

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Būvniecības fakultāte
Siltuma, Gāzes un Ūdens Tehnoloģijas institūts

Deniss PIĻŠČIKOVŠ

Doktora studiju programmas „Siltuma, gāzes un ūdens tehnoloģija” doktorants

**ENERGOEFEKTIVITĀTES ANALĪZE MAINĪGA ĀTRUMA SŪKŅU
DARBĪBAS OPTIMIZĀCIJAI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. ing., profesors
E.DZELZĪTIS

RTU Izdevniecība
Rīga 2014

UDK 621.671(043.2)
Pi 511 e

Piļščikovs D. Energoefektivitātes analīze mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai. Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2014. - 28 lpp.

Iespiests saskaņā ar Promocijas padomes RTU P12 2014.gada 24.janvāra lēmumu, protokols Nr. 1/14.



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

ISBN 978-9934-10-521-0

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014.gada 28. februārī, plkst. 14:00, Rīgas Tehniskās universitātes Būvniecības fakultātes 250.auditorijā, Āzenes ielā 16/20.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.sc.ing. Boriss Gjunsburgs
Rīgas Tehniskā Universitāte

Profesors, Dr.habil.phys. Juris Ekmanis
Latvijas Zinātņu Akadēmija / Fizikālās enerģētikas institūts

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Andris Šnīders
Latvijas Lauksaimniecības 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.

Deniss Piļščikovs(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, 4 nodaļas, secinājumus, pielikumus, literatūras sarakstu, 74 attēlus un 25 tabulas, kopā 115 lappuses. Literatūras sarakstā ir 126 nosaukumi.

ANOTĀCIJA

Piļščikovs D. Energoefektivitātes analīze mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai: promocijas darbs inženierzinātņu doktora (Dr.inž.) zinātniskā grāda iegūšanai, Rīga, RTU, 2014. Kopējais darba apjoms ir 4 nodaļas, 115 lpp, 25 tabulas, 74 attēli. Promocijas darbā ir izmantoti 126 informācijas avoti.

Vairāk nekā 10% no pasaulē kopējās saražotas elektriskās enerģijas tiek patērēti centrālās sūkņu sistēmās, un ap 60% no tiem var tikt ietaupīti. Atkarībā no hidrauliskās sistēmas tipa un centrālās sūkņu pielietojuma, ir iespējams definēt virkni ar kritērijiem, kuri ir jāņem vērā realizējot mainīga sūkņu darbības optimizāciju.

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt energoefektivitātes analīzes kritērijus mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti uzdevumi:

- Izpētīt mainīga ātruma centrālās sūkņu konstrukcijas un ekspluatācijas aspektus.
- Statistiski noteikt un eksperimentāli pārbaudīt mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes uzlabošanas potenciālu izmantojot sūkņu proporcionālā spiediena vadību konstanta spiediena vadības vietā.
- Aprēķināt statistisko ūdens zudumu samazinājuma potenciālu izmantojot proporcionālā spiediena sūkņu vadību konstanta spiediena vadības vietā.
- Veikt statistisko analīzi un eksperimentāli pārbaudīt mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta izmaiņas vērtību atkarībā no darba punkta novirzes no sūkņa nominālās celšanas augstuma vērtības.
- Statistiski definēt un eksperimentāli pārbaudīt lietderības koeficientu augstākās efektivitātes punktā līnijas daudzpakāpju, gala iesūces vienpakāpes un līnijas vienpakāpes centrālās sūkņiem ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Izstrādātus energoefektivitātes analīzes kritērijus ir iespējams izmantot ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās kā:

- Rekomendācijas projektētājiem izvēloties centrālās sūkņu tehnoloģiju aprēķinātam darba punktam.
- Sākotnējā novērtēšana plānojot energoefektivitātes palielināšanas aktivitātes: sūkņu sistēmu audits, sūkņu sistēmu rekonstrukcija, ūdens zudumu samazināšana.
- Mācību līdzekli tehniskajās mācību iestādēs pētīt centrālās sūkņu un/vai kopējās sistēmas energoefektivitātes jautājumus.

Darba rezultāti ziņoti 7 starptautiskās konferencēs un tie atsoguļoti 10 publikācijās.

SATURA RĀDĪTĀJS

Ievads.....	5
1. Mainīga ātruma centrālās sūkņu tehnoloģijas un vadības metodes izvēle centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās	7
2. Sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju izstrāde.....	12
3. Energoefektivitātes analīzes kritēriju eksperimentālā pārbaude	20
4. Sūkņu proporcionālā spiediena vadības metodes pielietojuma ekonomiskā analīze	24
Secinājumi	25
Publikācijas.....	27

IEVADS

Darba aktualitāte

Palielinoties enerģijas ražošanas izmaksām visā pasaulē, arvien lielāka uzmanība tiek pievērsta tieši energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumiem. Vairāk nekā 10% no pasaulē kopējās saražotas elektriskās enerģijas tiek patērēti centrālās sūkņu sistēmās, un ap 60% no tiem var tikt ietaupīti. Pasaulē 2009. gadā tika patērētas ap 16.8 PWh elektroenerģijas un ap 6% no tām var tikt ietaupīti izmantojot mainīga ātruma sūkņu tehnoloģiju ar pareizām sūkņu vadības metodēm.

Kopā ar elektroenerģijas ietaupījumu var samazināt arī esošos vispārējus ūdens zudumus tīklos. Centralizētajās ūdensapgādes sistēmās attīstības valstīs visā pasaulē vispārējie ūdens zudumi sastāda vairāk par 45 miljoniem m³/dienā, kas būtu pietiekami, lai nodrošinātu ar ūdeni ap 200 miljonus cilvēku. Latvijā vien 2005. gadā centralizētajās ūdensapgādes sistēmās ūdens zudumu līmenis bija 24% no patērētā ūdens apjoma jeb 6906 tūkstoši m³.

Latvijas zinātnieki: E. Dzelzītis, B. Gjonsburgs, Ē. Tilgalis, V. Lediņš, R. Neilands, D. Turlajs, A. Šnīders, D. Rusovs, K. Siļķe, V. Skārds, R. Trops, A. Mežs u.c. iepriekš pētījuši jautājumus, kas ir saistīti ar sūkņu tipiem, to izvēli un pielietojumu, kā arī teorētiskām vadības metodēm. Ārzemju zinātnieki: B. Leznovs, A. Marchi, D. Kaya, K. Yigit, N. Mehzad, Khin Cho Thin, De Paola, A. Moreno, P. Planells, Zhenjun Ma u.c. padziļināti pētījuši mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijas jautājumus, kā arī spiediena un noplūdes mijiedarbību.

Atkarībā no hidrauliskās sistēmas tipa un centrālās sūkņu pielietojuma, ir iespējams definēt virkni ar inženiertehniskiem kritērijiem, kuri ir jāņem vērā realizējot mainīga ātruma sūkņu darbības optimizāciju.

Starp šiem kritērijiem ir šādi: mainīga ātruma centrālās sūkņu proporcionālā spiediena vadības metodes izmantošana konstanta spiediena (diferencspiediena) vadības metodes vietā; darba punkta izvietojums un to novirze no mainīga ātruma centrālās sūkņu augstākās efektivitātes punkta celšanas augstuma; centrālās sūkņu konstrukcijas tipi.

Ir svarīgi izvēlēties sūkņu tehnoloģijas risinājumu ar augstu lietderības koeficientu, kā arī izmantot mainīga ātruma sūkņu vadības metodi fokusējoties uz sistēmas energoefektivitātes rādītāju uzlabošanu centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās. Taču pasaulē joprojām netiek pievērsta atbilstoša uzmanība sūkņu konstrukcijas un vadības metodes izvēlei, kā arī darba punkta izvietojumam.

Darba mērķis un uzdevumi

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt energoefektivitātes analīzes kritērijus mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

- Izpētīt mainīga ātruma centrālās sūkņu konstrukcijas un ekspluatācijas aspektus.
- Statistiski noteikt un eksperimentāli pārbaudīt mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes uzlabošanas potenciālu izmantojot sūkņu proporcionālā spiediena vadību konstanta (diferenciālā) spiediena vadības vietā.
- Aprēķināt statistisko ūdens zudumu samazinājuma potenciālu izmantojot proporcionālā spiediena vadību konstanta (diferenciālā) spiediena vadības vietā.
- Veikt statistisko analīzi un eksperimentāli pārbaudīt mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta izmaiņas vērtību atkarībā no darba punkta novirzes no sūkņa nominālās celšanas augstuma vērtības.
- Statistiski definēt un eksperimentāli pārbaudīt lietderības koeficienta vērtību augstākās efektivitātes punktā līnijas daudzpakāpju un gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņiem centralizētajās ūdensapgādes sistēmās, un līnijas un gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņiem centralizētajās siltumapgādes sistēmās.

Zinātniskā novitāte

Tika izstrādāti energoefektivitātes analīzes kritēriji mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

- Iegūta matemātiskā sakarība starp sūkņu proporcionālā spiediena vadības pielietošanu konstanta spiediena vadības vietā un mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes uzlabošanu (patērētās enerģijas/ūdens zudumu samazinājums).

- Iegūta matemātiskā sakarība starp mainīga ātruma sūkņu lietderības koeficienta izmaiņu un darba punkta novirzi no sūkņu nominālā celšanas augstuma.
- Iegūts maksimālo lietderības koeficientu salīdzinājums līnijas daudzpakāpju un gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņu centralizētajās ūdensapgādes sistēmās ($Q_{nom}=10\div 140$ m³/h pie $H_{nom}=30\div 55$ m), kā arī līnijas un gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņu centralizētajās siltumapgādes sistēmās ($Q_{nom}=50\div 770$ m³/h pie $H_{nom}=10\div 60$ m).

Praktiskais pielietojums

Šos energoefektivitātes analīzes kritērijus ir iespējams izmantot kā:

- Rekomendācijas projektētājiem izvēloties centrālās sūkņu tehnoloģiju aprēķinātam darba punktam ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.
- Sūkņu darbības energoefektivitātes palielināšanas rekomendācijas esošās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās vai to atsevišķās daļās veicot projektēšanas vai rekonstrukcijas darbus.
- Mācību līdzeklis tehniskajās mācību iestādēs pētot centrālās sūkņu un/vai kop.sistēmas energoefektivitātes jautājumus.

Katrs kritērijs var tikt pielietots konkrētai inženiersistēmai vai tās daļai.

- Proporcionālā spiediena vadības metode konstanta spiediena vadības vietā:
 - Pirmā/otrā/trešā pacēluma sūkņi ūdensapgādes sistēmās.
 - Tikla sūkņi siltumapgādes sistēmās.
- Lietderības koeficienta izmaiņa atkarībā no darba punkta novirzes no augstākās efektivitātes punkta:
 - Plūsmas filtru sūkņi siltumapgādes sistēmās.
- Sūkņu konstrukciju lietderības koeficientu salīdzinājums augstākās efektivitātes punktos:
 - Pirmā/otrā pacēluma sūkņi darbībai uz torni ūdensapgādes sistēmās.
 - Filtru skalošanas sūkņi ūdensapgādes sistēmās.

1. MAINĪGA ĀTRUMA CENTRĀLĀS SŪKŅU TEHNOLOĢIJAS UN VADĪBAS METODES IZVĒLE ŪDENSAPGĀDES UN SILTUMAPGĀDES SISTĒMĀS

Pastāv virkne mainīga ātruma centrālās sūkņu vadības metožu:

- konstanta spiediena vadības metode,

- konstanta diferenciālā spiediena vadības metode,
- mērīta proporcionālā spiediena vadības metode,
- aprēķina proporcionālā spiediena vadības metode,
- konstantas līknes vadības metode u.c.

Ne vienmēr tiek pielietota energoefektīvākā sūkņu vadības metode attiecīgajā ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmā. Līdz ar to ir ļoti svarīgi veikt potenciālā enerģijas ietaupījuma novērtējumu inženiersistēmās, kurās šīs sūkņu vadības metodes tiek pielietotas.

Pastāv daudz centrālās sūkņu konstrukciju, kuras tiek izmantotas centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās:

- gala iesūces sūkņi: pārsūkņējais šķidrums kustas uz darba rata centru aksiālajā virzienā, taču izplūst no tā radiālajā virzienā;
- līnijasūkņi: pārsūkņējais šķidrums kustas caur sūkni vienā līnijā, tāpat sūkšanas īscaurule un spiešanas īscaurule ir izvietotas viena otrai pretim;
- horizontālie sūkņi: sūkņa vārpsta atrodas horizontālajā plāksnē;
- vertikālie sūkņi: sūkņa vārpsta atrodas vertikālajā plāksnē;
- vienpakāpes sūkņi: sūkņa konstrukcijā ietilpst viens darba rats;
- daudzpakāpju sūkņi: sūkņa konstrukcijā ietilpst vairākas darba rata pakāpes, kas ir savienoti virknes slēgumā u.c.

Centrālās sūkņi ir pieejami vairāku konstrukciju izpildījumā instalācijai ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās. Katra sūkņu konstrukcija tiek raksturota ar savām īpatnībām, priekšrocībām un trūkumiem, tādēļ ir ļoti svarīgi izvēlēties atbilstošo centrālās sūkņu konstrukciju attiecīgai inženiersistēmai.

Tika veikti vairāki pētījumi par konstanta un mainīga ātruma centrālās sūkņiem un to darbību. Starp centrālās sūkņu tehnoloģijas pētījumu virzieniem ir sekojoši:

- Mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes novērtēšana ūdensapgādes sistēmās fokusējoties uz lietderības koeficienta vērtībām pie dažādām slodzēm un samazinātiem apgriezieniem.
- Vairāku parametru reāli mērījumi sūkņu sistēmās un optimizācijas priekšlikumi konkrētai sūkņu sistēmai.
- Energoefektivitātes un sistēmas drošuma analīze izmantojot mainīga un konstanta ātruma sūkņu salīdzinājumu.
- Vienpakāpes gala iesūces centrālās sūkņu konstrukcijas un darbības analīze.
- Spiediena un ūdens noplūdes mijiedarbības analīze.

- Mainīga ātruma sūkņu vadības metožu teorētiskais pārskats.
- Dažādi sūkņu tipi, to pielietojums un aprēķini.

Šajā pētījumā tika apvienots aprēķinu modelis, kas balstās uz teorētiskajiem slodzes profiliem, ar praktiskajiem mērījumiem reālajos objektos; kā rezultātā tika piedāvāti energoefektivitātes analīzes kritēriji, kas varētu būt piemēroti mainīga ātruma centrālās sūkņu darbības optimizācijai ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Konstanta (diferenciālā) spiediena vadības metode tiek raksturota ar lielu enerģijas patēriņu ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

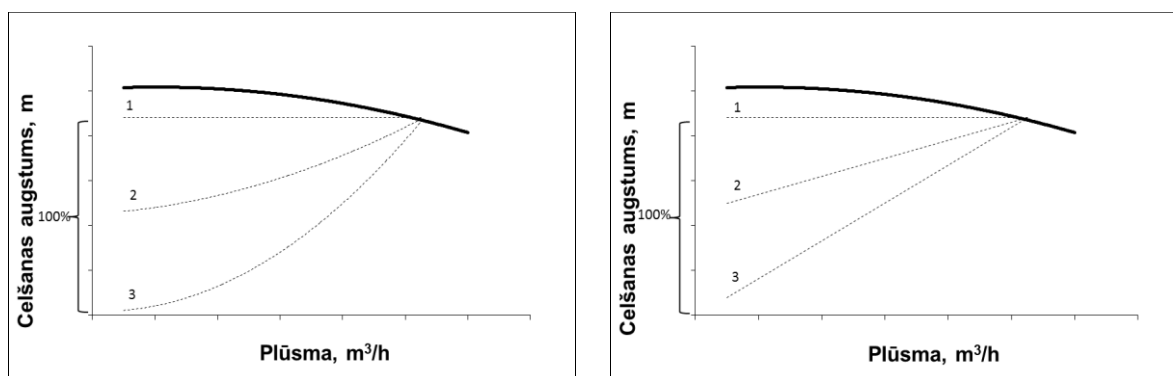
1.1.tabula

Mainīga ātruma centrālās sūkņu vadības metožu enerģijas patēriņš

($\Delta Z_{11} < \Delta Z_{21} < \Delta Z_{31} < \Delta Z_{41}$, $\Delta Z_{12} < \Delta Z_{22} < \Delta Z_{32} < \Delta Z_{42}$, $\Delta Z_{13} < \Delta Z_{23} < \Delta Z_{33} < \Delta Z_{43}$), kWh/gadā

Mainīga ātruma sūkņu vadības metode	Plūsmas komponente (Q_x/Q_n), %			
	100	75	50	25
Konstanta spiediena (diferenciālā spiediena) vadība	Z	Z- ΔZ_{11}	Z- ΔZ_{12}	Z- ΔZ_{13}
Proporcionālā spiediena vadība: lineārā novirze	Z	Z- ΔZ_{21}	Z- ΔZ_{22}	Z- ΔZ_{23}
Proporcionālā spiediena vadība: kvadrātiskā novirze	Z	Z- ΔZ_{31}	Z- ΔZ_{32}	Z- ΔZ_{33}
Temperatūras vadība	Z	Z- ΔZ_{41}	Z- ΔZ_{42}	Z- ΔZ_{43}

Proporcionālā spiediena vadības metodes izmantošana ir cieši saistīta ar patērētās enerģijas un vispārēju ūdens zudumu samazinājumu centralizētajās sistēmās. Jo lielāka ir proporcionālās līknes novirze, jo lielāks ir patērētās enerģijas ietaupījums un mazāki ir vispārēji ūdens zudumi centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās (1.1.tab.).

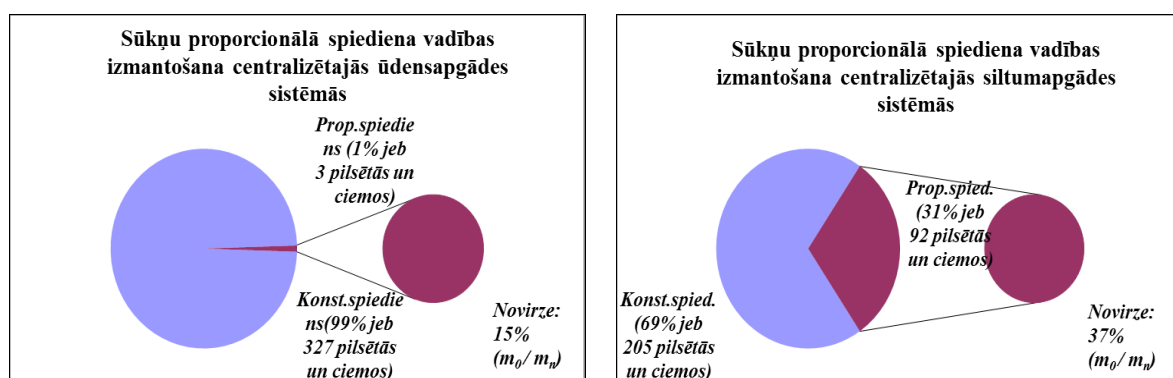


1.1.att. Mainīga ātruma sūkņu vadības metodes

No kreisas puses: kvadrātiskā novirze, no labas puses: lineārā novirze, 1 – konstants spiediens, 2-3 – proporcionāls spiediens

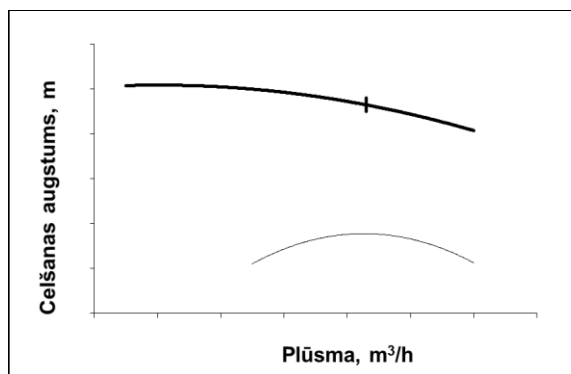
Pastāv divas mainīga ātruma sūkņu vadības metodes tīkla sūkņiem: konstanta spiediena vadības metode un proporcionālā spiediena vadības metode (1.1.att.), kuras tiek izmantotas centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Līdz 5% centralizēto ūdensapgādes sistēmu Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem) izmanto proporcionālā spiediena vadības metodi ar vidējo celšanas augstuma novirzi: ~15% (1.2.att.). Ap 31% centralizēto siltumapgādes sistēmu izmanto proporcionālā spiediena vadības metodi ar vidējo celšanas augstuma novirzi: ~37%. Tas tika noteikts statistiski analizējot ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmas.



1.2.att. Sūkņu proporcionālā/konstanta spiediena vadības izmantošana centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās

Ir svarīgi izvēlēties sūkņu tehnoloģijas risinājumu ar augstāko lietderības koeficientu. Sūkņu lietderības koeficients rāda attiecību starp pievadīto un lietderīgi patērēto jaudu. Faktiski, samazinot sūkņa griešanas ātrumu, vienmēr nedaudz samazinās arī lietderības koeficients.



1.3.att. Centrbēdzes sūkņa augstākās efektivitātes punkts

Parasti sūkņa augstākās efektivitātes punkta (1.3.att.) lietderības koeficients ir augstāks nekā lietderības koeficients, kas ir sasniegta faktiskajā darba punktā. Tādā veidā sūkņa izvēles procesam ir jāfokusējas ne tikai uz pieprasīto celšanas augstumu un plūsmu, bet arī uz to, lai hidrauliskie parametri tiktu sasniegti pie maksimālā sūkņa lietderības koeficienta.

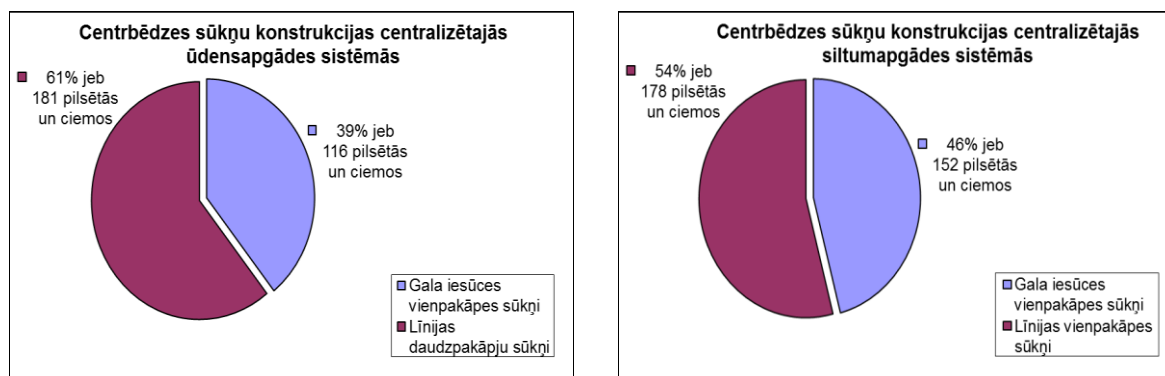
Centralizētajās ūdensapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās tiek izmantotas divas centrālās sūkņu konstrukcijas:

- gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņi;
- līnijas daudzpakāpju centrālās sūkņi.

Tajā pašā laikā centralizētajās siltumapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās visbiežāk tiek izmantotas divas centrālās sūkņu konstrukcijas:

- gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņi;
- līnijas vienpakāpes centrālās sūkņi.

Šo sūkņu konstrukciju procentuālais sadalījums ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem) ir redzams 1.4.att. Tas tika noteikts statistiski analizējot ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmas.



1.4.att. Sūkņu konstrukciju izmantošanas sadalījums centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem)

Tātad, ir svarīgi zināt, kura no sūkņu konstrukcijām ir energoefektīvāka konkrētajā plūsmas un celšanas augstuma diapazonā ūdensapgādes vai siltumapgādes sistēmās.

Šie kritēriji var tikt izmantoti mainīga ātruma centrālās sūkņu darbības analīzei centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem).

Analizējot mainīga ātruma centrālās sūkņu darbības energoefektivitāti, tika izskatīts jēdziens par spiediena kritumu (2.1), sūkņu iekārtas jaudas atkarību no sūkņa apgriezīgu skaita (2.2.), sūkņa lietderības koeficientu (2.3) un ūdens zudumu samazinājumu (2.4).

$$\Delta p = f * \frac{L}{D} * \rho * \frac{V^2}{2}, \quad (2.1)$$

- kur Δp - spiediena kritums, Pa;
 f - berzes faktors;
 L - caurules garums, m;
 D - caurules iekšējais diametrs, m;
 ρ - šķidrums blīvums, kg/m³;
 V - šķidrums vidējais ātrums, m/s.

$$\frac{P_n}{P_x} = \left(\frac{n_n}{n_x} \right)^3, \quad (2.2)$$

- kur P_n - centrālās sūkņu sākuma jauda, kW;
 P_x - centrālās sūkņu samazināta jauda, kW;
 n_n - centrālās sūkņu sākuma griešanas ātrums, RPM;
 n_x - centrālās sūkņu samazināts griešanas ātrums, RPM.

$$\eta_p = \frac{\rho * g * Q * H}{P_2}, \quad (2.3)$$

- kur η_p - centrālās sūkņa lietderības koeficients, %;
 P_2 - centrālās sūkņa vārpstai pievadīta jauda, w;
 ρ - pārsūkņejamā šķidrums blīvums, kg/m³;
 g - gravitācijas spēka paātrinājums, m/s²;
 Q - centrālās sūkņa radītā plūsma, m³/s;
 H - centrālās sūkņa celšanas augstums, m.

$$C = \sqrt{2 * g * H} * 0.6, \quad (2.4)$$

- kur C - ūdens plūsmas ātrums cauruļvada plūsuma vietā, m/s;
 g - gravitācijas paātrinājums (konstanta vērtība: 9,80665), m/s²;
 H - sūkņa celšanas augstums, m.

Proporcionālā spiediena vadības metode (patērētās elektroenerģijas samazinājums)

Šajā pētījumā tika analizēta proporcionālā spiediena vadības metode centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās. Šī vadības metode tiek salīdzināta ar konstanta spiediena/diferenciālā spiediena vadības metodes pielietošanu.

2.1.tabula

Mainīga ātruma centrālās sūkņu enerģijas patēriņa aprēķins izmantojot ūdensapgādes sistēmu teorētisko slodzes profilu (proporcionālā spiediena vadības metode)

Plūsmas komponente (Q_x/Q_n), %	100	75	55	35	12
Celšanas augstuma komponente (m_x/m_n), %	100	$100-\Delta X_1$	$100-\Delta X_2$	$100-\Delta X_3$	$100-\Delta X_4$
Darbības laiks, h/gadā	164	296	460	887	1478
Dzinēja jauda (P_1), kW	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Enerģijas patēriņš, kWh/gadā	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
Enerģijas patēriņš, kWh/gadā	ΣZ_n				

2.2.tabula

Mainīga ātruma centrālās sūkņu enerģijas patēriņa aprēķins izmantojot siltumapgādes sistēmu teorētisko slodzes profilu (proporcionālā spiediena vadības metode)

Plūsmas komponente (Q_x/Q_n), %	100	75	50	25
Celšanas augstuma komponente (m_x/m_n), %	100	$100-\Delta X_1$	$100-\Delta X_2$	$100-\Delta X_3$
Darbības laiks, h/gadā	410	1026	2394	3010
Dzinēja jauda (P_1), kW	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
Enerģijas patēriņš, kWh/gadā	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Enerģijas patēriņš, kWh/gadā	ΣZ_n			

Realizējot mainīga ātruma centrālās sūkņu enerģijas aprēķinus, izmantojot ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmu teorētiskos slodzes profilus (2.1.un 2.2.tab.), tika veikts sūkņu patērētās enerģijas salīdzinājums. Patērētās enerģijas daudzums pie dažādām proporcionālā spiediena novirzēm tika salīdzināts ar patērēto enerģijas daudzumu konstanta spiediena vadības metodes pielietojuma laikā (2.3.tab.).

Faktiskajam slodzes profilam ir jābūt līdzīgam ar teorētisko slodzes profilu, lai mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes novērtēšana būtu precīzākā. Ja faktiskais slodzes

profils pilnīgi atšķiras no teorētiskā slodzes profilā, tad ir jāveic aprēķinu korekcijas, kas ir vērstas uz slodzes profila datu izmaiņu.

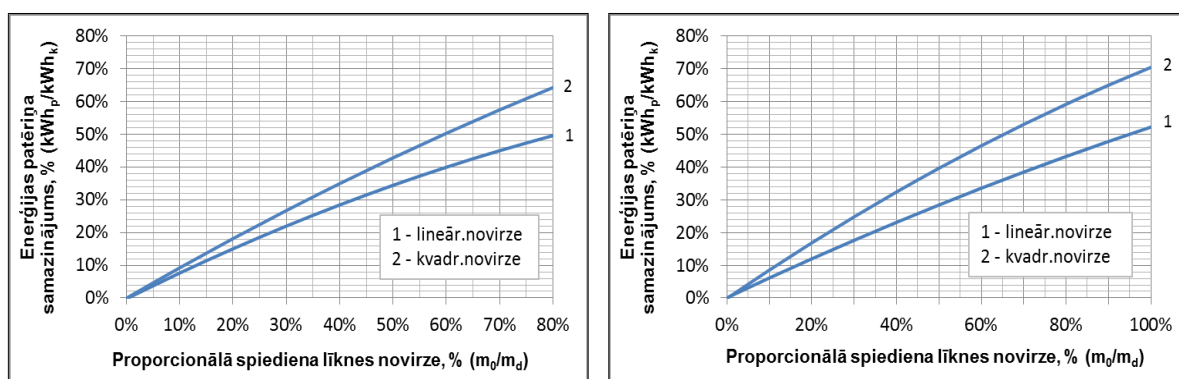
Patērētās enerģijas daudzums, ja tiek pielietoti dažādi proporcionālā spiediena varianti ar lineāro un kvadrātisko novirzi, tiek salīdzināts ar patērētās enerģijas daudzumu, ja tiek pielietota konstanta spiediena vadības metode (2.3.tab.).

2.3.tabula

Mainīga ātruma centrālās sūkņu patērētās enerģijas salīdzinājums (proporcionālā spiediena vadības līknes novirzes pret konstanta spiediena vadības līkni)

Sūkņu proporcionālā spiediena vadības līknes novirze (m_0/m_n), %	Patērētās enerģijas salīdzinājums: proporcionālā spiediens pret konstantu spiedienu (kWh_p/kWh_k), %
0	$1 - \Sigma Z_0 / \Sigma Z_0$
20	$1 - \Sigma Z_{20} / \Sigma Z_0$
40	$1 - \Sigma Z_{40} / \Sigma Z_0$
60	$1 - \Sigma Z_{60} / \Sigma Z_0$
80	$1 - \Sigma Z_{80} / \Sigma Z_0$
100	$1 - \Sigma Z_{100} / \Sigma Z_0$

Tika iegūti polinoma tipa regresijas vienādojumi ($y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + \varepsilon$) ar determinācijas koeficientiem, ar kuru palīdzību ir iespējams novērtēt enerģijas patēriņa samazinājuma potenciālu pie dažādām proporcionālā spiediena vadības līknes novirzēm (2.2.att.).



2.2.att. Enerģijas patēriņa samazinājums

Proporcionālā spiediena vadība pret konstanta spiediena vadību

No kreisas puses – ūdensapgāde sistēma; no labas puses – siltumapgādes sistēma

Pētījuma gaitā tika analizēti 16 dažādas konstrukcijas mainīga ātruma centrālās sūkņi:

- līnijas daudzpakāpju centrālās sūkņi,
- gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņi,

- līnijas vienpakāpes centrālās sūkņi.

Proporcionālā spiediena vadības metode (ūdens zudumu samazinājums tīklā)

Vispārēji ūdens zudumi centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās tika analizēti pie noteiktām proporcionālā spiediena vadības līknes novirzes lielumiem, ja mainīga ātruma centrālās sūkņu proporcionālā spiediena vadības metode tiek pielietota salīdzinājumā ar konstanta spiediena vadības metodi.

Realizējot ūdens zudumu indeksa aprēķinus, izmantojot ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmu teorētiskos slodzes profilus, tika noteikts vispārēju ūdens zudumu samazinājuma lielums tīklos pie dažādām proporcionālā spiediena līknes novirzēm (2.4. un 2.5.tab.).

2.4.tabula

Ūdens zudumu indeksa aprēķins izmantojot ūdensapgādes sistēmu teorētisko slodzes profilu (proporcionālā spiediena vadības metode)

Plūsmas komponente (Q_x/Q_n), %	100	75	55	35	12
Celšanas augstuma komponente (m_x/m_n), %	100	$100-\Delta X_1$	$100-\Delta X_2$	$100-\Delta X_3$	$100-\Delta X_4$
Laiks, h/gadā	164	296	460	887	1478
Ūdens zudumu indekss	C_{100}/C_{100}	C_1/C_{100}	C_2/C_{100}	C_3/C_{100}	C_4/C_{100}
Ūdens zudumu indekss ar plūsmas un laika komponentu ietekmi	C_{Qt1}	C_{Qt2}	C_{Qt3}	C_{Qt4}	C_{Qt5}
Ūdens zudumu indekss ar plūsmas un laika komponentu ietekmi	ΣC_{Qtn}				

2.5.tabula

Ūdens zudumu indeksa aprēķins izmantojot siltumapgādes sistēmu teorētisko slodzes profilu (proporcionālā spiediena vadības metode)

Plūsmas komponente (Q_x/Q_n), %	100	75	50	25
Celšanas augstuma komponente (m_x/m_n), %	100	$100-\Delta X_1$	$100-\Delta X_2$	$100-\Delta X_3$
Laiks, h/gadā	410	1026	2394	3010
Ūdens zudumu indekss	C_{100}/C_{100}	C_1/C_{100}	C_2/C_{100}	C_3/C_{100}
Ūdens zudumu indekss ar plūsmas un laika komponentu ietekmi	C_{Qt1}	C_{Qt2}	C_{Qt3}	C_{Qt4}
Ūdens zudumu indekss ar plūsmas un laika komponentu ietekmi	ΣC_{Qtn}			

Faktiskajam slodzes profilam ir jābūt līdzīgam ar teorētisko slodzes profilu, lai mainīga ātruma sūkņu darbības energoefektivitātes novērtēšana būtu precīzākā. Ja faktiskais slodzes

profils pilnīgi atšķiras no teorētiskā slodzes profilā, tad ir jāveic aprēķinu korekcijas, kas ir vērstas uz slodzes profila datu izmaiņu.

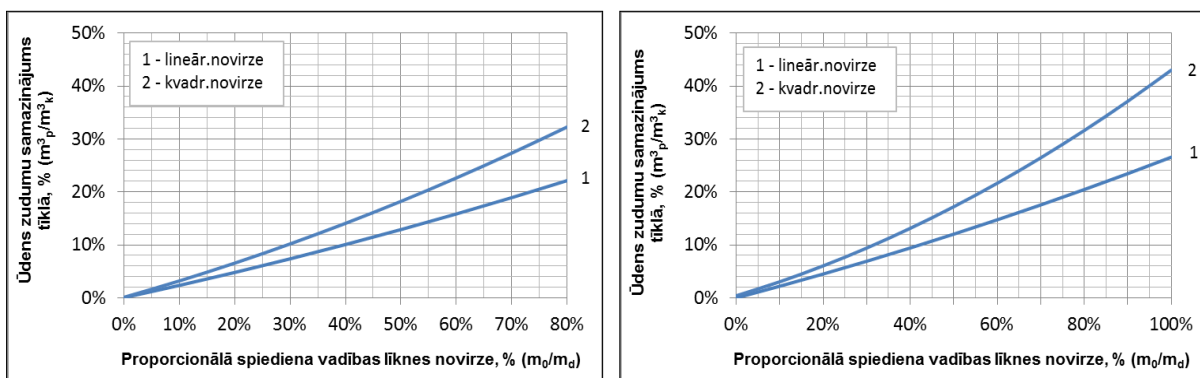
Ūdens zudumu daudzums tīklā, ja tiek pielietoti dažādi proporcionālā spiediena varianti ar lineāro un kvadrātisko novirzi, tiek salīdzināts ar esošiem ūdens zudumiem tīklā, ja tiek pielietota konstanta spiediena vadības metode (2.6.tab.).

2.6.tabula

Ūdens zudumu samazinājuma salīdzinājums izmantojot dažādas sūkņu proporcionālā spiediena vadības līknes novirzes (pret konstanta spiediena vadības metodes līkni)

Sūkņu proporcionālā spiediena vadības līknes novirze (m_0/m_n), %	Ūdens zudumu samazinājuma salīdzinājums: proporcionālais spiediens pret konstanto spiedienu (m^3_p/m^3_k), %
0	$1 - \Sigma C_{Qt0} / \Sigma C_{Qt0}$
20	$1 - \Sigma C_{Qt20} / \Sigma C_{Qt0}$
40	$1 - \Sigma C_{Qt40} / \Sigma C_{Qt0}$
60	$1 - \Sigma C_{Qt60} / \Sigma C_{Qt0}$
80	$1 - \Sigma C_{Qt80} / \Sigma C_{Qt0}$
100	$1 - \Sigma C_{Qt100} / \Sigma C_{Qt0}$

Tika iegūti polinoma tipa regresijas vienādojumi ($y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + \epsilon$) ar determinācijas koeficientiem, ar kuru palīdzību ir iespējams novērtēt ūdens zudumu samazinājuma potenciālu pie dažādām proporcionālā spiediena vadības līknes novirzēm (2.3.att.).



2.3.att. Ūdens zudumu ikgadējs samazinājums

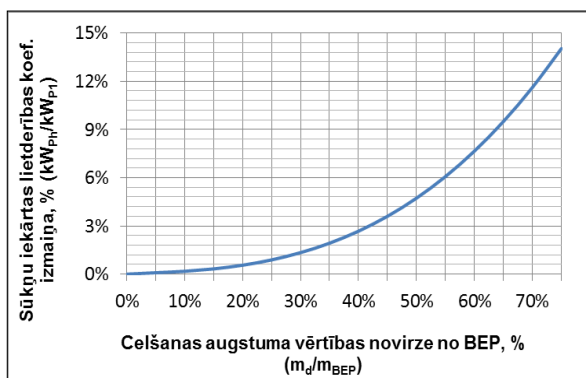
Proportcionālā spiediena vadība pret konstanta spiediena vadību

No kreisas puses – ūdensapgāde sistēma; no labas puses – siltumapgādes sistēma

Zinot novirzes vērtību proporcionālā spiediena vadības līknei un esošo ūdens zudumu daudzumu, ir iespējams noteikt ikgadējo ūdens plūsmas samazinājumu izmantojot proporcionālā spiediena vadību (salīdzinājumā ar konstanta spiediena vadības metodi).

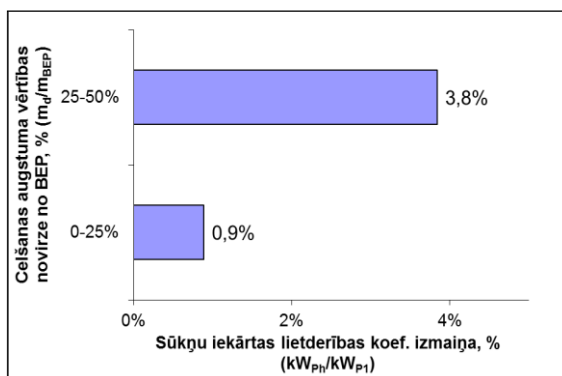
Sūkņa lietderības koeficienta izmaiņa atkarībā no darba punkta novirzes no BEP

Veicot sūkņu lietderības koeficienta analīzi atkarībā no darba punkta novirzes no sūkņu augstākās efektivitātes punkta (BEP), tika noteikta lietderības koeficienta izmaiņas tendence.



2.4.att. Centrālās sūkņu lietderības koeficienta samazinājums pie dažādām celšanas augstuma vērtību izmaiņām no tās nominālās vērtības

Sūkņu iekārtu lietderības koeficienta vērtība krīt, ja centrālās sūkņi darbojas ar pazemināto rotācijas frekvenci. Darba punkta deviācijas no nominālās sūkņa celšanas augstuma vērtības ir redzamas 2.4.att.



2.5.att. Mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta samazinājums atkarībā no dažādām celšanas augstuma vērtību izmaiņām no tās nominālās vērtības

Pētot centrālās sūkņu lietderības koeficienta izmaiņas, tika iegūts polinoma tipa regresijas vienādojums ($y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + a_3 * x^3 + \varepsilon$) ar determinācijas koeficientu. Šis vienādojums ļauj novērtēt mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta samazinājumu pie dažādām novirzēm no nominālās celšanas augstuma vērtības (2.5.att.).

Pētījuma gaitā tika analizēti 15 dažādas konstrukcijas mainīga ātruma centrālās sūkņi:

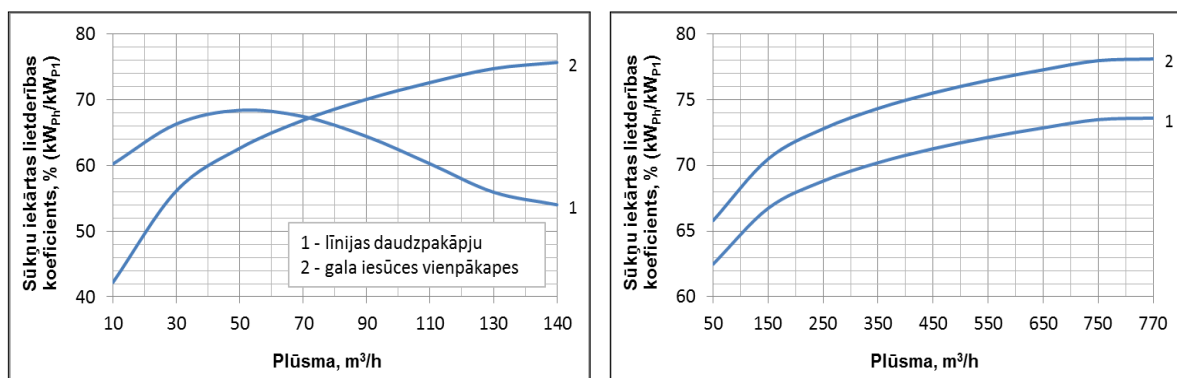
- līnijas vienkāpes centrālās sūkņi,
- līnijas daudzpakāpju centrālās sūkņi,
- gala iesūces vienkāpes centrālās sūkņi.

Augstāko lietderības koeficientu salīdzinājums dažādu konstrukciju sūkņiem

Pētot centrālās sūkņu darbības energoefektivitāti centralizētajās ūdensapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem) divas sausa rotora centrālās sūkņu konstrukcijas tika analizētas:

- līnijas daudzpakāpju centrālās sūkņi,
- gala iesūces vienkāpes centrālās sūkņi.

Realizējot centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzi, ja plūsmas un celšanas augstuma vērtības mainās diapazonā ($Q=10\div 140 \text{ m}^3/\text{h}$ pie $H=30\div 55 \text{ m}$), tika konstatēts, ka līnijas daudzpakāpju sūkņi ir energoefektīvāki par gala iesūces vienkāpes sūkņiem līdz pat 21%, ja plūsma ir līdz $72 \text{ m}^3/\text{h}$ (2.6.att.).



2.6.att. Sūkņu lietderības koeficients

No kreisas puses – ūdensapgāde sistēma, ja $H=30\div 55 \text{ m}$; no labas puses – siltumapgādes sistēma, ja $H=10\div 60 \text{ m}$

Pētot centrālās sūkņu darbības energoefektivitāti centralizētajās siltumapgādes sistēmās Latvijas lielciemos un pilsētās (līdz 10000 iedzīvotājiem) divas sausa rotora centrālās sūkņu konstrukcijas tika analizētas:

- līnijas vienpakāpes centrālās sūkņi,
- gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņi.

Sūkņu energoefektivitātes analīzes laikā, ja plūsmas un celšanas augstuma vērtības mainās noteiktajā diapazonā ($Q=50\div 770$ m³/h pie $H=10\div 60$ m), tika konstatēts, ka gala iesūces vienpakāpes sūkņu lietderības koeficientu vērtības ir augstākās nekā līnijas vienpakāpes sūkņiem (par ~4-5%). Tas ir redzams 2.6.att.

Veicot pētījumu, ir iegūti logaritma tipa ($y = a_0 + a_1 * \ln(x) + \varepsilon$), pakāpes tipa ($y = a * x^b$) un polinoma tipa ($y = a_0 + a_1 * x + a_2 * x^2 + a_3 * x^3 + \varepsilon$) regresijas vienādojumi ar determinācijas koeficientiem, ar kuru palīdzību ir iespējams novērtēt sūkņu lietderības koeficienta vērtību noteiktajā plūsmas un celšanas augstuma diapazonā ūdensapgādes sistēmā (līnijas daudzpakāpju un gala iesūces vienpakāpes sūkņi) un siltumapgādes sistēmā (līnijas un gala iesūces vienpakāpes sūkņi).

Pētījuma gaitā tika analizēti 368 dažādas konstrukcijas centrālās sūkņi:

- līnijas daudzpakāpju centrālās sūkņi,
- gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņi,
- līnijas vienpakāpes centrālās sūkņi.

3. ENERGOEFEKTIVITĀTES ANALĪZES KRITĒRIJU EKSPERIMENTĀLĀ PĀRBAUDE

Realizējot vairākus mērījumus dažādos centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes objektos, tika veikta centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju eksperimentālā pārbaude.

Mainīga ātruma centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriji centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās, kas ir aprakstīti ar regresijas vienādojumiem un eksperimentāli pārbaudīti ar mērījumiem: 1) proporcionālā spiediena vadības metodes energoefektivitātes analīze salīdzinājumā ar konstanta spiediena/konstanta diferenciālā spiediena vadības metodi; 2) mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta analīze atkarībā no darba punkta novirzes no sūkņa augstākās efektivitātes punkta celšanas augstuma vērtības; 3) dažādu konstrukciju mainīga ātruma centrālās sūkņu lietderības koeficienta analīze centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās.

Sūkņu darbības energoefektivitātes analīze ūdensapgādes sistēmā (proporcionālā spiediena vadība)

Mērījumi tika realizēti pilsētas centralizētās ūdensapgādes sistēmas otrā pacēluma sūkņu stacijā Jaunolaines pilsētā Latvijā, kas apgādā ar ūdeni 2000 iedzīvotājus.

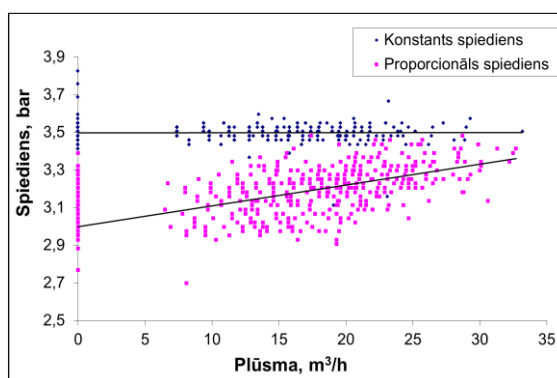
Pilsētas dzeramā ūdens sistēma tiek raksturota ar parametriem:

- Maksimālais stundas patēriņš ir $36 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Spiediens pēc otrā pacēluma sūkņu stacijas tika uzturēts $3.5 \text{ bari} \approx 35 \text{ m}$.
- Ūdens zudumi tīklā: $\sim 23\%$.

Spiediena paaugstināšanas stacija tiek raksturota ar parametriem:

- Stacija sastāv no 5 sūkņiem, no kuriem 2 – rezerves sūkņi, 2 – sūkņi ugunsdzēsības vajadzībām un 1 – sūknis saimnieciskajām vajadzībām.
- Visi sūkņi ir aprīkoti ar iebūvētiem frekvences pārveidotājiem.
- Katra sūkņa nominālās ražīguma/celšanas augstuma vērtībās: $45 \text{ m}^3/\text{h}/60 \text{ m}$.
- Katra sūkņa dzinēja elektriskā jauda $P_2=11 \text{ kW}$.
- Katra sūkņa augstākās efektivitātes punkts ir 64.8% .

Maksimālā proporcionālās līknes novirze: 15% tika izvēlēta, lai nodrošinātu konstantu spiediena vērtību pie tālākā patērētāja visā diennakts garumā: gan pie minimālām, gan pie maksimālām plūsmām.



3.1.att. Sūkņu celšanas augstuma vērtības atkarībā no plūsmas vērtībām

Konstanta spiediena un proporcionālā spiediena vadības metodes

Analizējot elektroenerģijas patēriņu konstanta spiediena un proporcionālā spiediena (lineārā novirze) vadības metožu izmantošanas gadījumos, tika noteikts, ka faktiski enerģijas ekonomija ir 11.7% . Savukārt analizējot konkrētu proporcionālā spiediena vadības līknes

novirzi (15%) ar mainīga ātruma centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju, tika iegūts patērētās enerģijas ietaupījums, kas ir izsākams ar ~12%.

Salīdzinot centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju ar faktiski iegūtiem mērījumiem reālajā objektā (atdzelzošanas stacija), ir redzams, ka rezultāti ir līdzīgi. Absolūtā kļūda ir zem 1%.

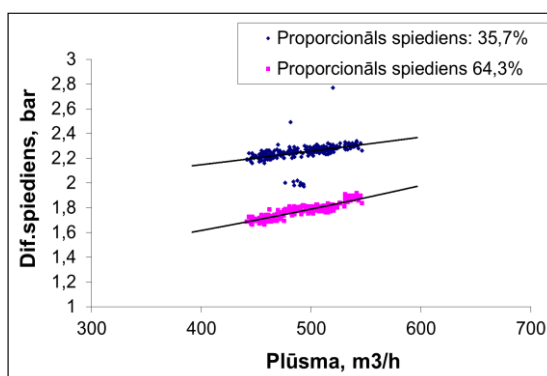
Sūkņu darbības energoefektivitātes analīze siltumapgādes sistēmā (proporcionālā spiediena vadība)

Mērījumi, kas bāzējas uz sūkņu enerģijas auditu, tika realizēti centralizētajā siltumapgādes sistēmā galvenajā katlumājā Haapsalu pilsētā Igaunijā galvenajiem tīkla sūkņiem, kas apgādā ar siltumu vairāk par 11000 iedzīvotāju.

Galvenie tīkla centrālās sūkņi tiek raksturota ar parametriem:

- 2 tīkla sūkņi, no kuriem 1 – rezerves sūknis, 1 – darba sūknis.
- Katrs sūknis ir ar ārējo frekvences pārveidotāju, kas nodrošina centrālās sūkņu mainīgo ātrumu.
- Katra sūkņa nominālās ražīguma/celšanas augstuma vērtībās: 750 m³/h/28 m.
- Katra sūkņa dzinēja elektriskā jauda $P_2=90$ kW.
- Katra sūkņa augstākās efektivitātes punkts ir 77 %.
- Centrālās sūkņi tika vadīti ar proporcionālā spiediena vadības metodi mērot konstanto diferencspiedienu pēc katlumājas: 18 m.

Proporcionālā spiediena sūkņu vadības metode tika realizēta, ja proporcionālās līknes novirze nomainījās no 18 m jeb 35.7% uz 10 m jeb 64.3% (3.2.att.).



3.2.att. Sūkņu diferenciālā spiediena vērtības atkarībā no plūsmas vērtībām

Proporcionālā spiediena vadības metode ar dažādām novirzēm

Analizējot elektroenerģijas patēriņu abu proporcionālā spiediena vadības metožu izmantošanas gadījumos, tika noteikts, ka faktiski enerģijas ekonomija ir 24.4%. Analizējot proporcionālās līknes novirzes (35.7% un 64.3%) ar sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju, tika iegūts patērētās enerģijas ietaupījums, kas ir izsākams ar ~29%.

Salīdzinot centrālās sūkņu darbības energoefektivitātes analīzes kritēriju ar faktiski iegūtiem mērījumiem reālajā objektā (katlumāja), ir redzams, ka rezultāti ir līdzīgi. Absolūtā kļūda ir ap 4%.

Sūkņu lietderības koeficientu izmaiņu analīze atkarībā no darba punkta novirzes no augstākās efektivitātes punkta

Eksperimentālie mērījumi tika veikti sešās centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās, lai noteiktu mainīga ātruma sūkņu lietderības koeficienta izmaiņas vērtību atkarībā no faktiskā darba punkta izvietojuma attiecībā pret augstākās efektivitātes punktu (3.1.tab.).

3.1.tabula

Absolūto kļūdu vērtības starp centrālās sūkņu lietderības koeficienta izmaiņu faktiskajiem un teorētiskajiem aprēķiniem centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās

	Sistēmas tips	Pilsēta	Celšanas augstuma novirze no BEP, %	El.jauda (P ₁), kW	Absolūtā kļūda, %
1	Ūdensapgāde	Dobele	50.0	3.9	0.6
2	Ūdensapgāde	Jaunolaine	33.2	7.9	0.6
3	Ūdensapgāde	Lubāna	41.3	2.6	0.5
4	Siltumapgāde	Liepāja	16.1	67.2	0.1
5	Siltumapgāde	Tukums	20.1	14.8	0.1
6	Siltumapgāde	Brocēni	33.3	6.1	0.3

Vidējā kvadrātiskā kļūda, analizējot centrālās sūkņu lietderības koeficientu izmaiņu starpību starp faktiskajām mērījumu vērtībām un teorētiskajām aprēķinu vērtībām centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās, ir mazāka par 1%.

Sūkņu lietderības koeficientu analīze augstākās efektivitātes punktos

Līnijas vienpakāpes un daudzpakāpju, kā arī gala iesūces vienpakāpes centrālās sūkņu augstākā lietderības koeficienta vērtības noteikšanai tika veikti eksperimentālie mērījumi astoņās dažādās centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās (3.2.tab.).

Absolūtās kļūdas vērtības starp centrālās sūkņu lietderības koeficientu faktiskajiem un teorētiskajiem aprēķiniem centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās

	Sistēmas tips	Pilsēta	Sūkņa konstrukcija	El.jauda (P_1), kW	Absolūtā kļūda, %
1	Ūdensapgāde	Jaunolaine	Daudzpakāpju līnijas	10.7	4.7
2	Ūdensapgāde	Lubāna	Daudzpakāpju līnijas	4.3	4.8
3	Ūdensapgāde	Dobeles	Vienpakāpes gala iesūces	7.8	1.9
4	Ūdensapgāde	Carnikava	Vienpakāpes gala iesūces	5.3	5.1
5	Siltumapgāde	Tukums	Vienpakāpes gala iesūces	17.9	0.7
6	Siltumapgāde	Liepāja	Vienpakāpes gala iesūces	79.1	4.5
7	Siltumapgāde	Brocēni	Vienpakāpes līnijas	8.7	3.0
8	Siltumapgāde	Jēkabpils	Vienpakāpes līnijas	54.3	3.6

Vidējā kvadrātiskā kļūda, analizējot centrālās sūkņu augstāko lietderības koeficientu starpību starp faktiskajām mērījumu vērtībām un teorētiskajām aprēķinu vērtībām centralizētajās ūdensapgādes un siltumapgādes sistēmās, ir ~1%.

4. SŪKŅU PROPORCIONĀLĀ SPIEDIENA VADĪBAS METODES PIELIETOJUMA EKONOMISKĀ ANALĪZE

Ūdensapgādes sistēmas otrā pacēluma sūkņu stacijas darbības ekonomiskā analīze

Ekonomiskā analīze tika veikta ūdensapgādes sistēmas otrā pacēluma sūkņu stacijai, kas apgādā ar ūdeni 2000 iedzīvotājus (neņemot vērā ekonomiju, ko pakārtoti rāda atdzelžošanas stacija samazinoties ūdens zudumiem tīklā).

Otrā pacēluma sūkņu stacija tiek raksturota ar sekojošiem galvenajiem hidrauliskiem parametriem:

- Maksimālais stundas patēriņš ir 36 m³/h.
- Spiediens pēc otrā pacēluma sūkņu stacijas tika uzturēts 3.5 bari ≈ 35 m.
- Ūdens zudumi tīklā: ~23%.

Elektroenerģijas ekonomija, ja konstanta spiediena vadības vietā tiek pielietota proporcionālā spiediena vadības metode (lineārā novirze ir 15%), ir 2544 kWh/gadā.

Tika pieņemts: 1) elektroenerģijas tarifs: 0.08126 Ls/kWh, 2) investīcijas papildu automātikas bloka instalācijai, lai nodrošinātu sūkņu proporcionālā spiediena vadību: 870 Ls bez PVN, 3) diskonta likme: 10% / gadā, 4) ekspluatācijas periods: 10 gadi.

Otrā pacēluma sūkņu stacijas ekonomiskās analīzes rezultāti (sūkņu proporcionālā spiediena vadības metode pret konstanta spiediena vadību):

- NPV pašreizējā neto vērtība: 97.53 Ls.
- IRR iekšējā peļņas norma: ~13%.
- Diskontētais atmaksāšanās periods: 8.45 gadi.

Siltumapgādes sistēmas galveno tīkla sūkņu darbības ekonomiskā analīze

Ekonomiskā analīze tika veikta siltumapgādes sistēmas galvenajiem tīkla sūkņiem, kas apgādā ar siltuma enerģiju ap 11000 iedzīvotājus (neņemot vērā ekonomiju, ko pakārtoti rāda ūdens sagatavošanas stacija samazinoties ūdens zudumiem tīklā).

Galvenie tīkla sūkņi tiek raksturoti ar sekojošiem galvenajiem hidrauliskiem parametriem:

- Maksimālā stundas plūsma ir 750 m³/h.
- Berzes zudumu vērtība visā sistēmā ir 28 m.

Elektroenerģijas ekonomija, ja proporcionālā spiediena vadības kvadrātiskā novirze mainās no 35.7% uz 64.3%), ir 54000 kWh/gadā.

Tika pieņemts: 1) elektroenerģijas tarifs: 0.08126 Ls/kWh, 2) investīcijas papildu automātikas bloka instalācijai, lai nodrošinātu sūkņu proporcionālā spiediena variācijas: 1250 Ls bez PVN, 3) diskonta likme: 10% / gadā, 4) ekspluatācijas periods: 10 gadi.

Galveno tīkla sūkņu ekonomiskās analīzes rezultāti (sūkņu proporcionālā spiediena vadības noviržu maiņa):

- NPV pašreizējā neto vērtība: 21505 Ls.
- IRR iekšējā peļņas norma: 296%.
- Diskontētais atmaksāšanās periods: 0.37 gadi.

SECINĀJUMI

1. Latvijā 327 pilsētās un ciemos jeb 99% no centralizētās ūdensapgādes sistēmām izmanto konstanta spiediena vadības metodi pirmā/otrā pacēluma sūkņiem un 205 pilsētās un ciemos jeb 69% no centralizētās siltumapgādes sistēmām izmanto konstanta diferenciālā spiediena vadību tīkla sūkņiem. Visās šajās sistēmās ir iespējams izmantot proporcionālā spiediena vadības metodi kā energoefektivitātes analīzes kritēriju ar 15% līknes novirzi ūdensapgādes sistēmās un vismaz 50% līknes novirzi siltumapgādes sistēmās.

2. Latvijā centralizētajās ūdensapgādes sistēmās vispārējo ūdens zudumu līmenis ir ap 24%, kas ir pielīdzināts ūdens zudumu līmenim tādās ES valstīs, kā Spānija, Francija un Slovākija. Šis ūdens zudumu līmenis atpaliek no labākajiem rādītājiem, ko rāda Dānija un Vācija, kur ūdens zudumu līmenis ir zem 10%. Izmantojot proporcionālā spiediena vadības metodi kā energoefektivitātes analīzes kritēriju, ir iespējams noteikt ūdens zudumu samazinājuma potenciālu.
3. Izmantojot sūkņu proporcionālā spiediena vadību kā energoefektivitātes analīzes kritēriju ar 15% novirzi pirmā/otrā pacēluma sūkņiem ūdensapgādes sistēmās enerģijas patēriņš var samazināties par ~14% gadā, savukārt ūdens zudumu samazinājums no esošiem vispārējiem ūdens zudumiem tīklā - par ~5%. Faktiski, kopējais enerģijas patēriņš var samazināties vismaz par 1 GWh.
4. Ja tiek izmantota sūkņu proporcionālā spiediena vadība kā energoefektivitātes analīzes kritērijs ar 50% novirzi tīkla sūkņiem siltumapgādes sistēmās, enerģijas patēriņš var samazināties par ~40% gadā, savukārt ūdens zudumu samazinājums no esošajiem vispārējiem ūdens zudumiem tīklā – par ~17%. Faktiski, kopējais enerģijas patēriņš var samazināties vismaz par 7.6 GWh.
5. Palielinoties celšanas augstuma novirzei no plūsmas filtru sūkņa augstākās efektivitātes punkta pie konstantas plūsmas, sūkņu lietderības koeficients samazinās nevienmērīgi. Energoefektivitātes analīzes kritērijs rāda, ka palielinoties novirzei līdz 25%, lietderības koeficienta samazinājums ir nebūtisks ~1% (ja novirze palielinās 25-50%, tad lietderības koeficients samazinās par ~4%).
6. Energoefektivitātes analīzes kritērijs nosaka, ka līnijas daudzpakāpju un gala iesūces vienkāpes sūkņu maksimālais lietderības koeficients ir vienāds, ja plūsma ūdensapgādes sistēmās ir 72 m³/h. Jo mazāka ir plūsma, jo augstāks ir līnijas daudzpakāpju sūkņu maksimālais lietderības koeficients salīdzinājumā ar gala iesūces vienkāpes sūkņiem (līdz pat 21%), ja $Q_{nom}=10\div 140$ m³/h pie $H_{nom}=30\div 55$ m. Savukārt gala iesūces vienkāpes sūkņu maksimālais lietderības koeficients ir augstāks nekā līnijas vienkāpes sūkņiem siltumapgādes sistēmās (4-5% robežās), ja $Q_{nom}=50\div 770$ m³/h pie $H_{nom}=10\div 60$ m.
7. Absolūtās kļūdas starp energoefektivitātes analīzes kritērijiem mainīga ātruma sūkņu darbības optimizācijai un faktiski iegūtiem mērījumu datiem centralizētās ūdensapgādes un siltumapgādes objektos variē līdz 5%.

8. Jo lielāka ir sūkņu dzinēja jauda un/vai proporcionālā spiediena līknes novirze, jo īsāks ir atmaksāšanās periods. Ja palielinātu līknes novirzi vairāk par 15% (līdz 20%) otrā pacēluma sūkņiem ūdensapgādes sistēmā, kas apgādā ar ūdeni 2000 iedzīvotājus, tad proporcionālā spiediena vadības realizācijas atmaksāšanās periods samazināsies no 5.53 līdz 3.93 gadiem, bet iekšējā peļņas norma 10 gadu periodam palielināsies no 12.55% līdz 21.92%, ja sākuma investīcijas ir 870 Ls un elektroenerģijas tarifs ir ~0.08 Ls/kWh.

PUBLIKĀCIJAS

1. Pilscikovs D., Dzelzītis E. Evaluation of Effectiveness of Various Control Modes for Variable Speed Centrifugal Pumps in Different Parts of District Heating System// Scientific Journal of RTU: Construction Science. – Rīga: RTU, 2011. – pp 46-51.
2. Pilscikovs D., Dzelzītis E. Improvement of Energy Efficiency by Using Proportional Pressure Control at the Second Stage Pumping Stations in Public Water Supply// Scientific Journal of RTU: Construction Science. – Rīga: RTU, 2011. – pp 40-45.
3. Dzelzītis E., Pilscikovs D. Efficiency Level of Centrifugal Pumps of Various Designs for Public Water Supply and District Heating Systems// Scientific Journal of RTU: Construction Science. – Rīga: RTU, 2011. – pp 6-10.
4. Piļščikovs D., Dzelzītis E. Energoefektivitātes uzlabošana otrā pacēluma sūkņu stacijās izmantojot proporcionālā spiediena vadību// Apvienotā Pasaules latviešu zinātnieku 3.kongresa un letonikas 4.kongresa sekcijas „Tehniskās zinātnes – Būvniecība: zinātne, teorija un prakse” tēžu krājums. – Rīga: RTU, 2011. – 69. lpp.
5. Pilscikovs D., Dzelzītis E. Criteria of effectiveness evaluation of variable speed centrifugal pumps in heating and cooling systems// Proceedings of the International Scientific conference: Renewable Energy and Energy Efficiency. – Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2012. – pp 196-200.
6. Dzelzītis E., Pilscikovs D. Criteria of Effectiveness Evaluation of centrifugal pumps in district heating systems// Proc. of the Fourth International Conference on Heating, Ventilation and Air-Conditioning. – Tehran: ICHVAC, 2012. - ICHVAC-4-5126 (pp 5).
7. Dzelzītis E., Pilscikovs D. Method of Evaluation of Efficiency Improvement Potential for District Heating Systems with Focus on Variable Speed Centrifugal Pumps//

- Journal of Mechanical Research and Application (JMRA). – Tehran: Islamic Azad University, 2012. – pp 1-6.
8. Pilscikovs D., Dzelzitis E. Evaluation of Effectiveness of Proportional Pressure Control of Variable Speed Centrifugal Pumps in Water Supply systems// Digest Book of Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute/RTU Alumni. – Riga: RTU, 2012. – p 425.
 9. Pilscikovs D., Dzelzitis E. Evaluation of Efficiency Improvement Potential Applying Proportional Pressure Control for Variable Speed Pumps in Water Supply// International Journal of Engineering Science Invention (IJESI). – Noida: IJESI, 2013. – pp 29-38.
 10. Dzelzitis E., Pilscikovs D. Efficiency Evaluation of Proportional Pressure Control for Centrifugal Pumps with Variable-Speed Motors// Transactions of ASHRAE 2014 Winter Conference. – New York: ASHRAE, 2014 (presented at the conference and accepted for publication).