

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Kalvis KRAVALIS**

**SŪKŅA AR ROTĒJOŠIEM PASTĀVĪGAJIEM  
MAGNĒTIEM IZPĒTE ŠĶIDRU METĀLU  
TRANSPORTĒŠANAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Nozare: Mašīnzinātne**

**Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija**

**Rīga 2013**

# **RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Transporta un mašīnzinību fakultāte  
Mašīnbūves tehnoloģijas institūts

**Kalvis KRAVALIS**

Doktora studiju programmas „Ražošanas tehnoloģija” doktorants

## **SŪKŅA AR ROTĒJOŠIEM PASTĀVĪGAJIEM MAGNĒTIEM IZPĒTE ŠĶIDRU METĀLU TRANSPORTĒŠANAI**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Nozare: Mašīnzinātne**

**Apakšnozare: Mašīnbūves tehnoloģija**

Zinātniskais vadītājs

Dr. sc. ing., Asoc. profesors

**G. BUNGA**

Dr. Phys., Vadošais pētnieks

**I. BUCENIEKS**

**Rīga 2013**

UDK 621.67(043.2)

Kr 280 s

Kravalis K. Sūkņa ar rotējošiem  
patstāvīgajiem magnētiem izpēte  
šķidru metālu transportēšanai.  
Promocijas darba kopsavilkums.  
R.: - RTU, 2012 . 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar MTI institūta  
2011. gada 21. aprīļa lēmumu,  
protokols Nr. 4/11

Šis darbs ir izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā „Atbalsts RTU  
doktora studijas īstenošanai”

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. g. 12. martā Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultātē, Ezermalas ielā 6, 405. auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Dr.sc.ing. habilitētais profesors Algirdas Bargelis  
Kauņas Tehnoloģijas universitāte, Lietuva

Dr.phys., vadošais pētnieks Juris Zvirgzds  
Latvijas Universitāte

Dr.sc.ing., profesors Juris Krizbergs  
Rīgas Tehniskā universitāte

**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.

Kalvis Kravalis .....(Paraksts)  
Datums:06.11.2012

Promocijas darbs uzrakstīts latviešu valodā, sastāv no 4 nodaļām un tā apjoms ir 131 lappuse, kurās ietverti 7 attēli, 7 tabulas un 4 pielikumi. Darbā izmantots 60 literatūras avoti.

## SATURS

PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	6
Tēmas aktualitāte .....	6
Darba mērķis.....	6
Pētāmā problēma.....	6
Darba uzdevumi .....	7
Pētījumu metodika .....	7
Zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti.....	8
Praktiskais pielietojums.....	8
Autors darbā aizstāv .....	8
Darba aprobācija .....	8
Publikācijas.....	10
Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts .....	10
PROMOCIJAS DARBA SATURS .....	11
1. nodaļa. ELEKTROMAGNĒTISKO SŪKŅU PIELIETOŠANAS IESPĒJAS ŠĶIDRO METĀLU TEHNOLOĢIJĀS UN ESOŠIE PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅU APRĒĶINA MODEĻI.....	11
2.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas sadalījuma aprēķina modelis.....	14
2.2. Magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma analīze diskveida pastāvīgo magnētu sūknim ....	15
3. nodaļa.    DISKVEIDA PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI .....	18
3.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa ar pastāvīgiem rotējošiem magnētiem izgatavošana.	18
3.2. Eksperimentālās iekārtas pastāvīgo magnētu sūkņa parametru mērījumiem izveidošana ..	19
3.3. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas sadalījuma mērījumi .....	20
3.4. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa spiediena - ražības raksturlielumu uzņemšana .....	22
4. nodaļa.    APRĒĶINU UN MĒRĪJUMU REZULTĀTU SALĪDZINĀJUMS.....	24
4.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas mērījumu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem .....	24
4.2. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa spiediena – ražības raksturlielumu mērījumu rezultātu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem un ātruma sadalījuma sūkņa kanālā analīze .....	25
SECINĀJUMI .....	28
LITERATŪRAS SARAKSTS .....	30

# PROMOCIJAS DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

## Tēmas aktualitāte

Eksperimentālās iekārtas, kas izmanto šķidro metālu arvien biežāk tiek pielietotas dažādu ātomenerģētikas, kā kodolu dalīšanās tā arī sintēzes un metalurģijas procesu pētīšanai. Metālu kustības radīšanai iekārtās izmanto dažāda veida sūkņus, to skaitā diskveida elektromagnētiskos sūkņus ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem. Diskveida elektromagnētiski indukcijas sūkņi ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem līdz šim ir maz pētīti. Literatūrā ir atrodamas tikai vispārinātas sakarības šāda tipa sūkņu konstrukcijas parametru aprēķinam. Ir aplūkota aprēķina metodika indukcijas sūkņiem ar elektrisku ierosmi un cilindriskiem pastāvīgo magnētu sūkņiem. Līdz šim tie pielietoti tikai nelielas jaudas iekārtās un tiem bija neliela ražība un attīstītais spiediens. Lai tos pielietotu lielas jaudas šķidra metāla sūknēšanas tehnoloģiskajās iekārtās, jāuzlabo to izejas parametru – spiediena - ražības - aprēķina metodika, kas ļautu veikt precīzākus aprēķinus.

## Darba mērķis

Izstrādāt diskveida pastāvīgo magnētusūkņa sūkņa magnētiskās sistēmas parametru aprēķina modeli un uzlabot šķidru metālu sūknēšanas tehnoloģisko procesu, lietojot elektromagnētiskos indukcijas sūkņus ar pastāvīgiem rotējošiem magnētiem. Eksperimentāli aprobēt modeli.

## Pētāmā problēma

Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa izejas parametrus – ražību un attīstīto spiedienu ir grūti precīzi prognozēt, jo nav izstrādāta precīza sūkņa parametru aprēķina metodika. Lai to izdarītu nepieciešams precīzi aprēķināt magnētiskās sistēmas radīto magnētisko lauku. Pastāvīgo magnētu sūkņu nemagnētiskā sprauga ir liela, tādēļ nav iespējams lietot aprēķinu metodiku, ko pielieto elektrisko mašīnu magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma un konstrukcijas parametru aprēķinam, jo sarežģītas magnētisko lauku sadalījums. Sakarā ar aktīvās zonas sarežģīto ģeometrisko konfigurāciju ar matemātiskās fizikas vienādojumiem ir

nepieciešams aprakstīt vienkāršotus modeļus, kuri apraksta tikai vienu no pētāmajiem parametriem (magnētu augstumu, platumu un polu soli, attālumu starp magnētu blokiem).

### **Darba uzdevumi**

- 1) Izstrādāt sūkņa magnētiskās sistēmas parametru aprēķina modeli un pielietot to diskveida PM sūkņa magnētiskās sistēmas konstruktīvo parametru aprēķinam. Analizēt dažādu magnētiskās sistēmas konstruktīvo parametru ietekmi uz magnētiskās indukcijas vērtību sūkņa kanāla zonā.
- 2) Aprēķināt PM sūkņa spiediena – ražības parametrus un ātruma sadalījumu tā kanālā.
- 3) Izgatavot diskveida sūkni ar pastāvīgiem magnētiem un veikt magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma mērījumus tā aktīvajā zonā.
- 4) Izstrādāt eksperimentālu iekārtu, ar tās palīdzību izmērīt sūkņa spiediena-ražības raksturlīknes.
- 5) Salīdzināt eksperimentā iegūtos datus ar aprēķinu modeļa datiem, lai verificētu modeļa pielietojamību šāda tipa sūkņu aprēķinam un salīdzināt sūkņa lietderības koeficientu ar analogiem.

### **Pētījumu metodika**

Matemātiskais modelis izveidots tā, lai būtu iespējams analizēt sūkņa magnētiskās sistēmas parametru ietekmi uz magnētiskās indukcijas vērtību kanāla zonā. Magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma aprēķinu ar modeļa palīdzību veic ar MS Excel programmu. Eksperimentālās daļas veikšanai tiek izgatavots diskveida pastāvīgo magnētu sūknis un šķidra metāla cirkulācijas kontūrs. Darba eksperimentālajā daļā veikti sūkņa magnētiskās sistēmas magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma mērījumi ar gausmetru *Lakeshore Model 475 Gaussmeter*. Spiediena - ražības raksturlīkņu mērījumi tika veikti izmantojot Venturi caurteces mērītāju. Sūkņa attīstīto spiedienu mērīja izmantojot diferenciālo manometru. Raksturlīkņu matemātiskā analīze veikta ar lineārās regresijas palīdzību. Modeļa pārbaudei veikts aprēķināto vērtību salīdzinājums ar mērījumu rezultātiem.

## **Zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti**

Darba novitāte ir saistīta ar jaunu aprēķinu modeli šķidru metālu tehnoloģijās lietojamo pastāvīgo magnētu diskveida sūkņu magnētiskās sistēmas parametru aprēķinam. Modeļa izveidē tiek izmantoti aprēķinu paņēmieni, kas netiek lietoti elektriskas ierosmes elektriskajās mašīnās, jo pastāvīgo magnētu sūkņu nemagnētiskajā spraugā atrodas gan sūkņa kanāls, gan pastāvīgie magnēti. Modelī galvenā vērība vērsta uz magnētiskā lauka indukcijas aprēķinu aktīvajā zonā. Eksperimentālai pārbaudei tika izgatavots diskveida sūknis, kā arī izveidots šķidrā metāla kontūrs tā pārbaudei. Teorētiskie aprēķini ir salīdzināti ar eksperimentālajiem datiem.

## **Praktiskais pielietojums**

Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņus lieto šķidru metālu sūknēšanas tehnoloģijās, konkrēti eksperimentālās iekārtās un metalurģijas vajadzībām metālu, kas nav agresīvi pret nerūsošā tērauda kanālu, pārsūknēšanai. Darbā iegūtos teorētiskos un empīriskos rezultātus pielieto LUFU ražotajos pastāvīgo magnētu sūkņos, kas tiek piegādāti virknei pasūtītāju visā pasaulē, starp kuriem ir gan zinātniskas iestādes, gan ražošanas organizācijas.

Elektromagnētiskos sūkņus ar pastāvīgiem magnētiem paredzēts pielieto tajās pašās šķidru metālu tehnoloģijās – metalurģijā, atomenerģētikā un eksperimentālās ierīcēs.

## **Autors darbā aizstāv**

Jauna veida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās sistēmas aprēķina modeli diskveida sūkņiem ar rotējošiem pastāvīgiem magnētiem, kas tiek lietoti šķidru metālu sūknēšanas tehnoloģijās.

## **Darba aprobācija**

Par promocijas darba galvenajiem atzinumiem un rezultātiem sniegti ziņojumi sekojošās konferencēs un semināros:

1. K. Kravalis, G. Bunga. Magnetohidrodinamiskā sūkņa ar pastāvīgiem magnētiem parametru analīze. Rīgas Tehniskās Universitātes 45. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 14 – 16. oktobris 2004.
2. K. Kravalis, G. Bunga. Elektromagnētisko sūkņu ar rotējošiem magnētiem īpašības un pielietojums. Rīgas Tehniskās Universitātes 46. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 13 – 15. oktobris 2005.
3. K. Kravalis, G. Bunga. Mazgabarīta kontūrs ar elektromagnētisku indukcijas sūkni ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem materiālu dzesēšanai ar dzīvsudrabu. Rīgas Tehniskās Universitātes 47. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 12 – 14. oktobris 2006.
4. K. Kravalis, E. Platacis, A. Ziks. Mercury loop for EURISOL Target models investigation. Joint EURISOL – EURONS Town Meeting. Helsinki. 17 – 19. September 2007.
5. G. Bunga, K. Kravalis. Elektromagnētisko indukcijas sūkņu ar pastāvīgajiem magnētiem darba parametru izmaiņas paaugstinātās darba temperatūrās. Rīgas Tehniskās Universitātes 48. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 12. oktobris 2007.
6. K. Kravalis, G. Bunga. Elektromagnētiskā indukcijas sūkņa ar pastāvīgiem magnētiem spiediena-ražības raksturlīknes analīze. Rīgas Tehniskās Universitātes 49. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 13 – 15. oktobris 2008.
7. C. Kharoua, L. Blumenfeld, Y. Kadi, K. Kravalis, E. Platacis et.al. Detection of cavitations occurrences with a laser Doppler vibrometers. EURISOL DS Final Town Meeting. Pisa, Italy. 29. March – 2. April 2009.
8. K. Kravalis, E. Platacis, A. Ziks, C. Kharoua, Y. Kadi. Towards Transverse Windowless target. EURISOL DS Final Town Meeting. Pisa, Italy. 29. March – 2. April 2009.
9. K. Kravalis, G. Bunga. I. Buceniēks Šķidru metālu sūkņēšanas tehnoloģijas analīze. Rīgas Tehniskās Universitātes 51. starptautiskā zinātniskā konference. Rīga. 11 - 15. oktobris 2010.
10. I. Buceniēks, K. Kravalis. Efficiency of EM Inducton Permanent Magnets Pumps. 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. Borgo, France, .5. – 9. September 2011.
11. I. Buceniēks, K. Kravalis R. Krishbergs. Pressure – Flowrate Characteristics of the Pumps with Permanent Magnets. 8th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD. Borgo, France. 05. – 09. September 2011.

## Publikācijas

Par veikto pētījumu izstrādi un rezultātiem ir publicēti septiņi zinātniskie raksti:

1. K. Kravalis. Magnetohydrodynamics and the influence of the magnetic field on various mediums// Rīgas Tehniskās Universitātes zinātniskie raksti. 6. Sēr., Mašīnzinātne un transports. - 14. Sēj. (2004), 62 - 64. lpp.
2. K. Kravalis, G. Bunga Elektromagnētisko sūkņu ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem salīdzinājums ar pārējiem elektromagnētisko sūkņu veidiem// Rīgas Tehniskās Universitātes zinātniskie raksti. 6. Sēr., Mašīnzinātne un transports. 19. Sēj. (2005), 50 - 54 lpp.
3. Bucenijs I., Krisbergs R., Kravalis K. e.t.c. Magnetic field distribution in the rotor of permanent magnets// Proceedings of the Joint 15th Riga and 6th pamir International Conference of Fundamental and Applied MHD, June 27 – July 1 2005. - Riga: IPUL, 2005. - pp 73 – 76.
4. Bucenijs I., Kravalis K. Characteristics of Disks type electromagnetic Induction Permanent Magnet Pump// Proceedings of the 7th pamir Conference on Fundamental and Applied MHD, September 8 – 12, 2008. Giens, France: INP, 2008. – pp 93 – 96.
5. Lielpēters P., Kravalis K., Torims T. Analysis of Positive-displacement Hydraulic System in Power Plane// World Academy of Science, Engineering and Technology: zin raksti. – Oslo: WASET, 2009.- [Vol. 55.], pp 724-732.
6. I. Bucenijs, K.Kravalis. Efficiency of EM induction pumps with permanent magnets // Magnetohydrodynamics. - 2011 – Vol. 47. pp. 89 – 97.
7. I. Bucenijs, K.Kravalis R.Krishbergs. Pressure – flow rate characteristics of the pumps with permanent magnets// Magnetohydrodynamics. - 2011 – Vol. 47. pp. 97 – 105.

## Promocijas darba apjoms un struktūras apraksts

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā. Promocijas darbs sastāv no 4 nodaļām un tā apjoms ir 134 lappuses, kurās ietverti 70 attēli, 7 tabulas un 4 pielikumi. Literatūras sarakstā ir 61 nosaukums.

# PROMOCIJAS DARBA SATURS

## Ievads

Darba ievadā aplūkota izvēlētās tēmas aktualitāte, darba mērķis, pētāmā problēma un izklāstīti darba uzdevumi. Sniegts īss pētījumu metodikas apraksts, aplūkota zinātniskā novitāte un galvenie pētījumu rezultāti, praktiskais pielietojums un darbā aizstāvētais.

## 1. nodaļa. ELEKTROMAGNĒTISKO SŪKŅU PIELIETOŠANAS IESPĒJAS ŠĶIDRO METĀLU TEHNOLOĢIJĀS UN ESOŠIE PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅU APRĒĶINA MODEĻI

Šajā nodaļā aplūkots šķidru metālu sūkņēšanas tehnoloģiju pielietojums, vēsturiskā attīstība un eksistējošā metodika pastāvīgo magnētu sūkņu aprēķinam. Jānorāda, ka šīs tehnoloģijas mūsdienās ir ļoti svarīgas, jo metālus šķidrā agregātstāvoklī sāk pielietot arvien plašāk. Kā galveno pētāmo problēmu definēsim šķidra metāla plūsmas nodrošināšanu. Galvenie metāla sūkņēšanas parametri ir attīstāmais spiediens  $p$  un ražība  $Q$ . Šajā darbā aplūkots kā šķidra metāla plūsmu nodrošina ar sūkņiem, šajā gadījumā ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem. Kā galveno uzdevumu izvirza pastāvīgo magnetu sūkņu efektivitātes palielināšanu. To var veikt uzlabojot sūkņa magnētiskās sistēmas īpašības. Metālu sūkņēšana ir kompleksa problēma, jo metālu sūkņēšanas īpatnības ir atkarīgas no sūkņējamā metāla īpašībām. Pielietošanas sfēras un mērķi ir visai atšķirīgi, tādēļ katru reizi rūpīgi jāizvēlas attiecīgā sūkņa un kontūra konstrukcija un pielietojamie materiāli. Galvenās pielietošanas sfēras ir ātomenerģētika, metalurģija un eksperimentālās iekārtas. Sūkņa kanāls parasti izgatavots no nerūsošā tērauda un tas nosaka sūkņējamo metālu klāstu. Tie ir sārnu metāli (Na, K, Li) un to eitektikas un smagie metāli (Hg, Pb) un to eitektikas, kā arī citi metāli kuru temperatūra šķidrā agregātstāvoklī un materiālu savietojamības īpašības pieļauj kanāla materiālam pielietot nerūsošo tēraudu. Šajā nodaļā aplūkoti galvenie sūkņa konstrukciju nosakošie parametri un apsvērumi.

Nodaļas otrajā daļā aplūkoti literatūrā dotie galveno PM sūkņu magnētiskā lauka sadalījuma un izejas parametru aprēķina pamatmetodika. Sniegta dažāda metodika negatīvo platuma, biezuma, gala efektu aprēķinam, kas ne vienmēr dod precīzus rezultātus. Literatūras

avotos apskatīti tikai nedaudzi elektromagnētisko indukcijas sūkņu ar rotējošiem pastāvīgiem magnētiem izgatavošanas piemēri. Tikai nedaudzus gadījumos minēta aprēķinu metodika.

Japānā esošajā JSNS neitronu atšķelšanas ierīcē protonu mērķa dzesēšanai ar dzīvsudrabu tiek lietots cilindrisks rotējošu PM sūknis ar piedziņas jaudu 90 kW. H.Kogavas un autoru kolektīva rakstā [12] tiek aplūkota siltuma zudumu atkarība no kanāla sienas biezuma un magnētiskās sistēmas rotācijas ātruma. Tiek aplūkots arī elektromagnētiskā spiediena sadalījums pa kanāla biezumu un atpakaļplūsmu rašanās. Tika veikti sūkņa spiediena – ražības raksturlielumu mērījumi, un konstatēts zems vibrāciju līmenis, salīdzinot ar mehānisko zobratu sūkni.

Aprēķinu metodika aprakstīta T.Kalniņa un līdzautoru darbos [7 – 11]. Šeit atrodama aprēķinu metodika sūkņiem ar kustīgiem pastāvīgajiem magnētiem. Pamatā aplūkoti cilindriskie sūkņi. Sniegtas rekomendācijas negatīvo efektu ievērošanai nepieciešamo aprēķinu veikšanai, analizētas vairākas konstrukcijas.

I.Bucenieka darbos [1 – 5] aplūkoti diskveida indukcijas sūkņi ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem, to konstrukcijas īpatnības un pielietošanas iespējas. Uzsvērtas grūtības sūkņa izejas parametru aprēķinā un sūkņa magnētiskās sistēmas radītās magnētiskā lauka indukcijas skaitliskā novērtēšanā.

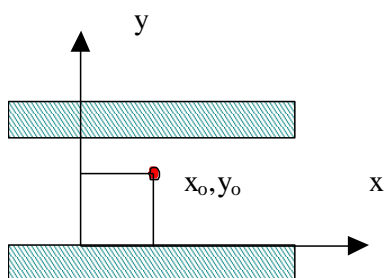
Literatūras avotos nav atrodami aprēķinu modeļi diskveida sūkņu aprēķinam. Ir pieejama vispārēja aprēķinu teorija pastāvīgu magnētu mašīnu aprēķinam. Tā neļauj pietiekami precīzi aprēķināt magnētiskās sistēmas radīto magnētisko indukciju, kas rezultējas nepietiekami precīzā sūkņa izejas parametru aprēķinā. Tādēļ ir jārada aprēķinu modelis, kas ņem vērā tieši diskveida sūkņa ģeometriju.

**Sūkņa attīstītā spiediena aprēķina shēma.** Parasti elektromagnētisko spiedienu, ko attīsta sūknis, kā mašīnās ar neizteiktiem poliem, tā arī mašīnās ar izteiktiem poliem izsaka veidā  $p_e = p_o k_{oc} k_b k_\mu k_p$ ,  $p_o = \sigma \tau s f L_{kan} B_\delta^2$ , kur koeficientus, kas raksturo dažādu faktoru ietekmi uz sūkņa attīstīto spiedienu, aprēķina un analizē ar dažādas sarežģītības matemātiskās fizikas uzdevumu risinājumiem vai empīriskiem koeficientiem [14]. Ideāla sūkņa radītais spiediens -  $p_o$ ,  $B_\delta$  - magnētiskā lauka indukcija gaisa spraugā,  $L_{kan}$  – kanāla garums,  $f$  – frekvence,  $s$  – slīde,  $\tau$  - pola solis,  $\sigma$  - šķidrā metāla vadāmība. Koeficienti nosaka attiecīgi:  $k_{oc}$  – kanāla platuma iespaidu,  $k_b$  - kanāla biezuma iespaidu,  $k_\mu$  - magnētvasda piesātinājuma iespaidu,  $k_p$  –magnētvasda garuma iespaidu,  $k_\theta$ - kanāla slīpuma attiecībā pret magnētiskā lauka skriešanas virzienu iespaidu, ja gaisa spraugā ir vītņveidīgi novietoti vairāki kanāli (ja  $\theta \leq 30^\circ$ , tad  $k_\theta = \cos(\theta)$ ). Šādu koeficientu var būt arī vairāk, kad problēmu kopumā nav iespējams

atrisināt, bet katrs koeficients ņem vērā kādu atsevišķu efektu. Kā redzams, tad magnētiskā indukcija šajā formulā ir otrajā pakāpē un šim parametram ir ievērojama ietekme uz sūkņa parametriem.

**Pašreizējās PM magnētisko lauku aprēķinu metodes.** Sīkāk aplūkosim magnēta aizvietošana ar ekvivalentām punktveida strāvām. Aprēķina metode pamatojas uz taisnstūra paralēlskaldņa veida magnētu aizvietošanu ar ekvivalentu lineāras strāvas blīvuma slāni vai ekvivalentu strāvu summu [18]. Tādēļ jāzin magnētiskais lauks, ko rada punktveida strāva gaisā, punktveida strāva virs feromagnētiskas plāksnes ar magnētisko vadāmību  $\mu=\infty$  - m, punktveida strāva starp divām feromagnētiskām plāksnēm ar  $\mu=\infty$ . Plāksnes ir bezgalīgas platumā un garumā, magnētu relatīvā magnētiskā konstante  $\mu_{rpm}=1$ .

Tā, ka formulas ir pa pusei empīriskas, aprēķinos rodas ievērojama datu izkliede. Lai veiktu precīzākus aprēķinus nepieciešams radīt precīzāku aprēķinu metodiku.



### 1.1. att. Punktveida strāva starp divām feromagnētiskām plāksnēm

Punktveida strāvas magnētisko lauku aprēķina ar Maksvela vienādojumiem. Pielietojot spoguļattēla teoriju šajā gadījumā, ir jāņem vērā, ka lauks atspoguļojas periodiski augšējā un apakšējā plāksnē, tāpēc tiek aprēķināta spoguļattēlu summa. Rezultātā iegūstam izteiksmes 1.1 un 1.2:

$$B_{x12p}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{4d} \left( \frac{\sin \frac{\pi(y - y_0)}{d}}{\cosh \frac{\pi(x - x_0)}{d} - \cos \frac{\pi(y - y_0)}{d}} + \frac{\sin \frac{\pi(y + y_0)}{d}}{\cosh \frac{\pi(x - x_0)}{d} - \cos \frac{\pi(y + y_0)}{d}} \right) \quad (1.1)$$

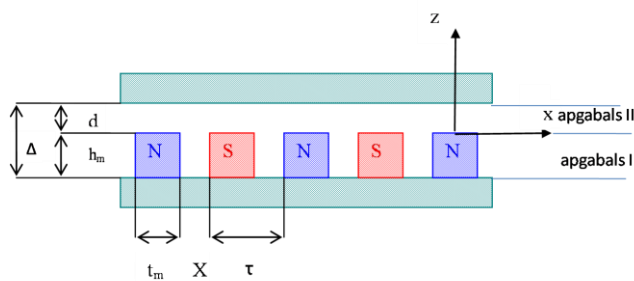
$$B_{y12p}(x, y) = \frac{\mu_0 I}{4d} \left( \frac{\sinh \frac{\pi(x - x_0)}{d}}{\cosh \frac{\pi(x - x_0)}{d} - \cos \frac{\pi(y - y_0)}{d}} + \frac{\sinh \frac{\pi(x + x_0)}{d}}{\cosh \frac{\pi(x - x_0)}{d} - \cos \frac{\pi(y + y_0)}{d}} \right), \quad (1.2)$$

kur  $d$  – attālums starp feromagnētiskajām plāksnēm,  $I$  – punktveida strāva,  $\mu_0$  – magnētiskā vadāmība spraugā starp feromagnētiskajām plāksnēm.

## 2. nodaļa. PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅU MAGNĒTISKĀS INDUKCIJAS SADALĪJUMA APRĒĶINA MODEĻU IZVEIDE

Šajā nodaļā aplūkots diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas sadalījuma aprēķina modelis un ar modeļa palīdzību veikta magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma analīze diskveida pastāvīgo magnētu sūknim.

### 2.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas sadalījuma aprēķina modelis



2.1.att. Diskveida PM sūkņa magnētiskā lauka sadalījuma aktīvajā zonā aprēķina modelis

Attālums starp magnētiem ir  $X$ , pola solis  $\tau$ , attālums no magnēta virsmas līdz jūgam (gaisa sprauga) ir  $d$ , magnēta augstums  $h_m$ , magnēta platumš  $t_m$ , tad  $X = \tau - t_m$ . Attālums starp diviem ferromagnētiskajiem jūgiem ir  $\Delta$ .

Meklēsīm risinājumu divos apgabalos I un II. Apgabalā I atrodas PM, apgabalā II atrodas kanāls ar šķidro metālu. Abi apgabali ir norobežoti no augšas un apakšas ar ferromagnētiskiem jūgiem, kam elektriskā vadāmība  $\sigma = 0$  un magnētiskā konstante  $\mu = \infty$ . Mums ir vajadzīgs risinājums apgabalā I, risinājums apgabalā II ir vajadzīgs, lai apmierinātu robežnoteikumus. Pieņem, ka magnētizēšanas vektors  $M$  visiem magnētiem ir vienāds un homogēns.

$$B_z = \frac{4M_o}{\tau} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin(\alpha_m \frac{t_m}{2}) \sinh(\alpha_m h_m)}{\alpha_m \sinh(\alpha_m \Delta)} \cosh(\alpha_m (z - \Delta + h_m)) \cos(\alpha_m x), \quad (2.1)$$

kur  $\alpha_m = \frac{\pi}{\tau}(2n-1)$ .

Pārveidosim izteiksmi, izmantojot izteiksmi (2.2):

$$\cosh(\alpha_m z - \alpha_m(\Delta - h_m)) = \cosh(\alpha_m(\Delta - h_m))\cosh(\alpha_m z) - \sinh(\alpha_m(\Delta - h_m))\sinh(\alpha_m z), \quad (2.2)$$

kas dod v ienādojumus (2.3), (2.4) un (2.5):

$$B_{om} = \frac{4M_o}{\tau} \frac{\sin(\alpha_m \frac{t_m}{2})}{\alpha_m} \frac{\sinh(\alpha_m h_m)}{\sinh(\alpha_m \Delta)}; \quad (2.3)$$

$$B_{cm} = B_{om} \cosh(\alpha_m(\Delta - h_m)), \quad B_{sm} = B_{om} \sinh(\alpha_m(\Delta - h_m)); \quad (2.4)$$

$$B_z(x, z) = \sum_{m=1}^{\infty} (B_{cm} \cosh(\alpha_m z) - B_{sm} \sinh(\alpha_m z)) \cos(\alpha_m x). \quad (2.5)$$

Iegūto izteiksmi (2.5) izmantosim, lai analizētu aktīvās zonas parametru ietekmi uz magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā.

## 2.2. Magnētiskā lauka indukcijas sadalījuma analīze diskveida pastāvīgo magnētu sūknim

Šajā apakšnodaļā ar izstrādāto modeli analizēsime aktīvās zonas parametru ietekmi uz indukcijas sadalījumu uz pola virsmas. Apskatīsim, kā indukcijas sadalījumu iespaido pola solis  $\tau$ , magnētu augstums  $h_m$ , magnētu platumu  $t_m$ , gaisa sprauga starp magnētu virsmu un feromagnētisko jūgu  $d$ . Galvenos aprēķinus veiksime attālumā no polu virsmas  $z=d/2$ , jo tas ir gaisa spraugas viduspunkts un tur atrodas šķidrā metāla slānis.

Novērtēsime līknes formas ietekmi uz magnētiskā lauka spektrālo sadalījumu.

Izstrādātajā modelī ir četri parametri, kas nosaka aktīvās zonas ģeometriju – pola solis  $\tau$ , gaisa sprauga  $d$ , magnēta augstums  $h_m$ , magnēta platumu  $t_m$ . Pāriesime uz bezizmēra mainīgajiem, kas ļaus samazināt parametru skaitu līdz trijiem. Ievēdīsim mainīgos  $t_m^* = t_m/\tau$ ,  $h_m^* = h_m/\tau$  un  $d^* = d/\tau$ . Pieņēmot  $\alpha_n = \pi(2n-1)$ , iegūsim vienādojumus (2.6), (2.7), (2.8) un (2.9):

$$B_{on} = 4Br \frac{\sin(0.5\alpha_n t_m^*)}{\alpha_n} \frac{\sinh(\alpha_n h_m^*)}{\sinh(\alpha_n (d^* + h_m^*))}; \quad (2.6)$$

$$B_{cn} = B_{on} \cosh(\alpha_n d^*); \quad (2.7)$$

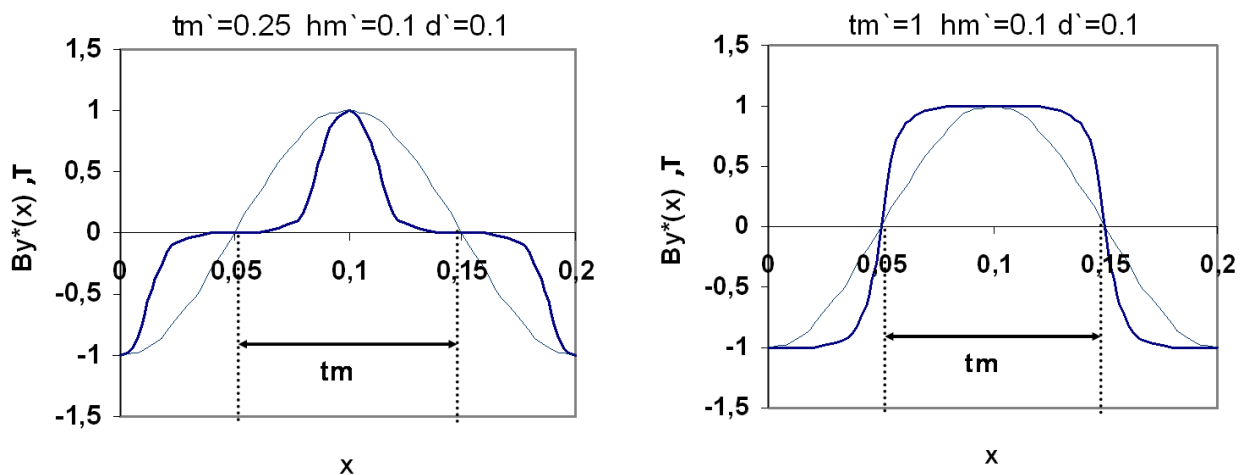
$$B_{sn} = B_{on} \sinh(\alpha_n d^*); \quad (2.8)$$

$$B_z = \sum_{n=1}^N (B_c \cosh(\alpha_n z^*) - B_s \sinh(\alpha_n z^*)) \cos(\alpha_n x^*), \quad (2.9)$$

kur koordinātas  $x^* = x/\tau$  un  $z^* = z/\tau$ . Fizikāli jābūt  $t_m^* \leq 1$ , jo magnēta platums nevar būt lielāks par pola soli.

Apskatīsim gadījumu, kad  $h_m^* = 0.1$  un  $d^* = 0.1$ . Mainīsim magnēta platuma attiecību pret pola soli ir svarīgs parametrs un tiks mainīts robežās no  $t_m^* = 0.25$  līdz  $t_m^* = 1$ .

**Magnētiskā lauka indukcijas sadalījums pa kanāla platumu.** Apskatīsim kvalitatīvi dažādu magnētiskās sistēmas izmēru ietekmi uz magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā. Zīmējumos 2.2 un 2.3 ir attēlots indukcijas sadalījums pa magnēta platumu (koordināta  $x'$ ) atkarībā no attāluma no magnēta virsmas gaisa spraugā (koordināta  $z'$ ) pie dažādiem magnētu augstumiem  $h_m'$ , magnēta platumiem  $t_m'$  un gaisa spraugas biezumiem  $d'$ .



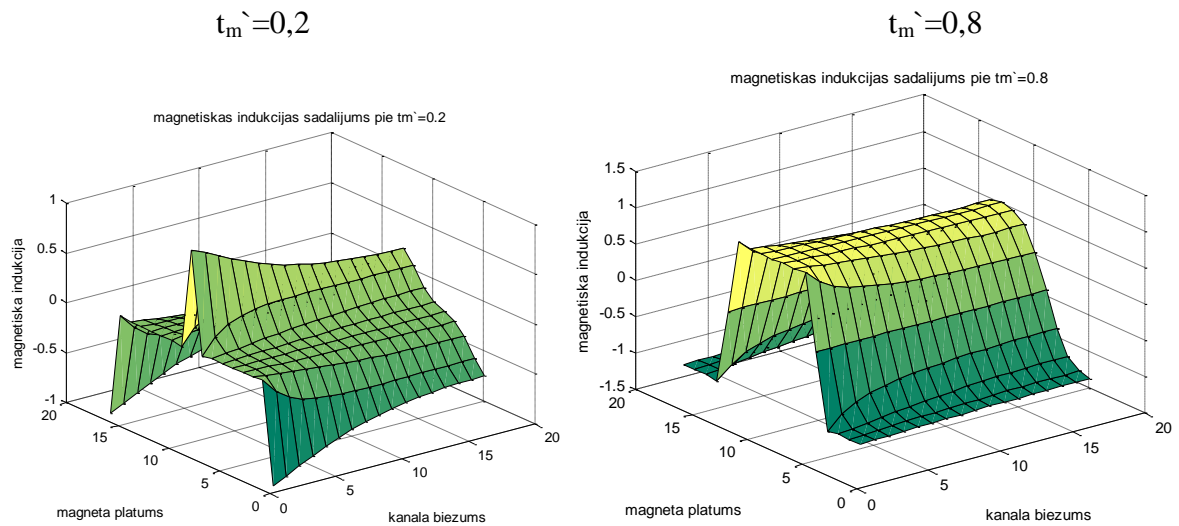
2.2.att. Magnētiskā lauka sadalījums diskveida PM sūkņa gaisa spraugā atkarībā no magnēta platuma – gaiši zilā līkne – ideālais sadalījums, tumši zilā līkne – matemātiskā modeļa dati

Aprēķinu sērija ir pie  $h_m' = 0.2$ ,  $d' = 0.2$ ,  $t_m' = 0.2$  un  $0.8$  – 2.2 attēls. Redzams, ka magnētu platuma attiecība pret pola soli stipri iespaido lauka sadalījuma formu pa magnēta platumu.

Magnētu augstuma attiecība pret pola soli un gaisa spraugas attiecība pret pola soli maz iespaido lauka sadalījuma formu pa magnēta platumu.

**Magnētiskā lauka sadalījums pa kanāla biezumu.** Apskatīsim kvalitatīvi dažādu magnētiskās sistēmas izmēru ietekmi uz magnētiskās indukcijas sadalījumu gaisa spraugā. Zīmējumos ir attēlots indukcijas sadalījums pa magnēta platumu (koordināta  $x'$ ) atkarībā no

attāluma no magnēta virsmas gaisa spraugā (koordināta  $z'$ ) pie dažādiem magnētu augstumiem  $h_m'$ , magnēta platumiem  $t_m'$  un gaisa spraugas biežumiem  $d'$ .



2.3. att. Magnētiskā lauka sadalījums teslās diskveida PM sūkņa gaisa spraugā pie dažādām magnēta platumu attiecībām pret pola soli  $t_m = 0,2$  un  $0,8$

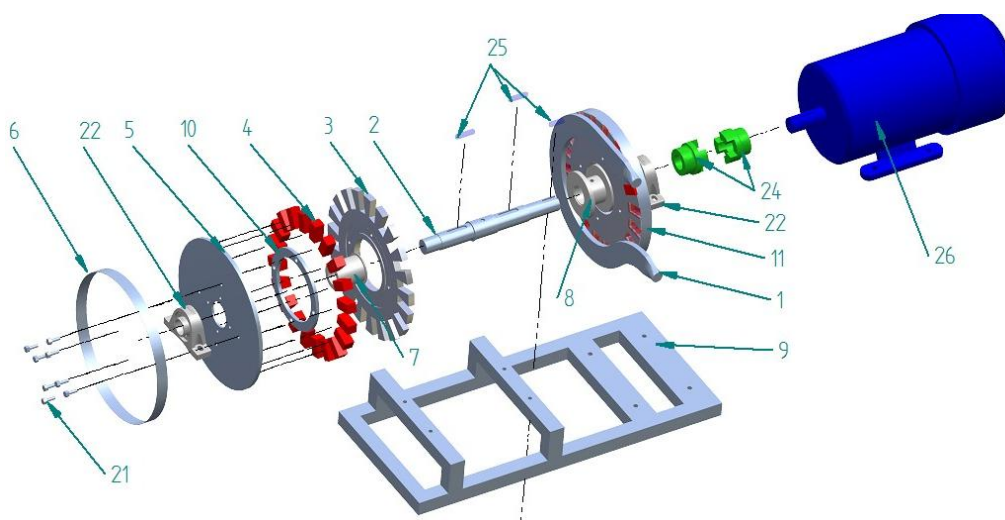
Aprēķinu sērija ir pie  $h_m' = 0,2$ ,  $d' = 0,2$ ,  $t_m' = 0,2$  un  $0,8$ , kas redzama 2.3 attēlā. Redzams, ka magnētu platumu attiecība pret pola soli stipri iespaido lauka sadalījuma formu pa magnēta platumu. Magnēta tuvumā redzami magnētiskā lauka formas kropļojumi, attālinoties no magnēta virsmas kropļojumi samazinās.

### 3. nodaļa. DISKVEIDA PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅA EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Šajā nodaļā aprakstīta diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa ar pastāvīgiem rotējošiem magnētiem izgatavošana, eksperimentālās iekārtas tā parametru mērījumiem apraksts, magnētiskās indukcijas sadalījuma mērījumi un spiediena - ražības raksturlīkņu uzņemšana.

#### 3.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa ar pastāvīgiem rotējošiem magnētiem izgatavošana

Lai pārbaudītu aprēķinu modeļa pareizību nepieciešams izgatavot diskveida PM sūkni un pārbaudīt tā raksturlielumus. Sūkņa pārbaudei nepieciešams uzņemt tā spiediena – ražības ( $p - Q$ ) raksturlīknes un izmērīt sūkni piedzenošā elektromotora jaudas parametrus.



3.1. att. Diskveida indukcijas sūkņa konstrukcija

Diskveida indukcijas sūkņa konstrukciju veidojošās detaļas aplūkojamas 3.1. attēlā. Sūknis sastāv no kanāla 1 gar kuru rotē uz ass 2 novietoti magnētu bloki 11. Sūkņa kanāls ir metināta konstrukcija, kas parasti sastāv no divām sānu malām un iekšējās sienas un ārējās sienas. Kanālam ir taisnstūra forma. Iekšējā un ārējā siena parasti ir biežākas par sānu sienām. Kanāls ir izliekts pusloka formā. Sūkņa kanāla šķērsriezums – 10 x 54 mm, kanāla sienas biezums 3 mm, Pie kanāla taisnstūra daļas piemetināti difuzori – konfuzori, kas nodrošina pāreju uz kontūra caurules diametru. Konfuzoru/difuzoru uzdevums ir nodrošināt laidenu pāreju ar minimālu hidraulisko pretestību. Pie konfuzoriem reizēm piemetināti atloki. Atbildīgu konstrukciju gadījumā atlokus nelieto un kanālu uzreiz metina pie kontūra.

Uz ass izvietotajiem magnētu blokiem ir šāda konstrukcija – uz diskveida feromagnētiskas konstrukciju tērauda pamatnes 5 izvieto magnētus 4 (vai magnētu blokus) ar poliem vērstiem uz kanāla pusi un polu orientācija mainās pamīšus pēc principa S – N – S – N – S. Magnētu veida izvēli nosaka darba temperatūra. Ja magnētu darba temperatūra nepārsnieds 120°C, tad lieto neodīma – bora magnētus, bet ja darba temperatūra ir augstāka – tad pielieto somārija – kobalta magnētus.

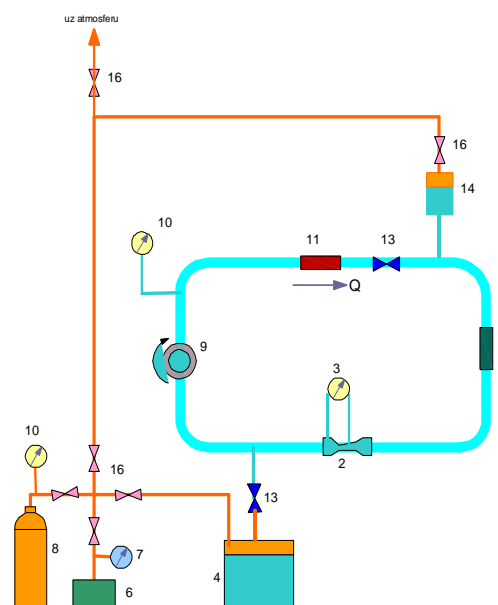
Rotējošā diska diametrs – 302 mm. Magnētiskās sistēmas ārējais diametrs – 300 mm, Magnētu bloku skaits – 16, bloku izmēri – 20 x 30 x 60 mm. Katrā blokā 4 pastāvīgie magnēti. Pastāvīgo magnētu ražotājs Universal Magnetech Co, marka YXG – 26M. Polu skaits vienmēr ir pāra skaitlis, lai magnētiskā lauka līnijas varētu noslēgties sūkņa aktīvajā daļā.

### 3.2. Eksperimentālās iekārtas pastāvīgo magnētu sūkņa parametru mērījumiem izveidošana

Lai varētu nomērīt izgatavotā PM sūkņa raksturlielumus tika izgatavots eksperimentāls *InGaSn* kontūrs. Eksperimenti tika veikti uz šķidrā metāla kontūra.



3.2. att. Eksperimentālais *InGaSn* kontūrs elektromagnētiskā indukcijas sūkņa ar rotējošiem PM pārbaudei



3.3. att. Eksperimentālā kontūra shēma

Kontūra darba vide – *InGaSn* eitektika, (metālu proporcijas pēc svara procentos: *In*–20.5; *Ga* – 67; *Sn* – 12.5). Kušanas temperatūra –  $10.5 \pm 0.1$  °C. Eksperimenta gaitā Reinoldsa skaitlis mainījās no 0 līdz  $4 \cdot 10^5$ , bet magnētiskais Reinoldsa skaitlis  $\varepsilon$  robežās no 0.02 līdz 0.6. *InGaSn* eitektikas siltumietilpība pie 20°C – 428,651 J/kg\*°C. Eitektikas izplešanās koeficients sacietējot – 1.38% no tilpuma. Eitektika nav sprādzienbīstama, ir ugunsdroša un nav toksiska [13].

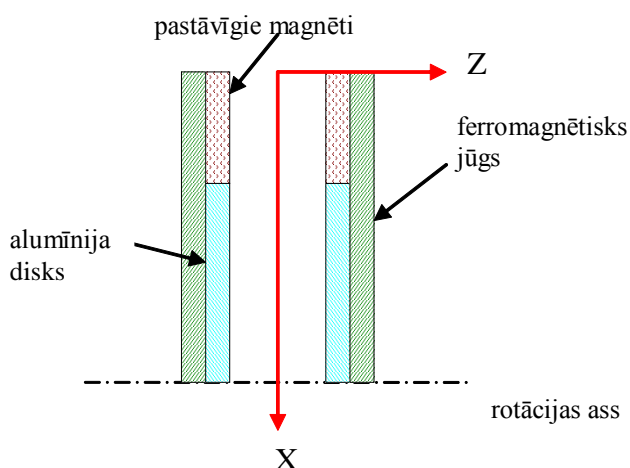
Kontūrs parādīts 3.2. attēlā un tā principiālā shēma attēlota 3.3. attēlā, kur redzamas kontūra galvenās sastāvdaļas:

- 1 - elektromagnētiskais indukcijas sūkņis ar rotējošiem pastāvīgiem magnētiem 9;
  - 2 – diferenciālmanometrs 10 sūkņa attīstītā spiediena mērīšanai;
  - 3 - tarēta Venturi caurule plūsmas ātruma un sūkņa ražības mērīšanai;
  - 4 - diferenciālmanometrs 3 spiedienu starpības Venturi caurulē mērīšanai;
  - 5 - regulējama hidrauliskā pretestība – lodveida vārsts 13 spiediena kritumu kontūrā regulēšanai;
  - 6 – šķidrā metāla tvertne 5 kontūra uzpildīšanai ar šķidro metālu un kontūra drenēšanai;
  - 7 - siltummaiņš 11 šķidrā metāla temperatūras regulēšanai.
- Siltummaiņa tips – šķidrā metāla – ūdens, konstruktīvais risinājums – caurule caurulē. Nemainīgs temperatūras režīms tiek uzturēts, ieregulējot atbilstošu ūdens plūsmu caur siltummaiņi. Siltummaiņa ārējais diametrs 100 mm.
- 8 - diferenciālmanometrs 10 sūkņa attīstītā spiediena mērīšanai;

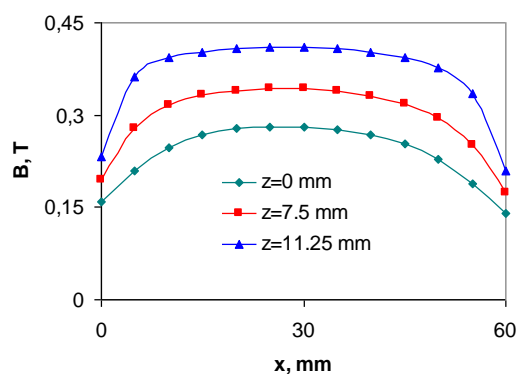
Kontūra cauruļu ārējais diametrs 38 mm, sienas biezums – 1.5 mm. Dažādi kontūra elementi savā starpā savienoti ar atlokiem, ko blīvē ar gumijas blīvēm. Kopējais kontūra garums – 5.2 m.

### **3.3. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas sadalījuma mērījumi**

Eksperimentālie lauka sadalījuma mērījumi veikti, lai iegūtu magnētiskā lauka indukcijas sadalījumu sūkņa kanāla zonā un to vēlāk salīdzinātu ar aprēķinu datiem. Mērījumi tika veikti ar gausmetru Lake Shore Model 475 Gaussmeter, kas aprīkots ar mērtaustu HMMT – 6J04 – VR. Gausmetra mērtausts novietots uz bīdāma tausta, ko pa *Y* asi virza ar mikrometra skrūves palīdzību. Mērījumu shēma parādīta 3.4 attēlā.



3.4. att. Magnētiskā lauka indukcijas mērījumi diskveida sūkņa aktīvajā zonā



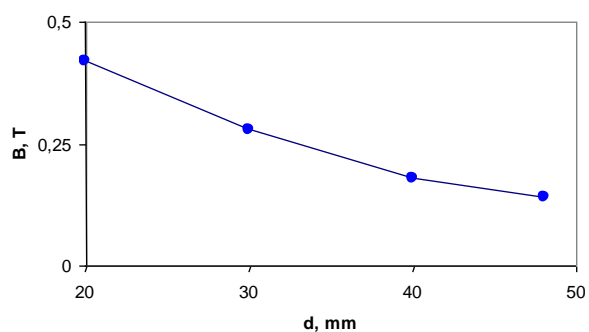
3.5. att. Magnētiskā lauka indukcijas normālās komponentes  $B_z(x)$  mērījumi, veikti dažādos attālos  $Z$  no pola virsmas<sup>o</sup>

$Z = 0$  mm;  $7.5$  mm;  $11.5$  mm,  $X=0$ ,  $Y=0$ ,  $d = 30$  mm

Mērījumu rezultāti pie attāluma starp diskiem  $d=30$  mm redzami 3.5 attēlā. Kā redzams, palielinoties attālumam starp diskiem magnētiskā indukcija samazinās. Tuvojoties magnēta virsmai, tā proporcionāli pieaug. Turklāt, tuvojoties magnētu virsmai un pārvietojoties pa  $X$  asi magnētiskā lauka indukcija pieaug straujāk nekā esot lielākā attālumā no pastāvīgā magnēta virsmas.

Veiktie mērījumi uzskatāmi parāda to, cik svarīgs ir magnētu bloku atstatums. Tas ir ārkārtīgi svarīgi sūkņa konstrukcijas pareizai izvēlei, sūkņa kanāla konstruēšanai un sūkņa izejas raksturlielumu aprēķinam.

Pēc iegūtajiem datiem varam noteikt vidējās magnētiskā lauka indukcijas vērtības atkarību no attāluma starp magnētu blokiem. Tā grafiski attēlota 3.6 attēlā.



3.6. att. Magnētiskā lauka indukcijas vidējās vērtības atkarība no magnētu bloku attāluma diskveida sūkņa aktīvajā zonā

Attālumam starp sūkņa diskiem  $d$  palielinoties no 20 līdz 30 mm, magnētiskā indukcija  $B$  samazinās par 0.14 B, t. i. par 1/3. Tālāk palielinot attālumu starp magnētu

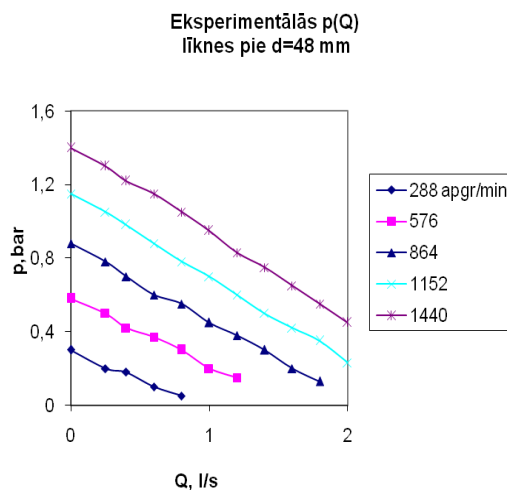
blokiem, magnētiskā lauka indukcijas samazināšanās temps nekrītas. Turpmāk novērosim, ka sūkņa spiediena atkarība no magnētiskās indukcija  $B$  ir kvadrātiska, tā, ka tās ietekmi grūti pārvērtēt. Tādēļ šķidrā metāls ir pēc iespējas jāpietuvina magnētiem. Kanāla sienām jābūt pēc iespējas plānām, ievērojot stiprības nosacījumus. Nepieciešams samazināt atstatumu starp magnētiem un kanāla sienām. Augstu temperatūru gadījumā nepieciešams veikt magnētu dzesēšanu vai aizsargāt tos ar siltumu atstarojošiem ekrāniem vai pārklājumiem. Ja nav iespējams neviens no šiem variantiem, tad palielina atstatumus starp magnētiem un kanālu (nemagnētisko spraugu), kas neizbēgami samazina sūkņa efektivitāti.

### **3.4. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa spiediena - ražības raksturliķņu uzņemšana**

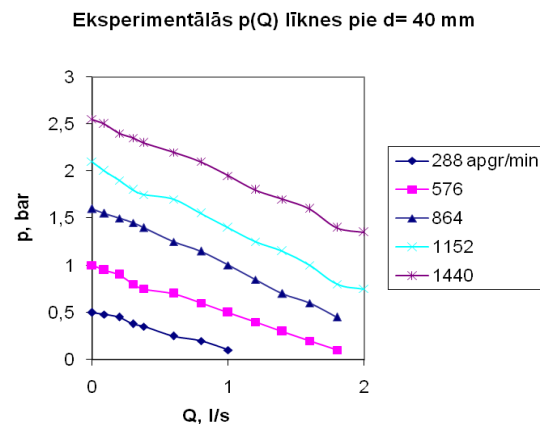
Ar iepriekšējā nodaļā aprakstītās eksperimentālās iekārtas palīdzību tika veikti izgatavotā diskveida PM sūkņa  $p(Q)$  raksturliķņu mērījumi. Pēc tam tika apkopoti mērījumu rezultāti un veikta to apstrāde, lai salīdzinātu tās ar teorētiski iegūtajām. Mērījumi tika veikti ar diferenciālmanometriem, kas pievienoti spiediena mērīšanas vietām sūkņa ieejā un izejā tā attīstītā spiediena mērīšanai un Venturi ātruma mērītāja izejām. Veicot mērījumus tika mainīts attālums starp magnētu blokiem no 48 līdz 30 mm un magnētu bloku rotācijas frekvence no 288 līdz 1440 apgr/min.

Sūkņa attīstītā spiediena  $p$  un ražības  $Q$  mērījumi tika veikti, lai novērtētu abus galvenos sūkņa raksturliķņus un to savstarpējo atkarību. Šie parametri nosaka sūkņa izmantošanas iespējas, nepieciešamos drošības pasākumus, ļauj novērtēt sūkņa efektivitāti un izvēlēties pārējās kontūra hidrauliskās un mehāniskās komponentes.

Sūkņa ražību ar attīstīto spiedienu saista cieša sakarība. Jo lielāku spiedienu attīsta sūknis, jo mazāka tā ražība. To var formulēt arī šādi – jo lielāka ir pārējā šķidrā metāla kontūra hidrauliskā pretestība, jo mazāka ir sūkņa ražība pie nemainīgiem sūkņa konstruktīvajiem parametriem. Mērījumu procesa gaitā tika mainīts attālums  $d$  starp sūkņa magnētu blokiem, lai novērtētu šī parametra ietekmi uz spiediena – ražības parametriem.



3.7 att. Eksperimentāli iegūtās  $p(Q)$  līknes pie attāluma starp magnētu blokiem  $d=48$  mm un dažāda rotācijas ātruma

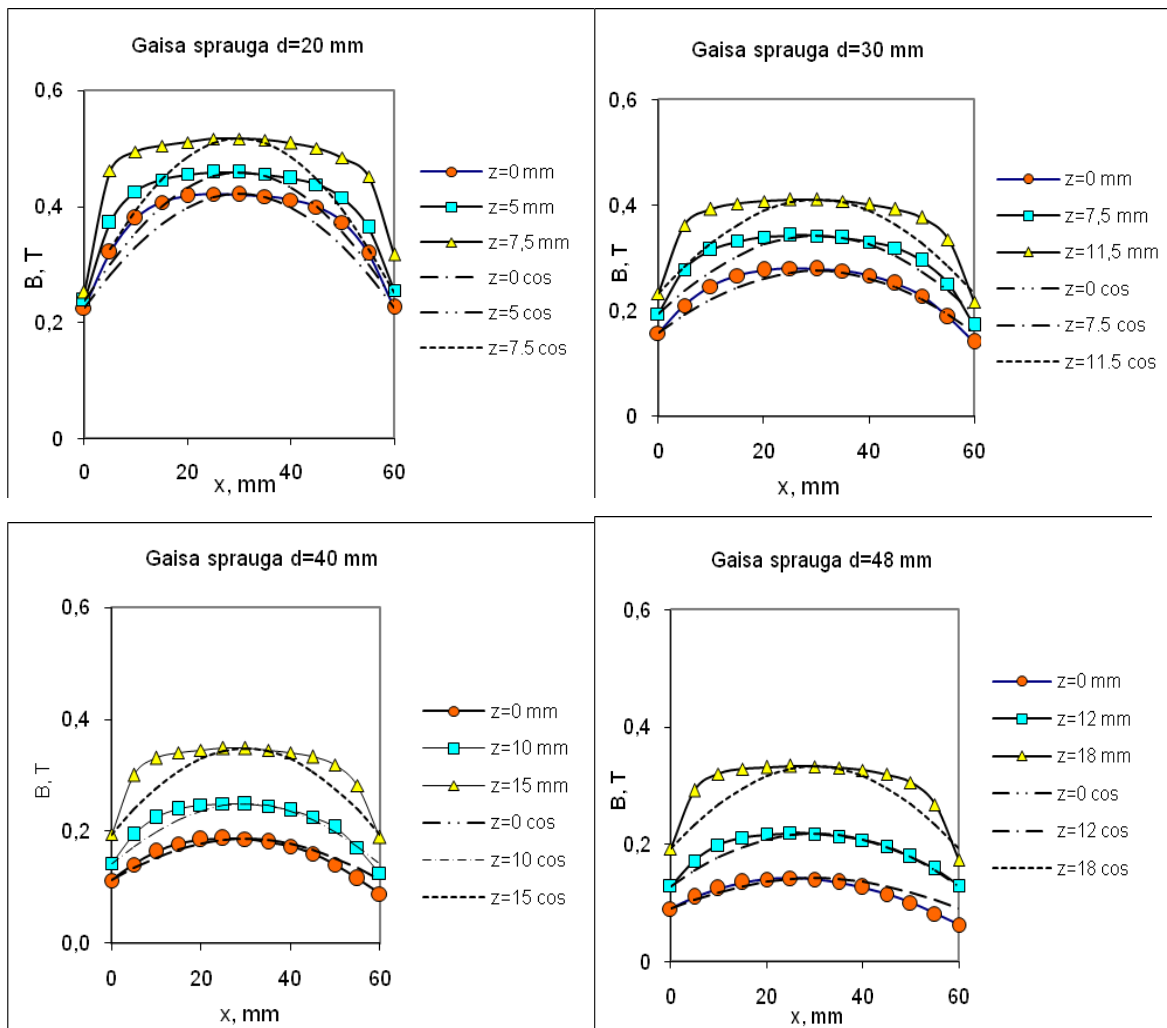


3.8 att. Eksperimentāli iegūtās  $p(Q)$  līknes pie attāluma starp magnētu blokiem  $d=40$  mm un dažāda rotācijas ātruma

Kā ievērojām iepriekšējās nodaļās, tad, palielinoties attālumam starp sūkņa pastāvīgo magnētu blokiem, ievērojami samazinās magnētiskā lauka indukcija sūkņa aktīvajā daļā, kur tiek izvietots kanāls ar šķidro metālu.

## 4. nodaļa. APRĒĶINU UN MĒRĪJUMU REZULTĀTU SALĪDZINĀJUMS

### 4.1. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās indukcijas mērījumu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem



4.1. att. Magnētiska lauka normālās komponentes sadalījumu pa magnēta garumu salīdzinājums pie dažādām gaisa spraugām  $d=20, 30, 40, 48$  mm dažādos attālos no magnēta virsmas

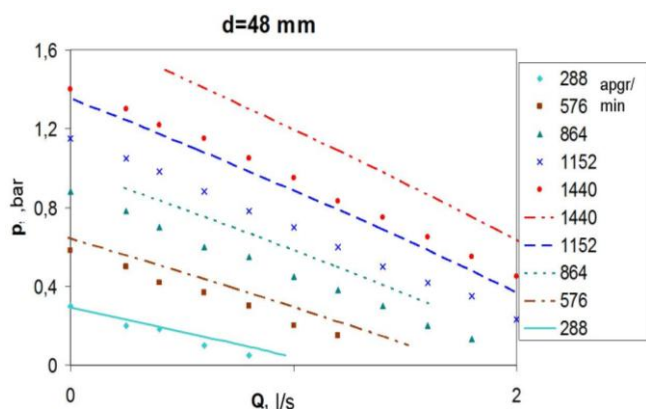
(ar pārtrauktām līnijām salīdzināšanai ir parādīts indukcijas sadalījums pēc  $\cos$  likuma, ar krāsainiem punktiem parādīti mērījumu rezultāti)

Lai novērtētu magnētiskā lauka indukcijas aprēķina modeli tiek veikta eksperimentāli nomērīto datu salīdzināšana ar aprēķinu modeļa datiem. Saskaņā ar veiktajiem mērījumiem

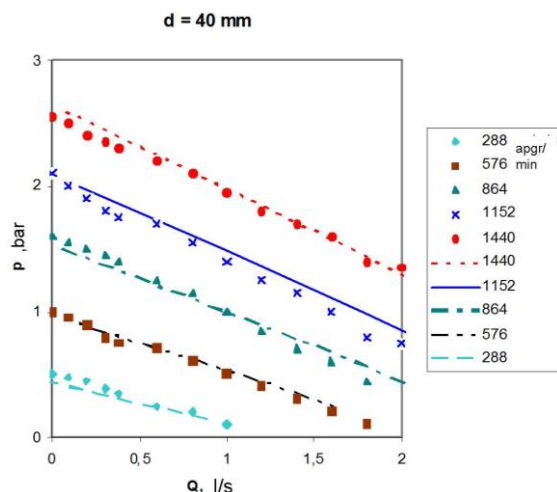
esam ieguvuši magnētiskā lauka indukcijas vērtību profilu (karti), kas redzama 4.1 attēlā. Gan mērījumu, gan aprēķinu rezultāti parāda tendenci magnētiskajam laukam samazināties palielinoties atstatumam  $d$  starp magnētu blokiem. Magnētiskā lauka vērtība magnēta vidusdaļā krītas no 0.41 T pie attāluma  $d = 20$  mm, līdz 0.13 T pie  $d = 48$  mm izdarot mērījumus tieši vidū starp abiem magnētu blokiem ( $z = 0$ ). Salīdzinot mērījumu rezultātus ar aprēķiniem redzam ka aprēķinu rezultāti labāk apraksta mērījumus tieši magnēta vidusdaļā un pie  $z = 0$  – tur atšķirība starp mērījumu un aprēķinu rezultātiem nepārsniedz 3 %. Magnēta malās dati vairāk atšķiras – līdz pat 17%. Tuvojoties magnēta virsmai atšķirība starp mērījumu un aprēķinu rezultātiem pieaug – līdz pat 28 % pie  $d = 20$  un  $z = 7.5$  mm (16.5 mm no magnēta virsmas). Palielinot attālumu starp magnētu blokiem sakritība starp mērījumu rezultātiem pieaug. Pie  $z = 0$  un  $d = 48$  mm magnēta vidusdaļā atšķirība nepārsniedz 1.5 %, tuvojoties malām atšķirība pieaug līdz 4 %. Nesimetriska aina vērojama magnētu nevienmērīgās magnetizācijas dēļ. Virzoties tuvāk magnēta virsmai atšķirība magnēta malās starp aprēķinu un mērījumu rezultātiem pieaug līdz pat 12%. Tā, ka kanāls izvietots magnēta vidusdaļā un šķidrā metāla slānis atrodas zināmā attālumā no magnēta virsmas, kur atšķirības starp aprēķinu un mērījumu rezultātiem nav pārāk lielas (ne vairāk par 7%), tad var teikt, ka aprēķinu modelis pietiekami labi apraksta magnētiskās indukcijas sadalījumu šķidrā metāla zonā un ir pielietojams sūkņaizejas parametru aprēķinam.

#### **4.2. Diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa spiediena – ražības raksturliķņu mērījumu rezultātu salīdzinājums ar aprēķinu rezultātiem un ātruma sadalījuma sūkņa kanālā analīze**

Tiek salīdzināti spiediena ražības aprēķinu un mērījumu rezultāti pie dažādiem attālumiem starp magnētu blokiem un dažādām to rotācijas frekvencēm. Pirmā mērījumu sērija tika veikta pie magnētu bloku atstatuma 48 mm. Iegūtās raksturliķnes apskatāmas 4.2. attēlā. Mērījumu rezultāti attēloti ar krāsainiem punktiem, aprēķinātās sakarības attēlotas kā līknes. Kā redzam mērījumu rezultātu sakarība ir lineāra.



4.2. att.  $p(Q)$  līknes pie  $d = 48$  mm un dažādiem diska rotācijas ātrumiem:  $n=1440, 1152, 864, 576$  un  $288$  apgr/min

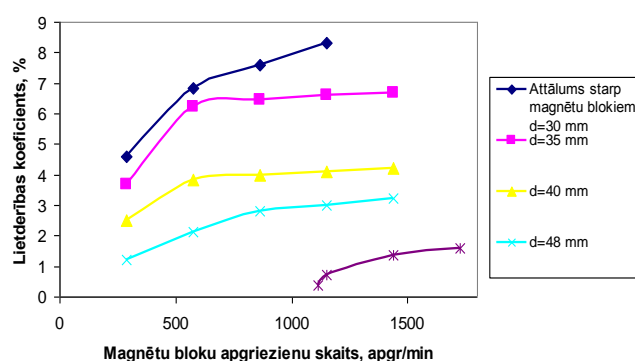


4.3. att. Raksturlīknes pie  $d=40$  mm un dažādiem diska rotācijas ātrumiem:  $n=1440, 1152, 864, 576$  un  $288$  apgr/min

Salīdzinot mērījumu rezultātus ar aprēķinu rezultātiem varam novērot, ka aprēķinu rezultātu līknes visā  $p - Q$  diapazonā pietiekami labi sakrīt ar mērījumu rezultātu punktiem. Lielākā atšķirība nepārsniedz 15.2%. Tas izskaidrojams ar to, ka aprēķinu modelī tiek pieņemts nemainīgs polu solis, kas sūknī ir mainīgs pa sūkņa diametru, jo pastāvīgie magnēti ir izvietoti radiāli.

Aprēķinu rezultātu atšķirība no eksperimentu rezultātiem sasniedz 8,2 % pie sūkņa attīstītā maksimālā spiediena.

Tādējādi var secināt, ka aprēķinu modelis labāk apraksta sūkņa parametrus pie mazākiem attālumiem starp magnētu blokiem. Lai izvērtētu eksperimentālā modeļa ietekmi uz sūkņa lietderības koeficientu tas tika salīdzināts ar citu diskveida sūkni. Salīdzināšanai izvēlēts diskveida sūknis InGaSn eitektikas parsūknēšanai pie 300°C temperatūras. Tā magnetu bloku ārējais diametrs ir 300 mm, polu pāru skaits – 6, bet magnētu

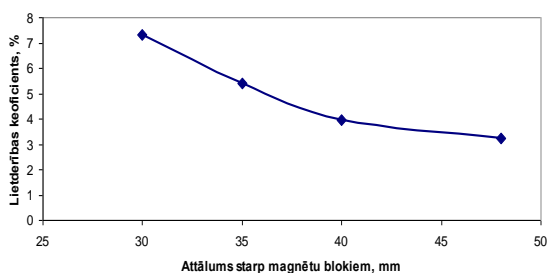


4.4. att. Lietderības koeficienta atkarība no sūkņa magnētu bloku apgriezību skaita un attāluma starp tiem, salīdzināti ar augsttemperatūras sūkņa lietderības koeficientu

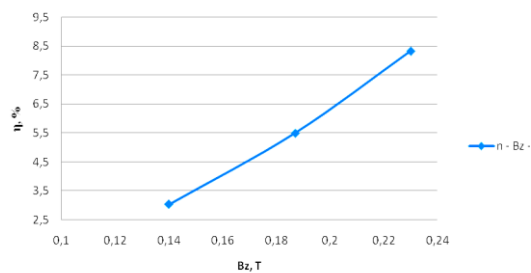
izmēri ir 15 x 60 x 10 mm. Magnētu indukcijas vērtība ir tāda pati, kā darbā aplūkotajam sūkņim. Kanāla iekšējais šķērsgriezums ir 60 x 10 mm. Sūkņi salīdzinājumam izvēlēti līdzīgo parametru dēļ. Attālums starp magnētu blokiem šim sūkņim – 46 mm.

Attēlā 4.4. redzama lietderības koeficienta atkarība no sūkņa magnētiskās sistēmas apgriezienu skaita minūtē pie dažādiem attālumiem starp magnētu blokiem. Šeit redzams, ka sūkņa lietderības koeficients pieaug palielinoties apgriezienu skaitam un samazinoties attālumam starp magnetu blokiem. Redzams, ka samazinot attālumu starp magnetu blokiem no 48 līdz 30 mm lietderības koeficients pieaudzis trīs reizes. Salīdzinot šos datus ar citu sūkni, kas arī sūknē InGaSn eitektiku, redzam, ka pie līdzīga attāluma starp magnētu blokiem (48 un 46 mm) sūkņa, kura magnētiskās sistēmas parametri aprēķināti ar darbā iegūtā matemātiska modeļa palīdzību, lietderības koeficients ir trīs reizes augstāks.

Tas ļauj secināt, ka sūkņa magnētiskās sistēmas parametru pamatota izvēle ļauj palielināt sūkņa lietderības koeficientu un uzlabot tā izejas parametrus – attīstīto spiedienu un ražību. Attēlā 4.5. redzama lietderības koeficienta atkarība no attāluma starp magnetu blokiem. Redzams, ka palielinoties attālumam starp magnētu blokiem lietderības koeficients samazinās. Tādēļ jāievēro minimālais iespējamais attālums starp magnētu blokiem. Tas uzstāda īpašas prasības sūkņa kanāla izgatavošanai un siltumizolācijas materiāliem, ja tādi tiek lietoti.



4.5. att. Lietderības koeficienta atkarība no attāluma starp magnētu blokiem



4.6. att. Sūkņa lietderības koeficienta atkarība no magnētiskā lauka indukcijas vērtības normālās komponentes Bz

Attēlā 4.6. attēlota sakarība starp magnētiskā lauka indukcijas vērtības normālo komponenti Bz un sūkņa lietderības koeficientu. Redzams, ka pieaugot magnētiskajai indukcijai lietderības koeficients pieaug. Tas vēlreiz uzsver magnētiskā lauka vērtības ievērojamo ietekmi uz sūkņa lietderības koeficientu un izejas parametriem.

## SECINĀJUMI

1. Darba gaitā izstrādāts diskveida pastāvīgo magnētu sūkņa magnētiskās sistēmas radītās magnētiskās indukcijas aprēķina modelis. Ar izstrādātā matemātiskā modeļa palīdzību tika novērots, ka, palielinot sūkņa aktīvās zonas augstumu, magnētiskā lauka indukcija tajā samazinās. Palielinot magnētu polu platumu, augstumu vai polu soli magnētiskā lauka indukcija sākotnēji strauji pieaug, taču, turpinot tālāk palielināt šos parametrus, pieauguma tempi krītas un tiek sasniegts zināms „piesātinājums”. Šiem konstruktīvajiem parametriem ir pietiekama ietekme uz magnētisko lauku sūkņa aktīvajā zonā, taču ir rūpīgi jāsabalansē optimizācijas parametri un jāievēro visas konstruktīvās prasības, lai sūknis atbilstu nepieciešamajiem izejas parametriem un ierobežojumiem, un tā konstrukcija būtu saprātīga un harmoniska. Izgatavojamajam sūknim izvēlēts pastāvīgā magnēta augstums 20 mm, platums 20 mm un vidējais polu solis 26 mm.

2. Veikts sūkņa izejas parametru – spiediena un ražības aprēķins izmantojot literatūrā [9] aplūkoto modeli. Aprēķini veikti pie dažādiem attālumiem starp magnētu blokiem (30, 40 un 48 mm) un pie dažādiem magnētu bloku rotācijas ātrumiem. Novērota lineāra regresija – kontūra hidrauliskajai pretestībai pieaugot samazinās sūkņa ražība. Pieaugot sūkņa magnētu bloku rotācijas ātrumam palielinās sūkņa attīstītais spiediens un ražība. Šķidrā metāla ātruma sadalījuma aprēķins sūkņa kanālā veikts pie magnētu bloku attāluma 40 mm un rotācijas ātruma 1440 apgr/min. Novērots, ka pie neliela pretspiediena šķidrums sūkņa kanālā kustas padeves virzienā, bet pretspiedienam pieaugot sākas atpakaļ plūsmas, kas pazemina sūkņa ražību.

3. Izgatavots diskveida pastāvīgo magnētu sūknis. Veikti sūkņa magnētiskās sistēmas magnētiskā lauka indukcijas mērījumi, kas parādīja, ka magnētiskā lauka indukcija, izmainot attālumu starp magnētu blokiem no 20 līdz 48 mm, pieaug 3 reizes. Tas ļauj secināt, ka pielietojot sūkni augstās darba temperatūrās, siltumizolācijas un siltumu atstarojošu ekrānu lietošana, var ievērojami samazināt sūkņa izejas raksturlielumus.

4. Izgatavota eksperimentāla iekārta sūkņa spiediena – ražības raksturlielumu mērīšanai. Veikti sūkņa spiediena – ražības mērījumi pie dažādiem magnetu bloku attālumiem un rotācijas ātrumiem. Novērots, ka samazinot magnētu bloku attālumu no 48 līdz 20 mm sūkņa attīstītais spiediens pieaug vairāk kā 7 reizes. Tajā pat laikā magnētiskā lauka indukcija, samazinot attālumu starp magnētu blokiem no 48 līdz 20 mm, palielinājās 3 reizes. Tas ļauj

runāt par kvadrātisku sakarību starp spiediena raksturlielumiem un magnētiskās indukcijas vērtību, kas sakrīt ar teorijas datiem.

5. Veikts ar matemātiskā modeļa palīdzību aprēķināto magnētiskās indukcijas vērtību salīdzinājums ar mērījumu rezultātiem. Gan mērījumu, gan aprēķinu rezultāti parāda tendenci magnētiskajam laukam samazināties palielinoties atstatumam  $d$  starp magnētu blokiem. Izstrādātais matemātiskais modelis labi apraksta magnētiskā lauka indukciju gar magnēta virsmu magnēta vidusdaļā, gar magnēta malām dati vairāk atšķiras.

Salīdzinot mērījumu rezultātus ar aprēķinu rezultātiem varam novērot, ka aprēķinu rezultātu līknes visā  $p - Q$  diapazonā pietiekami labi sakrīt ar mērījumu rezultātu punktiem. Lielākā atšķirība nepārsniedz 15.2%. Tas izskaidrojams ar to, ka aprēķinu modelī tiek pieņemts nemainīgs polu solis, kas sūknī ir mainīgs pa sūkņa diametru, jo pastāvīgie magnēti ir izvietoti radiāli.

Pielietojot iegūtos datus izejas parametru – spiediena – ražības aprēķinam izdodas iegūt labu sakrītību ar eksperimenta datiem, kas ļauj secināt, ka šī modeļa pielietošana aprēķinos ir lietderīga. Aprēķinu modelis labāk apraksta sūkņa parametrus pie mazākiem attālumiem starp magnētu blokiem.

Salīdzinot sūkņa magnētiskās sistēmas magnētiskā lauka indukcijas un paša sūkņa spiediena ražības mērījumus, tika novērota sakarība starp magnētiskā lauka indukcijas vērtībām un sūkņa izejas parametriem. Salīdzinot maksimālo sūkņa attīstīto spiedienu visā apgriezīgu diapazonā pie dažādiem attālumiem starp magnētu blokiem, magnētiskā lauka indukcija, samazinot attālumu starp magnētu blokiem no 48 līdz 20 mm, palielinājās 3 reizes. Turpretī maksimālais sūkņa attīstītais spiediens, samazinot attālumu starp magnētu blokiem no 48 līdz 20 mm, pieauga vairāk kā 7 reizes. Tas ļauj runāt par ievērojamu magnētiskā lauka indukcijas ietekmi uz sūkņa attīstīto spiedienu. Šī sakarība tuvojas kvadrātiskai, kas visumā sakrīt ar teorijas datiem.

Salīdzinot darbā aplūkoto sūkni ar agrāk izgatavotu diskveida PM sūkni redzams, ka magnētiskās sistēmas parametru sabalansēšana ļauj palielināt sūkņa lietderības koeficientu. Tāpat arī lietderības koeficients ir atkarīgs no sūkņa magnētu bloku apgriezīgu skaita un attāluma starp magnētu blokiem. Samazinot attālumu starp magnētu blokiem no 48 līdz 30 mm, var palielināt sūkņa lietderības koeficientu gandrīz divas reizes. Jāizvēlas piemērots sūkņa darba režīms, lai sūknis strādātu lielāka lietderības koeficienta diapazonā.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Bucenieks I. E., Sukhovich E. P. Scherbinin E. V. Centrifugal pump basing on rotating permanent magnets// *Магнитная гидродинамика*. - 2000 – Vol. 36. – p. 189 – 196.
2. Bucenieks I. E. High pressure and high flowrate induction pumps with permanent magnets// *Magnetohydrodynamics*. - 2003.- Vol 39. – pp. 411 – 417.
3. Bucenieks I. Perspectives of using rotating permanent magnets for electromagnetic induction pump design// *Magnetohydrodynamics*. -2000 - Vol. 36. – pp.181-187.
4. Bucenieks I. Perspectives of increasing efficiency and productivity of electromagnetic induction pumps for mercury basing on permanent magnets// *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Conference of Nuclear Engineering*. - Miami, Florida, USA, 2006. - pp 55-61.
5. Bucenieks I., Freibergs J., Platācis E. Evaluation Parameters of Powerfull Electromagnetic Induction Pumps on Permanent Magnets for Heavy Liquid Metals// *IV International Workshop on Materials for HLM-cooled Reactors and Related Technologies*. Roma, Italy, 2007. - pp 1-23.
6. Gailītis A., Lielausis O. Internal hydraulics of magnetohydrodynamic machines with a nonhomogeneous distribution of the forces// *Magnetohydrodynamics*. - 1971.- Vol. 2. - pp. 249-253.
7. Kalnin T.K., Petrovica R.A., Priednieks E.V. Pressure head and electrical losses in the liquid in salient-pole induction pumps// *Magnetohydrodynamics*. - 1965. - Vol. 1.- pp. 91 – 98.
8. Kalnin T.K., Priednieks E.V. Determination of the electromagnetic head in salient-pole induction pumps with allowance for the thickness fringe effect// *Magnetohydrodynamics*. - 1967. - Vol. 3. - pp. 137 – 141.
9. Kalnin T.K., Petrovica R.A., Priednieks E.V. The thick edge effect in non-salient-pole magnetic rotor induction pumps// *Magnetohydrodynamics*. - 1970. - Vol. 6. - pp. 121 – 126.
10. Kalnin T.K., Petrovica R.A., Priednieks E.V. Pressure head and electrical losses in the liquid in salient-pole induction pumps// *Magnetohydrodynamics*. - 1965. - Vol. 1. - pp. 91 – 98.
11. Kalnin T.K., Petrovica R.A., Priednieks E.V. Study of salient-pole MHD pump with permanent magnets// *Magnetohydrodynamics*, 1970. - Vol. 6. - pp. 144 – 145.
12. Kogawa H., Haga K., et. al. Development on mercury pump for JSNS// *Elsiever, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. - 2009. - A600. - pp 97–99.
13. Бочкарев Э. П. Технологическая инструкция по эксплуатации сплава Галлий – Индий – Олово в жидкометаллических контурах. Москва: Гиредмет, 1977. - 57 с
14. Калнинь Т.К. Явнополюсные МГД-насосы. Рига: Зинатне, 1969. - 171 с.
15. Копылова И.П. Проектирование электрических машин. Москва: Энергия, 1980. - 495 с.
16. Постников П.И. Проектирование электрических машин. Киев: Изд. Техн. Лит. УССР, 1960. - 910 с.

17. Пятина Ю.М. Постоянные магниты. Москва: Энергия, - 1980. - 480 с.
18. *Vacuumschmelze* / Downloads / Vacodum 776 AP/TP / [Elektroniskais resurss] / *Vacuumschmelze*, 2003. -  
<http://www.vacuumschmelze.de/fileadmin/documents/broschueren/dmbrosch/vd776.pdf> -  
Resurss apraksts - 2006.12.06.