Lapkovskis and V. Mironovs, "Single-stage Electromagnetic Elevator Modelling in FEMM software," in *8th International DAAAM Baltic Conference Industrial Engineering, Tallinn, Estonia*, 2012, no. April, pp. 321-325.
- [25] V. Lapkovskis and V. Mironovs, *Laboratory equipment EMC-05. Introduction to conveying of ferromagnetic powders by impulse electromagnetic field*. 2012.
- [26] U. Batygin, G. Serikov, and E. Chaplygin, "Measuring results numeral treatment of impulsive currents by means of Rogovsky belt application (in Russian)," *Avtomobilnyi Transport*, no. 25, pp. 194-198, 2009.
- [27] *Höganäs Powder Materials Handbook*. Höganäs, Sweden., 2004, p. 379.
- [28] M. Viganò, "Metallurgia delle polveri Materiali magnetici dolci," *La Metallurgia Italiana*, vol. 4, pp. 21-27, 2011.
- [29] V. Lapkovsky, V. Mironov, A. Shishkin, and V. Zemchenkov, "Conveying of Ferromagnetic Powder Materials by Pulsed Electromagnetic Field," in *Euro PM2011 – Tools for Improving PM: Modelling & Process Control*, 2011, pp. 253-258.
- [30] V. Mironov, I. Boyko, and V. Lapkovsky, "Intensification of manufacturing processes by transportation of bulk materials by a pulsed

magnetic field / In Russian/," *Powder materials and processes of their production*, vol. 31, pp. 101-104, 2008.

[31] V. Mironovs, V. Lapkovskis, A. Šiškins, and J. Baroniņš, "Method and device for mixing of powder materials (in Latvian: Pulvermateriālu sajaukšanas paņēmiens un iekārta tā īstenošanai). LR patents LV 14383 B, Int. Cl. B22F9/02. 20.12.2011."

[32] V. Mironovs, A. Šiškins, V. Lapkovskis, and J. Baroniņš, "Magnetic stirrer (in Latvian: Magnētiskais maisītājs). LR patents LV 14382 B, Int. Cl. B01F13/00, B01F15/00. 20.12.2011."

[33] N. Pamme, "Magnetism and microfluidics.," *Lab on a chip*, vol. 6, no. 1, pp. 24-38, Jan. 2006.

[34] R. Orban, "New research directions in powder metallurgy," *Romanian Reports in Physics*, vol. 56, no. 3, pp. 505-516, 2004.

[35] P. K. Johnson, "Technology investments key to PM's future," *International Journal of Powder Metallurgy*, vol. 45, no. 3, pp. 11-15, 2009.

[36] E. Protopopov, T. Galiullin, and A. Chernyatevich, "Powder injection into slag in a converter," *Steel in Translation*, vol. 39, no. 4, pp. 16-20, 2009.

[37] V. Mironov and H. Wolf, "Pulververdichten durch elektromagnetische Kräfte Herstellunsmöglichkeit für Werkzeugaktivelements," *Fertigungstechnik*, no. 9, pp. 558-590, 1980.

[38] M. Kolbe, "Neue Anlage zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung," *Aktuelle Informationen des IfP (WHZ)*, no. 9, 2010.