



Latvijas Lauksaimniecības universitātē
Tehniskā fakultātē
Lauksaimniecības enerģētikas institūts

Mg.sc.ing., Mg.oec. **Aigars Laizāns**

Notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas modelēšana un optimizācija

Promocijas darba

KOPSAVILKUMS

Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

Promotion paper

SUMMARY

For acquiring Doctor's degree in Engineering sciences

Promocijas darba izstrādi līdzfinansējis

Eiropas Savienības Sociālais fonds



Jelgava, 2011

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Lauksaimniecības universitātes Tehniskās fakultātes Lauksaimniecības enerģētikas institūtā.

Zinātniskais vadītājs:

Dr.habil.sc.ing., profesors **Andris Šnīders**

Oficiālie recenzenti:

Dr.habil.sc.ing. **Egīls Dzelzītis** – Rīgas Tehniskās universitātes profesors;

Dr.sc.ing. **Imants Ziemelis** – Latvijas Lauksaimniecības universitātes profesors;

Dr.sc.ing. **Romāns Neilands** – Rīgas Tehniskās universitātes docents.

Promocijas darba aizstāvēšana notiks LLU Lauksaimniecības nozares un Inženierzinātņu apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2011. gada 26.augustā plkst. 10:00, Jelgavā, J.Čakstes bulv. 5, Tehniskajā fakultātē, 429.auditorijā.

Ar promocijas darbu, pielikumu un kopsavilkumu var iepazīties LLU

Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā ielā 2.

Atsaukmes sūtīt: Promocijas padomes sekretāram, profesoram, Dr.sc.ing. Imantam Ziemelim, LLU Tehniskā fakultāte, J.Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV-3001.

Padomes priekšsēdētājs – profesors, *Dr.sc.ing.* Juris Priekulis.

The research is carried out at the Latvia University of Agriculture, Institute of Agriculture Energetics of the Faculty of Engineering.

The scientific advisor of the research:

Dr. habil. sc. ing., professor **Andris Šnīders**

The official reviewers –

Dr.habil.sc.ing. Egīls Dzelzītis – Professor of the Riga Technical University;

Dr.sc.ing. Imants Ziemelis – Professor of the Latvia University of Agriculture;

Dr.sc.ing. Romāns Neilands – Assistant professor of the Riga Technical University.

The promotion paper will be defended in an open meeting of the Promotion Council of the subbranch of Engineering Sciences of the branch of Agriculture at the Latvia University of Agriculture on August 26, 2011, at 10 a.m.. Venue – Jelgava, J.Cakstes Blvd. 5, Faculty of Engineering, room 429.

The promotion paper, the annex and and resume are available at the Fundamental Library of the Latvia University of Agriculture located at Liela str. 2, Jelgava.

References should be sent to the secretary of the Promotion Council, Professor, Dr.sc.ing., Imants Ziemelis. Address – Faculty of Engineering of Latvia University of Agriculture, 5 J.Cakstes Blvd., Jelgava, LV-3001.

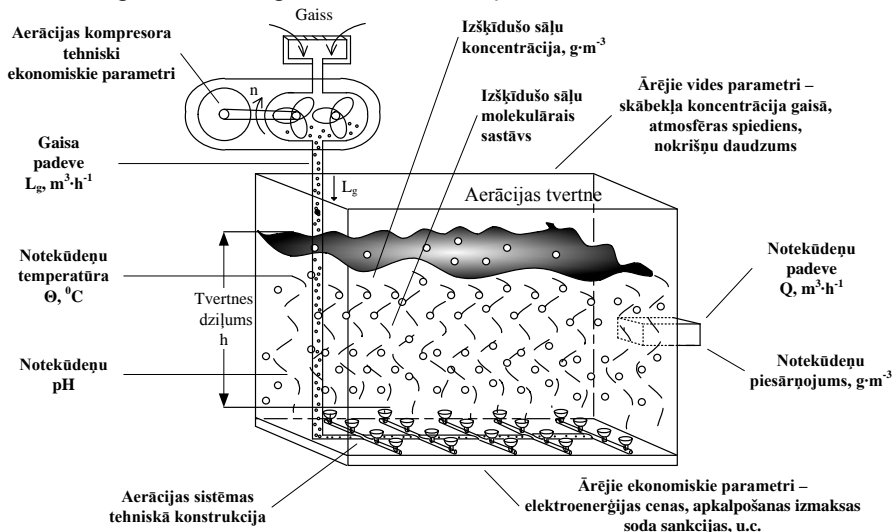
Head of the Council – Professor, Dr.sc.ing. Juris Priekulis

SATURS

Pētījumu pamatojums, struktūra un metodika	4
Pētījumu hipotēzes, mērķi un uzdevumi	5
Zinātniskā darba aprobācija.....	6
1. Notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energopatēriņu ietekmējošu faktoru teorētiskie pētījumi.....	8
1.1. Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišu darbības un energopatēriņa datu analīze.....	8
1.2. Skābekļa šķīdības teorētiskie pētījumi	9
1.3. Skābekļa šķīdības matemātiskais modelis	12
1.4. Skābekļa pārneses statistiskais modelis	13
1.5. Skābekļa pārneses procesa nestacionārais matemātiskais modelis	14
1.6. Skābekļa pārneses modeļu salīdzinošie pētījumi	18
2. Notekūdeņu apskābekļošanas eksperimentālie pētījumi	19
3. Eksperimentālo un teorētisko modeļu salīdzināšana	20
4. Aerācijas kompresora vadības modelēšana un optimizācija.....	21
Secinājumi.....	26
Background, scope, and structure of research	29
Hypothesis, aim and tasks of the research.....	29
Approbation of the scientific work.....	30
1. Wastewater treatment systems energy consumption patterns theoretical research.....	32
1.1. Analysis of Latvia wastewater treatment systems operations and energy consumption patterns.....	33
1.2. Theoretical research of oxygen solubility	34
1.3. Oxygen solubility mathematic model	36
1.4. Oxygen transfer stationary model	37
1.5. Oxygen transfer nonstationary model	37
1.6. Comparative research of oxygen transfer nonstationary and stationary model.....	40
2. Wastewater aeration experimental research	40
3. Comparison of experimental data and simulation model	41
4. Air blower control system simulation and optimization.....	41
Conclusions	44
Informācijas avoti (Sources of information)	46

PĒTĪJUMU PAMATOJUMS, STRUKTŪRA UN METODIKA

Notekūdeņu aerācijas inženiersistēma (NAIS) ir būtiska mūsdienīgas bioloģiskās notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs sastāvdaļa, kas notekūdeņu aerācijas tvertnē nodrošina attīrošo mikroorganismu metabolismam nepieciešamo skābekli. Tās galvenā sastāvdaļa ir gaisa padeves iekārta ar gaisa kompresoriem, ar elektrodzinēju piedziņu un vadības programmu, un notekūdeņu aerācijas tvertne ar aerācijas difuzoriem gaisa vienmērīgai sadalei notekūdeņos (1.att.).



1.att. Notekūdeņu aerācijas inženiersistēma un to ietekmējošie faktori

Fig.1 Wastewater aeration engineering system structure and influencing forces

Tā kā notekūdeņu aerācijas inženiersistēma patērē būtisku daļu (40–80% atkarībā no valsts ģeogrāfiskā stāvokļa un pielietotās notekūdeņu attīrīšanas tehnoloģijas) no kopējās notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs enerģijas bilances, tās elektropiedziņas vadības procesa izvēle ir ļoti būtiska, lai tiktu iegūts konkrētai notekūdeņu attīrīšanas ietaisei optimāls tehniski ekonomiskais risinājums.

Pieejamo informācijas avotu un zinātnisko pētījumu analīze liecina, ka līdzšinējie pētījumi atsevišķu notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas elementu jomā ir plaši, tomēr trūkst vienota viedokļa un izpratnes par aerācijas tvertnes dinamisko raksturu, un to, kā dažādi vadības principi un procesi ietekmē aerācijas kvalitāti un energoefektivitāti.

Aerācijas tvertnē notiekošais tiek analizēts galvenokārt saistībā ar bioloģiskajiem procesiem, bet tehnisko un tehnoloģisko risinājumu iespaida pētījumi ir nepilnīgi. Nav izpētīta aerācijas tvertnes regulējošās iedarbes (gaisa skābekļa padeves intensitātes) un perturbācijas (piesārņojuma) pārvades funkciju inerces un jutības rādītāju savstarpējā mijiedarbība un to mainīgā daba – aerācijas tvertnes pārvades funkcija parasti tiek aprakstīta ar pirmās kārtas diferenciālvienādojumu ar nemainīgiem parametriem.

Pētījumi par skābekļa šķīdību līdz šim ir veikti, apskatot dažādu faktoru individuālo iedarbi, tomēr nav izveidota dažādu faktoru komplekso iedarbi aprakstoša skābekļa šķīdību notekūdeņos aprakstoša analītiska sakarība.

Trūkst vienota matemātiskā modeļa, kas apraksta nestacionāro skābekļa pārneses procesu aerācijas tvertnē, līdz ar to notekūdeņu attīrīšanas ietaišu projektētājiem un apsaimniekotājiem ir ierobežotas iespējas izvēlēties konkrētai vietai optimālu (energoefektīvu un kvalitatīvu) aerācijas inženiersistēmas vadības algoritmu, kas ievērtē aerācijas tvertnes dinamiku.

Tādēļ jāveic aerācijas inženiersistēmas un skābekļa pārneses pētījumi, un matemātiskā un datorsimulācijas modeļa izveide, un iegūtās sakarības jāizmanto aerācijas kompresora vadības principu pārbaudei un optimālas izvēles pamatošanai.

PĒTĪJUMU HIPOTĒZES, MĒRĶI UN UZDEVUMI

Pētījumu veikšanai izvirzītas **hipotēzes**:

1. notekūdeņu aerācijas inženiersistēma ir nestacionāra tehnoloģiska sistēma ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem, kuras darbību apraksta nelineāru diferenciālvienādojumu sistēma ar mainīgiem parametriem;
2. notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas optimālu (kvalitatīvu un energoefektīvu) darbību var nodrošināt ar adaptīvu vadību, kas spēj veikt nepārtrauktu regulējošās iedarbes un slodzes mainīgo parametru pārrēķinu un ievadi aerācijas tvertnes pārvades funkciju sistēmā.

Zinātniskā darba mērķis ir teorētiski un eksperimentāli pamatot notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kā nestacionāras sistēmas jutības un inerces rādītāju mainīgo dabu, un piedāvāt inovatīvu notekūdeņu aerācijas tehnoloģisko iekārtu elektropiedziņas automātiskās vadības principu, kas nodrošina to optimālu (kvalitatīvu un energoefektīvu) darbību.

Darba mērķa sasniegšanai izvirzīti un risināti šādi uzdevumi:

1. Veikt pētījumus par notekūdeņu attīrīšanas ietaišu enerģijas patēriņa tendencem, likumsakarībām un ietekmējošiem faktoriem.
2. Veikt pētījumus par notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas sastāvdaļu ietekmi uz enerģijas patēriņu un notekūdeņu attīrīšanas kvalitāti.
3. Veikt pētījumus par skābekļa pārnesi un patēriņu notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs, izpētīt skābekļa šķīdības ūdenī procesu ietekmējošos faktorus un to iedarbības analītiskās likumsakarības, un izveidot kompleksu skābekļa pārneses matemātisko modeli.
4. Veikt pētījumus par aerācijas tvertnes dinamiku, noskaidrojot tās nestacionaritāti nosakošo nelineāro jutības un inerces parametru analītiskās likumsakarības.
5. Izveidot aerācijas tvertnes virtuālo modeli, un noskaidrot dažādu faktoru komplekso ietekmi uz notekūdeņu attīrīšanas kvalitāti un energoefektivitāti.
6. Veikt eksperimentālos pētījumus Preiļu notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs, un noskaidrot izšķīdušā skābekļa koncentrācijas izmaiņu likumsakarības aerācijas tvertnē.
7. Veikt aerācijas tvertnes virtuālā modeļa atbilstības novērtēšanu, salīdzinot eksperimentālo pētījumu un simulācijas datus.

8. Veikt notekūdeņu aerācijas inženiersistēmu vadības principu efektivitātes un to optimizācijas iespēju izpēti, izmantojot aerācijas tvertnes virtuālo modeli.
9. Izveidot uzlabotu notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas automātiskās vadības principu, kas ievērtē aerācijas tvertnes nestacionāro dabu, adaptīvi koriģējot vadības ierīces darbību, tādējādi nodrošinot konkrētai attīrīšanas sistēmai optimālus elektropiedziņas enerģētiskos un ekonomiskos parametrus.

ZINĀTNISKĀ DARBA APROBĀCIJA

Pētījumi veikti laika posmā no 2005. līdz 2011.gadam. Šajā laika posmā publicēti 7 zinātniskie raksti, no kuriem 7 atbilst vispārātzītiem recenzējamiem zinātniskiem rakstiem. Par rezultātiem ziņots 9 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā, Lietuvā, Krievijā, ASV un Rumānijā.

Pētījuma novitāte apliecināta ar iegūto Latvijas Republikas patentu Nr.13998 (patenta publikācijas datums 20.11.2009) “Notekūdeņu aerācijas kvaziinvarītās vadības sistēma”, izgudrotāji Aigars Laizāns, Andris Šnīders, Jānis Greivulis.

Publikācijas vispārāztītos recenzējamos zinātniskos izdevumos:

1. Šnīders A., Laizāns A. Invariant Control of Wastewater aeration. **In:** Proceedings of 1st International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education) „*Advances in systems, computing sciences and software engineering*”, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Springer Publ. 2005–2006, pp.99–103.
2. Šnīders A., Laizāns A. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 5th International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2006, pp.160–164.
3. Šnīders A., Laizāns A. Computer aided modelling of wastewater aeration systems, **In:** Proceedings of the 3rd International Conference “*Rural development*”, Book 2, Kaunas, November 8–10, 2007, pp. 227–231.
4. Šnīders A., Laizāns A. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 6th International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava, 2007, pp.154–158.
5. Laizāns A., Šnīders A. Simulation of cost-efficient wastewater aeration control using invariant control principle. **In:** *INMATEH 2008 – I "AGRICULTURE AND ENGINEERING – complying with the European requirements"*, International scientific conference proceedings, January 28–29, 2008, Bucharest, Romania, pp. 183–188.
6. Шнидерс А.А., Лайзанс А.Д. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. **В:** *Высокие Технологии, Фундаментальные и Прикладные Исследования, Образование*, Том 13, Сборник трудов, Под редакцией А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, 5.Международная конференция “*Исследование, разработка и применение*

высоких технологий в промышленности", Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008., pp. 384–386

7. Laizāns A., Osadčuks V., Šnīders A. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. **In:** Proceedings of *INMATEH 2008 – II "Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry"*, International scientific conference, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania, pp. 132–137.

Par rezultātiem ziņots starptautiskajās zinātniskajās konferencēs, kuras notika Latvijā, Lietuvā, Krievijā, ASV un Rumānijā.

1. Invariant Control of Wastewater aeration. 1st International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education): *Advances in systems, computing sciences and software engineering*, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA, December 11–18, 2005.
2. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. 5th International scientific conference „*Engineering for rural development*”. Jelgava, May 18–19, 2006.
3. Impact of wastewater aeration process control techniques on the energy consumption. 13th International Scientific Conference: *Research for rural development*. LLU, Jelgava, May 19–22, 2006.
4. Notekūdeņu aerācijas invariantās vadības sistēma. Izstāde Latvijas reģionu sasniegumu pārskatam un attīstībai: "*Reģionālā attīstība Latvijā 2006*". Posters Ķīpsalas izstāžu centrā 20.–22.aprīlī, Rīga, 2006.
5. Computer aided modelling of wastewater aeration systems. 3rd International Conference: *Rural development*, Kaunas, November 8–10, 2007.
6. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. 6th International scientific conference: *Engineering for rural development*. LLU, Jelgava, 2007.
7. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. 5.Международная конференция: *Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности*, Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008.
8. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. International scientific conference INMATEH 2008 – II: *Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry*, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania.
9. Round-table discussion. Wastewater treatment – experience and trends. 4th International Water Association's International Young Water Professionals Conference. Conference held at the Clark Kerr Campus Conference Center of the University of California at Berkeley, USA, from July 16 to July 18, 2008.

1. NOTEKŪDEŅU ATTĪRĪŠANAS IETAIŠU ENERGOPATĒRIŅU IETEKMĒJOŠO FAKTORU TEORĒTISKIE PĒTĪJUMI

Aerācijas nozīmi nosaka mūsdienu notekūdeņu attīrīšanas ietaisēs izmantotais bioloģiskās attīrīšanas process, kura analīze rāda, ka gan oglekļa savienojumu, gan slāpekļa un fosfora savienojumu degradācijai nepieciešams skābeklis. Izšķīdušā skābekļa piegāde atbilstošā apjomā nodrošina gan notekūdeņus attīrošo mikroorganismu metabolismu, gan arī ķīmiskā piesārņojuma degradāciju.

Lai būtu iespējams novērtēt notekūdeņu attīrīšanas ietaišu darbību ietekmējošos faktorus, tika izpētīta situācija Latvijas NAI enerģijas patēriņa tendencēs, kā arī skābekļa pārnese ietekmējošie faktori – skābekļa šķīdība notekūdeņos, un aerācijas tvertnes dinamiskie parametri, veicot to analītiskos pētījumus un modelēšanu.

1.1. Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišu darbības un energotatēriņa datu analīze

Lai noskaidrotu vadības kvalitātes un ārējās vides faktoru ietekmi uz notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energopatēriņu, tika veikta gan modernizēto, gan nmodernizēto Latvijas NAI energopatēriņa datu apstrāde un analīze. Tika analizēts piecu Latvijas NAI vidējais īpatnējais elektroenerģijas patēriņš notekūdeņu attīrīšanai ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) gan pa gadiem, gan pa mēnešiem (kopsummā 19 datu masīvi).

Dispersijas analīze uzrādīja to, ka ar 99.9% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš dažādu pilsētu NAI būtiski atšķiras pa gadiem.

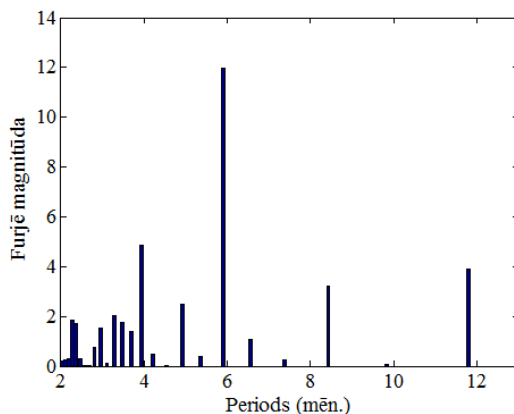
Lai noskaidrotu modernizācijas ietekmi uz ergoefektivitāti, tika veikts t -tests, sagrupējot NAI pēc modernizācijas pakāpes (Jelgavā no 2007. gada, Bauskā, Liepājā, Aizputē no 2002. gada un Gulbenē darbojās automātiskās vadības sistēmas (īpatnējā elektroenerģijas patēriņa vidējā vērtība $M=0.50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, standartnovirze $SD=0.075 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$), bet Preiļos 2005.–2009. gg., Jelgavā 2004.–2006. gg. – NAIS ar manuālo programvadību (īpatnējā elektroenerģijas patēriņa vidējā vērtība $M=0.78 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, standartnovirze $SD=0.123 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$).

Tā kā $t=5.71 > t_{krit}=2.201$ ($p=0.0001$), var secināt, ka atšķirība starp abu grupu īpatnējiem enerģijas patēriņiem ir statistiski nozīmīga, un ka rekonstruēto NAI enerģijas patēriņš ir būtiski mazāks nekā nerekonstruētājās NAI.

Lielākie elektroenerģijas patērētāji NAI ir notekūdeņu aerācijas kompresori, kuru automātiskās vadības pilnveidošana dod būtisku skābekļa koncentrācijas C_{O_2} regulēšanas kvalitātes un procesa ergoefektivitātes rādītāju uzlabojumu.

Lai noskaidrotu NAI darbības efektivitāti laika griezumā, tika veikts padziļināts rekonstruētās Gulbenes NAI ergoefektivitātes datu statistiskais pētījums. Dispersijas analīze uzrādīja to, ka ar 99.9% varbūtību var apgalvot, ka īpatnējais enerģijas patēriņš Gulbenes NAI ir atkarīgs no gada mēneša, un tam ir izteikta sezonālitate.

Datu spektrālā (Furjē) analīze uzrādīja sezonālitatei 4 un 6 mēnešu ciklā (gadalaiki), kā arī 12 mēnešu (gada) ciklā, apstiprinot īpatnējā enerģijas patēriņa sezonālo raksturu modernizētās NAI (2.att.).



2.att. Furjē analīzes rezultāti Gulbenes NAI īpatnējā enerģijas patēriņa datiem
Fig.2 Results of Fourier analysis for Gulbene WWTS specific energy consumption

Lai noskaidrotu nokrišņu un vidējo mēneša temperatūru ietekmi uz notekūdeņu apjomu un īpatnējo enerģijas patēriņu to attīrīšanai, tika veikta Gulbenes NAI datu korelāciju analīze. Cieša negatīva korelācija ($R^2 = -0.800$) konstatēta starp īpatnējo enerģijas patēriņu un notekūdeņu apjomu, rādot, ka nokrišņi atšķaida notekūdeņus, tā nodrošinot mazāku enerģijas patēriņa nepieciešamību. Toties āra gaisa temperatūra nekorelē ar notekūdeņu apjoma izmaiņām ($R^2 = -0.051$). Tajā pašā laikā starp mēneša vidējo temperatūru un īpatnējo enerģijas patēriņu ir vidēja negatīva korelācija ($R^2 = -0.316$), kas apstiprina pieņēmumu, ka temperatūras izmaiņām ir būtiska ietekme uz enerģijas patēriņu.

1.2. Skābekļa šķīdības teorētiskie pētījumi

Skābekļa šķīšana ūdenī ir fizikāls process, kuru ietekmē dažādi faktori. Lai būtu iespējams novērtēt aerācijas tvertnes dinamiku, izveidojot tās matemātisko modeli, bija nepieciešama skābekļa šķīdības analītiskā izteiksme, kas ievērtē galvenos šo procesu ietekmējošos faktoros – skābekļa koncentrāciju gaisā, ūdens temperatūras un sāļainības ietekmi, kā arī atmosfēras spiediena ietekmi.

1.2.1. Skābekļa koncentrācijas gaisā ietekme uz skābekļa šķīdību

Pētījumi par skābekļa koncentrāciju gaisā apliecina, ka tai ir sezonāls raksturs. Skābekļa koncentrācija svārstās robežās no 20.84% līdz 20.97%, minimālās vērtības sasniedzot ziemas mēnešos (BIO2 International, s.a.; Keeling, McEvoy, & Manning, 1998; Moiseeva, 1995).

Kā iemeslus šai sezonalitātei var minēt augu fotosintēzes procesa izmaiņas ziemas–vasaras sezonā, skābekļa šķīdības pieaugumu ziemas periodā, kā arī cilvēku industriālās darbības izmaiņas (skābekļa izmantošana kurināmā sadedzināšanai rudens – ziemas periodā, u.c.). Pētījumi apstiprina arī pieņēmumu par to, ka cilvēku intensīvi apdzīvotā vidē, skābekļa koncentrācija gaisā ir ievērojami mazāka, nekā neurbanizētā vidē – mežos, u.c.

Tā kā skābekļa koncentrācijas izmaiņas ir vērā ņemamas, skābekļa šķīdības analītiskajā izteiksmē ir nepieciešams ievērtēt arī šo parametru, lai izveidotu notekūdeņu aerācijas augstas kvalitātes vadības sistēmu.

1.2.2. Ūdens temperatūras ietekme uz skābekļa šķīdību

Eksperimentālie pētījumi rāda, ka atvērtas tīlpnes ūdenī ar temperatūru 21°C (vasaras režīms), parastos apstākļos ir izšķīduši 13 g·m⁻³ slāpekļa N₂, 9 g·m⁻³ skābekļa O₂, un 35 g·m⁻³ oglekļa dioksīda CO₂. (Meck, s.a.; Mack, s.a.). Mainoties ūdens temperatūrai, mainās visu gāzu, arī ūdenī izšķīdušā skābekļa, piesātinājuma līmenis (Colby, s.a.; Colt, 1984). Līdz ar temperatūras pieaugumu samazinās gaisa sastāvā esošo gāzu šķīdība ūdenī (Colt, 1984; FAO, 1998).

Maksimāli iespējamo skābekļa koncentrāciju ūdenī parasti nosaka pēc sagatavotām tabulām, kas iegūtas galvenokārt no eksperimentāliem datiem (Colt; 1984; YSI, s.a.). Analītisko formulu ir ievērojami mazāk (Truesdale, Downing, 1954; Weiss, 1970; Garcia, Gordon, 1992; Tromans, 2000; Sniders, 2003).

Veicot ūdens temperatūras ietekmes uz skābekļa piesātinājuma līmeni datu (Colt, 1984) regresijas analīzi, tika atrasta sekojoša sakarība:

$$C_s(\Theta) = 14.208 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (1)$$

Šī eksponenciālā izteiksme daudz atbilstošāk apraksta procesa fizikālo jēgu ($R^2 = 0.997$), tajā pašā laikā ļauj veikt vienkāršākas matemātiskās operācijas kopējā skābekļa šķīdības izteiksmes izveidei, tā radot iespēju izveidot pilnīgāku skābekļa šķīdības daudzfaktoru modeli.

1.2.3. Notekūdeņu sāļainības ietekme uz skābekļa šķīdību

Notekūdeņi ir dažādu sāļu šķīdums ūdenī kopā ar suspendētām nešķīstošām daļiņām un dzīvjiem organismiem. Pētījumi rāda, ka maksimālo skābekļa piesātinājuma līmeni notekūdeņos nosaka arī tajos izšķīdušo sāļu daudzums un veids – pieaugot sāļainībai, samazinās skābekļa piesātinājuma līmenis (Colt, 1984). Tāpēc vienkāršotos aprēķinos pieņem īpašu bezdimensiju koeficientu, kuram būtu jāievērtē visu ārējo faktoru iedarbību un jāparāda notekūdeņu fizikālo īpašību atšķirību no tīra ūdens (YSI, s.a.). Tomēr šāda pieeja neļauj novērtēt izmaiņas, kas notiek notekūdeņos dažādu sāļu sastāva un koncentrācijas dēļ, kā arī neievērtē konkrētas NAI specifiku.

Ievērtējot notekūdeņu sāļainību, gūta modificēta skābekļa šķīdību aprakstoša sakarība (pēc Mack, s.a.; Han, 2002) izmantošanai matemātiskajā modelī:

$$C_s = C_0 \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^n K_i c_i\right)^{-1}, \quad (2)$$

kur C_0 – skābekļa koncentrācija tīrā ūdenī, g·m⁻³,

i – jona kārtas skaitlis,

K_i – semiempīriskā i -tā jona konstante,

c_i – i -tā jona molaritāte ūdens šķīdumā,

C – skābekļa koncentrācija ūdenī, kurā izšķīdināti i joni, g·m⁻³.

1.2.4. Atmosfēras spiediena un temperatūras kompleksā iedarbe uz skābekļa šķīdību.

Pētījumi (Colt, 1984) rāda, ka atmosfēras gaisa spiediens ietekmē skābekļa šķīdību – līdz ar spiediena samazinājumu samazinās skābekļa šķīdības piesātinājuma līmenis.

Atmosfēras gaisa spiediena ietekmi uz skābekļa šķīdību nosaka modificēta Henri izteiksme:

$$C_x = p_x \cdot k_H^x = p_x \cdot A \cdot N_A \cdot \alpha^x, \quad (3)$$

kur C_x – gāzes šķīdība, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

k_H^x – Henri konstante skābeklim, $(\text{g}/\text{m}^3) \cdot \text{Pa}^{-1}$;

p_x – skābekļa parciālais spiediens, Pa;

N_A – Avogadro skaitlis, mol^{-1} ;

A – skābekļa blīvumu ievērtējošs koeficients;

α^x – Bunzena koeficients skābeklim, $\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$.

Bunzena koeficientu skābeklim aprakstošais vienādojums tika atrasts, veicot literatūrā pieejamo datu (Weiss, 1970) nelineārās regresijas analīzi:

$$\alpha = 4.91 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (4)$$

Gāzes spiediena ietekmi uz tās šķīdību nosaka modificēta Henri likuma izteiksme (Broecker, Peng, 1982; Sawyer, McCarty, 1978):

$$C_1 \cdot p_1^{-1} = C_2 \cdot p_2^{-1}, \quad (5)$$

kur C_1 un C_2 – gāzes šķīdības, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

p_1 un p_2 – gāzes spiedieni, Pa.

Apvienojot atmosfēras spiediena un temperatūras iedarbes izteiksmes, tika iegūta to komplekso iedarbi aprakstoša izteiksme:

$$C = p_x \cdot A \cdot N_A \cdot \alpha^x \cdot 4.91 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (6)$$

1.2.5. Notekūdeņu blīvuma ietekme

Aerācijas tvertnē gaisa padevei ir jābūt ar paaugstinātu spiedienu, ja aerācija notiek no tvertnes apakšas. Lai aerācijas sistēmas gaisa kompresors varētu pārvarēt ūdens pretspiedienu aerācijas tvertnē, tam jāattīsta spiediens, kas papildus atmosfēras spiedienam nedaudz pārsniedz ūdens spiedienu dziļumā h . Ūdens blīvuma izmaiņa ietekmē aerācijas kompresoram attīstāmā spiediena lielumu. Viena no fizikālajām īpašībām, ar kurām ūdens atšķiras no citiem šķīdumiem, ir tā blīvuma nelineārās izmaiņas temperatūras iespaidā. Šo ietekmi neapskata neviens no piejamajiem skābekļa šķīdības modeļiem.

Sakarība, kas apraksta aerācijas kompresora attīstāmā spiediena atkarību no aeratoru iegremdēšanas dziļuma un ūdens temperatūras, un ievērtē ūdens blīvuma nelinearitāti, ir sekojoša:

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h = (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h, \quad (7)$$

kur p_h – ūdens staba spiediens, Pa;

ρ – ūdens blīvums, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

h – ūdens staba augstums (aerācijas difuzoru iegremdēšanas dziļums), m;
 g – gravitācijas konstante, $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

1.3. Skābekļa šķīdības matemātiskais modelis

Modeļa izveidei tika izmantota dažādu faktoru ietekmi ievērtējoša sakarība, kas ievērtē gaisa spiediena un ūdens temperatūras ietekmi uz skābekļa šķīdību ūdenī – autora izveidots skābekļa šķīdības matemātiskais modelis:

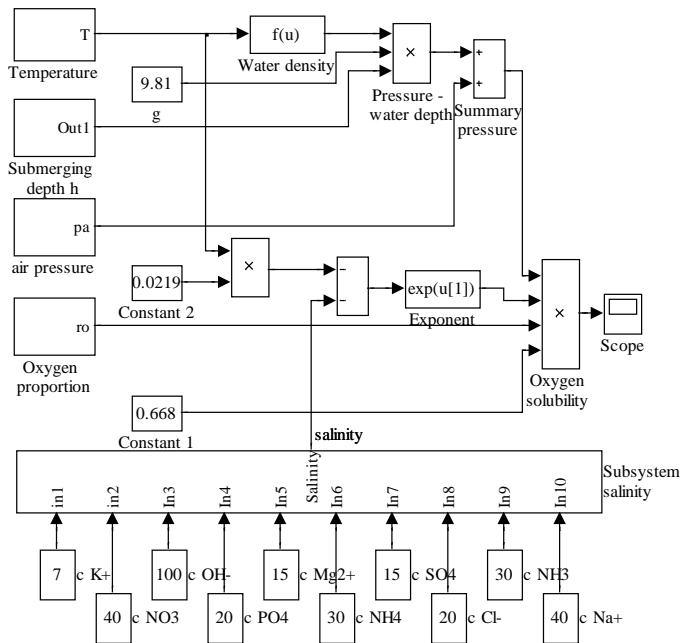
$$C_s = C(r_{O_2}, p_a, \Theta, K, c_i, h) = \frac{0.668 \cdot r_{O_2} \cdot \left(p_a + (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3} \right)}{\exp\left(\sum K_i c_i + 0.0219 \cdot \Theta\right)}, \quad (8)$$

kur r_{O_2} – skābekļa proporcija gaisā;

p_a – atmosfēras spiediens.

Šī izteiksme apraksta dažādu faktoru kompleksu iedarbi uz skābekļa šķīdību notekūdeņos. Tā ietver gan notekūdeņu temperatūras, gan atmosfēras spiediena, gan skābekļa koncentrācijas gaisā, gan aeratoru iegremdēšanas dziļuma, gan notekūdeņos izšķīdušo sāļu koncentrācijas un jonu sastāva ietekmi uz skābekļa šķīdību notekūdeņos.

Skābekļa šķīdības izmantošanai aerācijas tvirtnes dinamikas pētījumos tika izveidots izteksmi (8) aprakstošs modelis Matlab programmas Simulink apakšprogrammā (3.att.).



3.att. Skābekļa šķīdības virtuālais modelis
 Fig.3 Oxygen solubility virtual model

1.4. Skābekļa pārneses statistiskais modelis

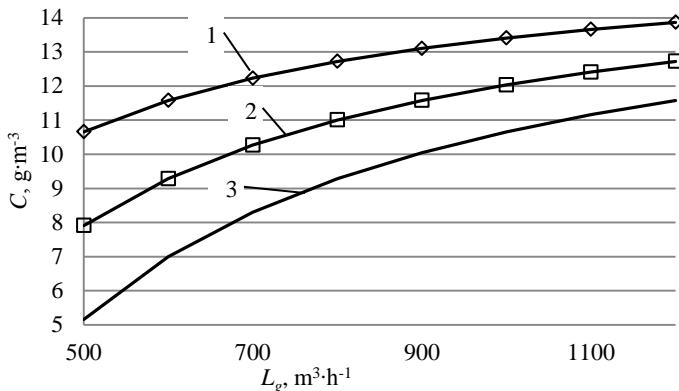
Izmantojot pētījumu rezultātus par skābekļa pārneses efektivitāti notekūdeņu aerācijas procesā (Šnīders, 2003), iegūta precizēta izteiksme gaisa pūtēju nepieciešamā ražīguma L_g aprēķināšanai:

$$L_g = \frac{Q \cdot (L_a - L_l)}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 (C_s - C)} = \frac{q}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (C_s - C)}, \quad (9)$$

kur Q – notekūdeņu pieplūdes daudzums, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
 L_a – skābekļa patēriņš (BSP+KSP) notekūdeņu pilnīgai attīrīšanai, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
 L_l – paliekošais (BSP+KSP), $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
 η_o – gaisa skābekļa izmantošanas koeficients;
 k_1 – korekcijas koeficients pēc gaisa difuzoru iegremdēšanas dziļuma h ;
 k_2 – korekcijas koeficients pēc notekūdeņu temperatūras Θ , kas ievērtē notekūdeņus attīrošo mikroorganismu aktivitāti;
 k_3 – korekcijas koeficients pēc difuzoru blīvuma σ , un gaisa padeves caur vienu difuzoru λ , $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
 k_4 – korekcijas koeficients, kas ievērtē aktīvo dūņu sastāvu, konkrētā pētījumā, uzskatot, ka aktīvo dūņu aktivitāte ir optimāla, $k_4=1$;
 C_s – skābekļa šķīdība, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
 C – skābekļa koncentrācija notekūdeņos, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Lai pārbaudītu mainīgo parametru ietekmi uz skābekļa koncentrāciju C , tika veikta datormulācija, izmantojot iegūto statistiskā matemātiskā modeļa izteiksmi (9) Preiļu NAI datus.

Modelēšanas rezultātu (4.att.) analīze liecina par to, ka izšķīdusā skābekļa koncentrācija C notekūdeņos nelineāri pieaug, ja pieaug gaisa padeve L_g , un nelineāri samazinās, ja pieaug slodze q .



4.att. Skābekļa koncentrācijas C atkarība no aerācijas intensitātes L_g , pie dažādas slodzes q

1– $q=100 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$; 2– $q=150 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$; 3– $q=200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig.4 Oxygen concentration C dependence on aeration intensity, L_g , under different loads q

1– $q=100 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$; 2– $q=150 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$; 3– $q=200 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$

Sakarība $C=f(L_g)$ ir nelineāra, un var tikt linearizēta tikai šauros apgabalos. Līdz ar to nepieciešams nepārtraukts pārvades koeficientu pārrēķins, lai nodrošinātu modeļa atbilstību reāliem procesiem aerācijas tvertnē.

1.5. Skābekļa pārnese procesa nestacionārais matemātiskais modelis

Skābekļa pārnese nestacionāro dinamisko procesu aerācijas tilpnē apraksta, pieņemot, ka gaisa sadale pa visu aerācijas laukumu ir vienmērīga un izšķīdušā skābekļa koncentrācija aerācijas tilpumā ir izlīdzināta. Tad iegūst skābekļa pārnese bilances vispārīgo vienādojumu aerācijas tvertnē (Sniders, Skrastins, 1995; Sniders 1997):

$$T_a \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a \Delta L_g, \quad (10)$$

kur T_a – aerācijas tilpnes laika konstante, min;
 K_a – aerācijas tilpnes statiskais pārvades konstante, $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 ΔC – skābekļa koncentrācijas izmaiņa, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;
 ΔL_g – kompresora ražīguma izmaiņa, $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$.

Aerācijas tilpnes laika konstanti T_a , kas raksturo pārejas procesa inerci, var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$T_a \approx \frac{V_a}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}, \quad (11)$$

kur V_a – aerācijas tvertnes tilpums, m^3 .
Aerācijas tilpnes pārvades koeficientu K_a , kas raksturo tās jutību pret regulējošo iedarbi L_g , var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$K_a = \frac{C}{L_g} = \frac{C_s}{L_g} - \frac{q}{L_g^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (12)$$

Aerācijas tvertnes slodzes bilances vienādojumu apraksta sekojoša izteiksme:

$$T_q \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q \Delta q, \quad (13)$$

kur T_q – piesārņojuma pārejas procesa laika konstante, min;
 K_q – slodzes (piesārņojuma) pārvades koeficients, $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 ΔC – skābekļa koncentrācijas izmaiņa, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;
 Δq – piesārņojuma izmaiņa, $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$.

Piesārņojuma pārejas procesa laika konstanti T_q , kas raksturo piesārņojuma q pārejas procesa inerci, var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$T_q \approx \frac{V_a \cdot C}{q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (14)$$

Aerācijas tilpnes slodzes statisko pārvades koeficientu K_q , kas raksturo tās jutību pret slodzi q , var aprēķināt, izmantojot sekojošu izteiksmi:

$$K_q = \frac{\Delta C}{\Delta q} = \frac{1}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (15)$$

Inerces faktoru un jutības faktoru modelēšana un to analītiskie pētījumi rāda, ka šie faktori ir nelineāri. Tajā pašā laikā strauju slodzes perturbāciju gadījumā aerācijas tvertnes dinamiskie parametri var ļoti būtiski atšķirties no lieneārizētajā modelī pieņemtajiem lielumiem.

Tādējādi iegūts apstiprinājums hipotēzei, ka aerācijas tvertne ir nelineārs nestacionārs objects ar mainīgu jutību un inerci.

Tā kā procesa regulēšanas laikā gan T_a , gan K_a , gan T_q un K_q skaitliskās vērtības mainās, ir nekorekti tos saukt par konstantēm. Tiek ierosināts turpmāk saukt T_a par aerācijas tvertnes inerces faktoru jeb rādītāju, un K_a par aerācijas tvertnes jutības faktoru jeb rādītāju. Līdzīgi tiek ierosināts turpmāk saukt T_q par slodzes inerces faktoru jeb rādītāju, un K_q par slodzes jutības faktoru jeb rādītāju.

Aerācijas tvertnes dinamiskos pārejas procesus pa regulējošās iedarbes L_g un perturbācijas iedarbes q ietekmes kanālu apraksta pirmās kārtas nelineāru un nestacionāru diferenciālvienādojumu sistēma, kura ievērtē gan tās statiskās, gan dinamiskās īpašības:

$$\begin{cases} T_a(L_g) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a(L_g, q) \cdot L_g \\ T_q(q) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q(L_g) \cdot \Delta q \end{cases} \quad (16)$$

Izmantojot Laplasa transformācijas paņēmieni, tiek iegūta aerācijas tvertnes pārvades funkcija:

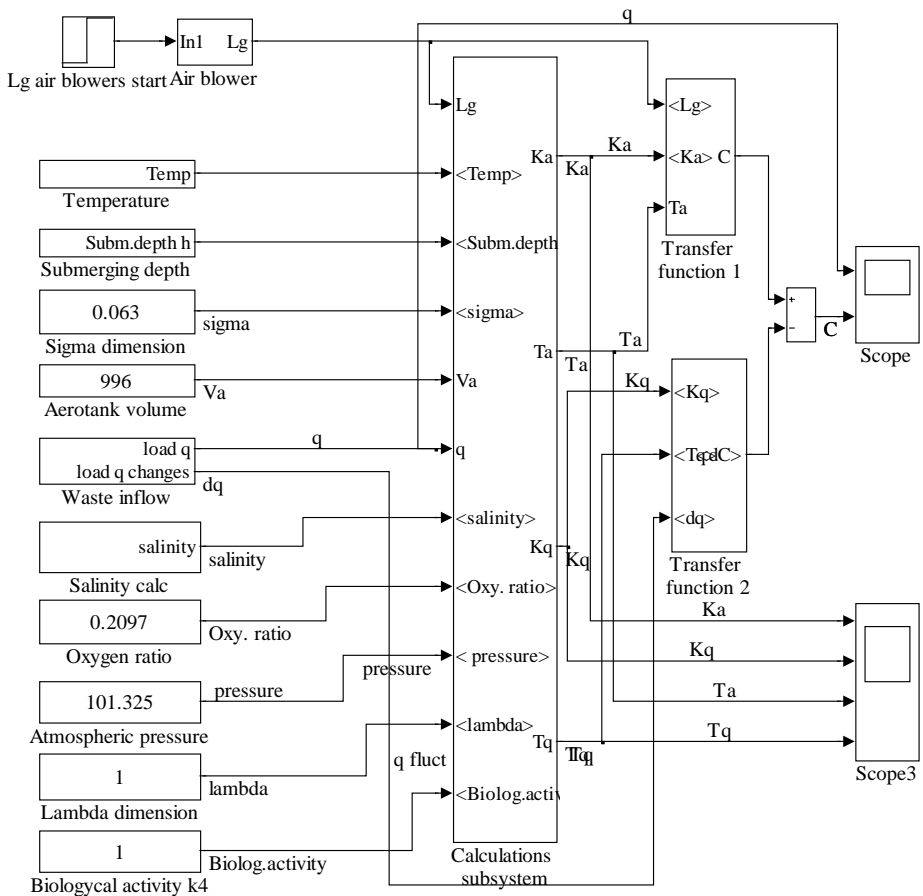
$$\begin{cases} W_a(s) = \frac{C_{ST}(s)}{L_g(s)} = \frac{K_a(L_g, q)}{T_a(L_g) \cdot s + 1}, \\ W_q(s) = \frac{\Delta C(s)}{\Delta q(s)} = \frac{K_q(L_g)}{T_q(L_g) \cdot s + 1} \end{cases} \quad (17)$$

kur s – Laplasa arguments, s^{-1} .

Ievērtējot regulējošās iedarbes un perturbācijas jutības un inerces rādītāju mainīgo dabu, šo pārvades funkciju var izmantot aerācijas tvertnes virtuālā modeļa izveidei un vadības principa pārbaudei.

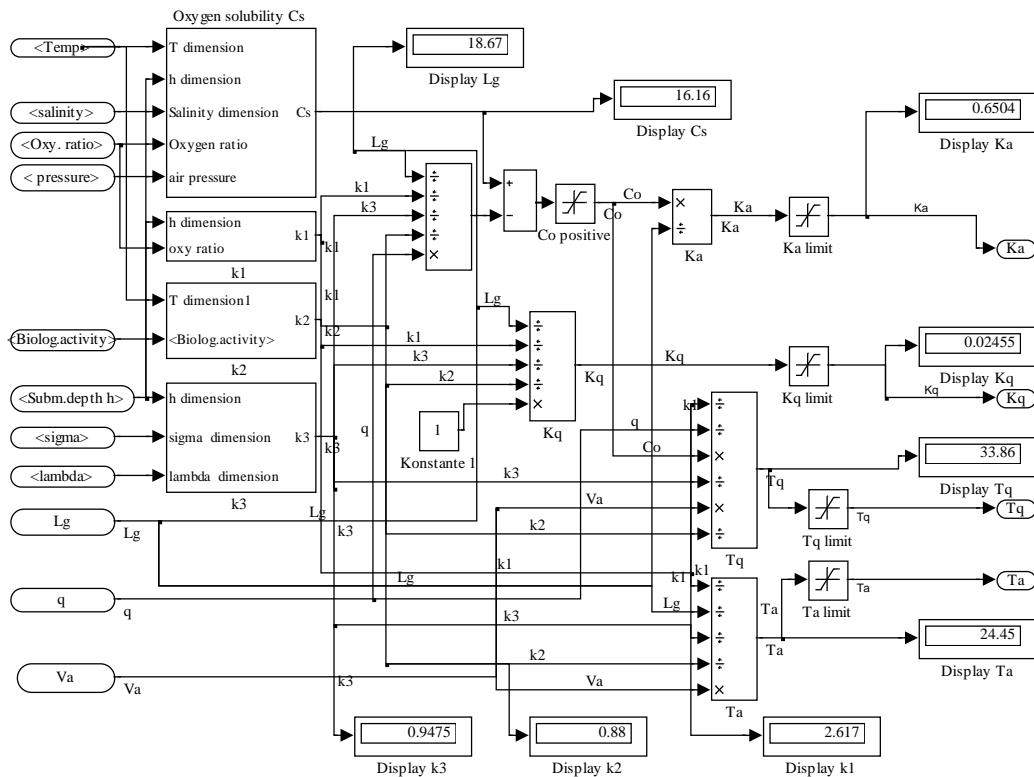
Modelēšanai tika izmantots Matlab Simulink vidē izveidots modelis (5.att.). Blokskārtā redzami kreisajā pusē novietotie bloki nodrošina NAI parametru un perturbāciju ievadi modelī – tajos ir gan nemainīgie aerācijas tvertnes konstruktīvie un tehnoloģiskie parametri, gan ārējās vides parametri – perturbācijas, kas ietekmē skābekļa šķīdību.

Bloks „Calculation subsystem” (6.att.) nodrošina aerācijas tvertnes matemātiskā modeļa simulāciju, bet bloki „Transfer function1” un „Transfer function2” – aerācijas tvertnes pārvades funkcijas aprēķinu simulācijas procesā nepārtrauktā režīmā.



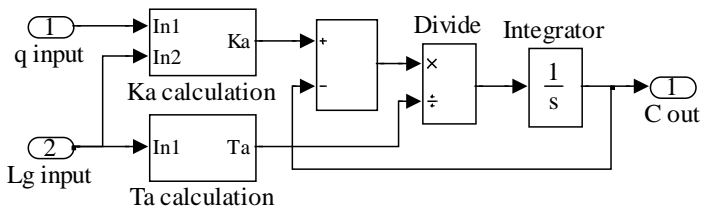
5.att. Aerācijas tvertnes statisko un dinamisko koeficientu aprēķina blokshēma
Fig.5 Block diagram of aerotank static and dynamic coefficients calculation

Modeļa būtiskā iezīme ir tā, ka tas ir universāls – ar to var modelēt gan statiskos, gan dinamiskos koeficientus. Statiskos pārvades koeficientus iegūst, modelī ievadot inerces rādītāju T_q un T_a vērtības $T_q=T_a=0$.



6.att. Aerācijas tvertnes simulācijas modelis – subsistēma „Calculation subsystem” inerces un jutības koeficientu aprēķināšanai
Fig.6 Aerotank simulation model – subsystem „Calculation subsystem” for inertia and sensitivity coefficients calculation

Automātiskās vadības modelēšanā pašreiz lietojamie pārvades funkcijas realizācijas paņēmieni neatļauj tiešā veidā mainīt inerces un jutības rādītāju skaitliskās vērtības, jo tiek uzskatīts, ka tie ir nemainīgi lielumi. Tā kā tika konstatēta šo rādītāju atkarība no regulējošās iedarbes un perturbācijām, analītisko pētījumu rezultātā tika izveidots inovatīvs pārvades funkcijas ar mainīgiem koeficientiem simulācijas bloks. Regulējošās iedarbes pārvades funkcijas $W_a(s)$ realizācijas piemērs parādīts 7.attēlā.



7.att. Pārvades funkcija $W_a(s)$ ar nestacionāriem inerces un jutības faktoriem

Fig.7 Transfer function $W_a(s)$ with unstationary inertia and sensitivity ratios

Pa informācijas ievades kanāliem „q input” un „Lg input” pārvades funkcijā tiek ievadītas piesārņojuma un aerācijas kompresora momentānā ražīguma vērtības, blokos „Ka calculation” un „Ta calculation” notiek jutības un inerces faktoru aprēķins, un tālāk tiek realizēta pārvades funkcija, izejā iegūstot skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē C vērtību. Līdzīgi tiek realizēta arī pārvades funkcija sodzes kanālam $W_q(s)$.

1.6.Skābekļa pārnese modeļu salīdzinošie pētījumi

Skābekļa pārnese procesa dinamiskā un statiskā modeļa salīdzinošais pētījums ir nepieciešams, lai noskaidrotu, kā viena vai otra modeļa izvēle automātiskās regulēšanas sistēmā ietekmē regulēšanas kvalitāti un vadības ierīces parametrus.

Salīdzinošā pētījuma veikšanai tika izveidots simulācijas modelis, kurā līdzās nestacionārajam dinamiskajam modelim ar mainīgiem inerces un jutības faktoriem tika izveidots modelis ar statiskiem inerces un jutības faktoriem – stacionārais modelis. Modelī ar statiskiem jutības un inerces faktoriem tika ievietotas inerces un jutības faktoru K_a , K_q , T_a un T_q skaitliskās vērtības, kuras izveidojas dinamiskajā modelī, kad tas ir nostabilizējies ($C=\text{const}$).

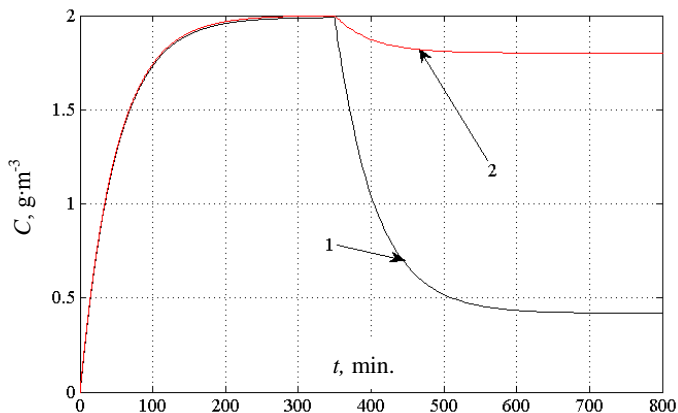
Konkrētajā modelī tika izmantoti Preiļu NAI tehniskie un tehnoloģiskie parametri un sekojoši darbības režīmi:

- iestatītā izšķīdušā skābekļa koncentrācija $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;
- modelim ar statiskiem koeficientiem tiek iestatītas sekojošas to skaitliskās vērtības:
 - $K_a=0.2153(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 - $T_a=49.91 \text{ min}$;
 - $K_q=0.0491 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 - $T_q=3.183 \text{ min}$.

- aerācijas kompresoru ražīgums laika posmā no 0 līdz 350 minūtēm (stabilizācija) $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (asinchronā elektrodzinēja barošanas sprieguma frekvence 50 Hz);
- pārslēgšanās režīms 350.minūtē;
- aerācijas kompresoru ražība laika posmā virs 350 minūtēm (pēc stabilizācijas) $L_g=1008 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (90% no maksimālās ražības, ko nodrošina vadāms frekvenču pārveidotājs asinchronā elektrodzinēja piedziņā ar frekvenču diapazonu 20..50 Hz).

Modelēšanas rezultāti (8.att.) rāda, ka stacionārajā modelī skābekļa koncentrācija ir samazinājusies proporcionāli aerācijas kompresora ražīgumam. Šī parametra stabilizējusies vērtība ir $C=1.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (10% samazinājums pret sākuma vērtību).

Turpretī nestacionārajā modelī skābekļa koncentrācijas stabilizācija notiek pie ievērojami zemāka līmeņa – $C=0.42 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (79% samazinājums pret sākuma vērtību).



8.att. Salīdzinošā pētījuma rezultāti, aerācijas kompresora ražīguma samazinājums $\Delta L_g = -10\%$ modelēšanas 350.min.

1–nestacionārs modelis; 2– stacionārs modelis ar statiskiem jutības un inerces rādītājiem

Fig.8 Results of comparison, decrease of air blower by

$\Delta L_g = -10\%$ at simulation time $t = 350$.min.

1–unstationary model; 2– stationary model with static sensitivity and inertia ratios

Modelēšanas rezultāti apstiprina pieņēmumu, ka statistiskais skābekļa pārneses process būtiski atšķiras no reālajiem aerācijas tvertnē notiekošajiem dinamiskajiem nestacionārajiem procesiem, un ir nepieciešama dinamiski mainīgu jutības un inerces faktoru ieviešana vadības procesa nodrošināšanas matemātiskajā procesā, kas savukārt pieprasa arī būtiskas izmaiņas aerācijas kompresoru vadības procesā.

2.NOTEKŪDEŅU APSKĀBEKĻOŠANAS EKSPERIMENTĀLIE PĒTĪJUMI

Eksperimentālie pētījumi tika veikti Preiļu NAI. Galvenais eksperimentālo pētījumu uzdevums bija noskaidrot aerācijas tvertnes dinamisko reakciju uz

perturbācijām, un pārbaudīt analītiskā nestacionārā modeļa atbilstību reāliem procesiem notekūdeņu aerācijas tvertnē.

Tika veikti divi mērījumu cikli ar viena gada nobīdi, mērot skābekļa koncentrāciju aerācijas tvertnes izplūdē.

Mērīšanai tika izmantots firmas „Lutron” digitālais skābekļa mērītājs DO-5510. Pirms eksperimentālā pētījuma uzsākšanas tika veikta šī mēraparāta dinamisko īpašību noteikšana, un konstatēts, ka tā reakcijas inerces ir vairāk kā par kārtu mazāka salīdzinājumā ar mērāmā parametra reakcijas inerci, tāpēc pieļaujama tā izmantošana.

Mērījumos iegūto datu apstrādes rezultātā tika iegūtas skābekļa koncentrācijas izmaiņas aprakstošas izteiksmes pie ieslēgta un izslēgta aerācijas kompresora (1.tabula).

To inerces rādītāju vērtības atšķirās, bet attiecība starp ieslēgto un izslēgto stāvokli saglabāja tendenci, kas nav raksturīga pirmās kārtas aperiodiskam posmam, jo laika konstante aerācijas kompresora ieslēgtā stāvoklī abos mērījumos bija ievērojami (2.01-2.76 reizes) lielāka, nekā aerācijas kompresora izslēgtā stāvoklī, tā apstiprinot aerācija stvertnes kā nestacionāra dinamiska objekta īpašības.

1.tabula.

Preiļu NAI skābekļa koncentrācijas izmaiņas aprakstošās izteiksmes
Equations describing oxygen concentration changes in Preiļi WWTS

	<i>Aerācijas kompresora darba režīms</i> <i>(Operation principle of air blower)</i>	
	Aerācijas kompresors ieslēgts (Air blower switched on)	Aerācijas kompresors izslēgts (Air blower switched off)
1.mērījumu cikls (First measurement cycle, 2006.g.)	$C_0 = 11.74 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{67.5}\right)\right)$	$C_0 = 11.86 \cdot \exp\left(-\frac{t}{24.5}\right)$
2.mērījumu cikls (Second measurement cycle, 2007.g.)	$C_0 = 8.66 \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{39.5}\right)\right)$	$C_0 = 10.66 \cdot \exp\left(-\frac{t}{19.64}\right)$

**3.EKSPERIMENTĀLO UN TEORĒTISKO MODEĻU
SALĪDZINĀŠANA**

Tika veikta modelēšana, un aprēķināta dinamiskā matemātiskā modeļa un eksperimentālo datu līknes sakritība, izmantojot vidējās kvadrātiskās kļūdas metodi. Modelēšanas laikā tika atrasts tāds notekūdeņu piesārņojuma līmenis, pie kura sakrīt dinamiskā matemātiskā modeļa un eksperimentālo datu līknes piesātinājuma līmenis – $8.66 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Modelēšanai tika izmantoti reāli Preiļu NAI dati – gan aerācijas kompresoru ražīgums $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, gan aerācijas tvertnes konstruktīvie un tehnoloģiskie parametri ($\lambda=1\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $\sigma=0.063$, $h=4 \text{ m}$), gan ārējās vides apstākļi, kas bija raksturīgi eksperimenta dienai ($\Theta=+10^\circ\text{C}$, $p_g=101.325 \text{ kPa}$, $r_{O_2}=0.2097$).

Piesārņojuma līmenis, pie kura sakrita abu modeļu piesātinājuma līmeņi, bija $q=189.8 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$, kas atbilst Preiļu NAI BSP un ĶSP līmenim. Modelēšanas beigās stabilizētās jutības un inerces rādītāju vērtības ir sekojošas: aerācijas tvertnes jutības rādītājs $K_a=0.4645 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, inerces rādītājs $T_a=37.33 \text{ min.}$, slodzes jutības rādītājs $K_q=0.0375 \text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, slodzes inerces rādītājs $T_q=31.83 \text{ min.}$

Vidējā kvadrātiskā kļūda, kas tika iegūta, simulācijas laikā nepārtraukti aprēķinot abu datu masīvu vidējo kvadrātisko vērtību un aprēķinot to momentāno vērtību starpību, nepārsniedz $\Delta C_{rms}=0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2.1% no laikā $t=60 \text{ min.}$ momentānās amplitūdas $C=7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$), kas liecina par ciešu sakarību starp abiem datu masīviem, tādējādi apliecinot izveidotā matemātiskā modeļa atbilstību aerācijas tvertnē notiekošiem skābekļa pārnese procesiem.

4.AERĀCIJAS KOMPRESORA VADĪBAS MODELĒŠANA UN OPTIMIZĀCIJA

Pētījumi pierāda, ka NAIS ir nestacionāra dinamiska sistēma, kuru ietekmē daudzi mainīgi ārējās vides un iekšējie faktori. Tādēļ var izvirzīt hipotēzi, ka optimālais NAIS vadības princips kvalitatīvas un energoefektīvas aerācijas nodrošināšanai ir aerācijas kompresoru vadība, izmantojot asinhrono elektrdzinēju piedziņu ar vadāmiem frekvenču pārveidotājiem, kura vadību nodrošina mikrokontrollers, kas kā atgriezeniskās saites signālu par aerācijas tvertnē notiekošajiem procesiem lieto izšķīdušā skābekļa koncentrāciju un tās izmaiņas dinamiku. Šīs hipotēzes pārbaudei tika veikta aerācijas tvertnes kompresora elektropiedziņas vadības procesa modelēšana ar mērķi atrast optimālu tehnisku un ekonomisku vadības principu.

Optimālu NAIS darbību nosaka minimizētas izmaksas, lai nodrošinātu nepieciešamo iestatīto izšķīdušā skābekļa līmeni attīrītajos notekūdeņos, un minimāls noviržu līmenis no iestatītās skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē pie dinamiski mainīgām slodzes perturbācijām.

Aerācijas tvertnes matemātiskais modelis ar mainīgiem pārvades koeficientiem un mainīgiem inerciālajiem rādītājiem, kuri tiek pārēķināti atbilstoši slodzes un gaisa padeves izmaiņām, tika izmantots dažādu aerācijas kompresoru vadības principu salīdzināšanai un vadības kvalitātes novērtēšanai.

Simulācijas režīmā mainīgais lielums ir piesārņojuma līmenis ielūstošajos notekūdeņos q . Sākuma piesārņojums tika pieņemts $q=305 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, un modelēšanas laikā $t=1440 \text{ min}$ tika modelētas piesārņojuma svārstības – gan 6 stundu izmaiņas (piesārņojuma svārstības dienas režīma dēļ – piesārņojuma pieaugums laikā no 6:00 līdz 9:00, laikā no 12:00 līdz 14:00 un laikā no 18:00 līdz 20:00 ar piesārņojuma samazinājumu starplaiķos), gan 24 stundu piesārņojuma atkārtošāns (darba dienas režīms), gan arī kvazinejaušas piesārņojuma svārstības dienas gaitā (atkārtošāns

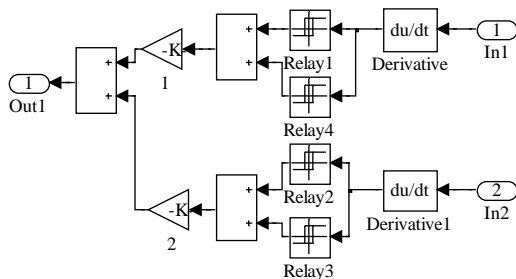
periods 30 min). Svārstību (izmaiņu) amplitūda visiem svārstību režīmiem ir 10% no sākuma piesārņojuma.

Simulācijā pielietotie vadības principi:

- bez atgriezeniskās saites:
 - nepārtraukta kompresoru darbība;
 - divu kompresoru darbība (viens kompresors nodrošina jaukšanu un aerācijas minimumu, otrs ieslēdzas maksimuma periodos).
- ar atgriezenisko saiti (skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnes izplūdē):
 - divu kompresoru darbība (viens kompresors nodrošina jaukšanu un aerācijas minimumu, otrs ieslēdzas maksimuma periodos);
 - aerācijas kompresoru piedziņa, izmantojot vadāmus frekvenču pārveidotājus un PID vadību;
 - aerācijas kompresoru piedziņa, izmantojot vadāmus frekvenču pārveidotājus un PID/kvaziinvariances vadību.

Salīdzināšanas kritērijs – skābekļa koncentrācijas atbilstība iestatītajam $C = 2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

Lai pārbaudītu kombinētās PID/kvaziinvariantās vadības darbības kvalitāti, tika izveidots kvaziinvariantes vadības simulācijas bloks (9.att.), kura ieejā tiek izmantots gan skābekļa koncentrācijas signāls, gan notekūdeņu pieplūdes signāls (simulācijā ņemts no piesārņojuma izmaiņas bloka).

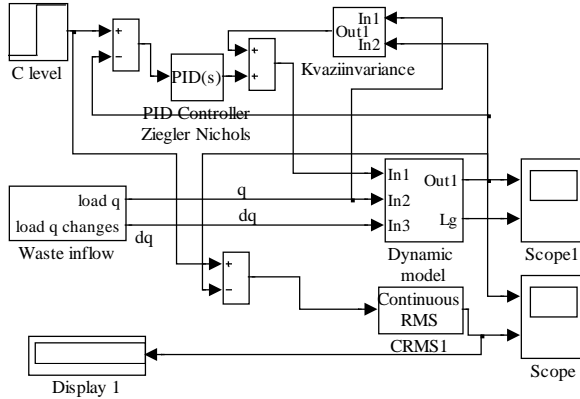


9.att. Kvaziinvariances vadības signālu formējošā moduļa blokskāme

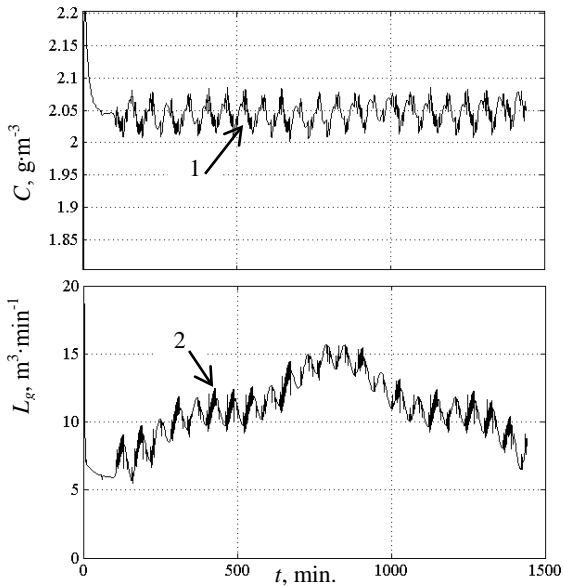
Fig.9 Quasiinvariant signal simulation model

Kvaziinvariances blokā notiek notekūdeņu pieplūdes intensitātes signāla un skābekļa koncentrācijas signāla diferenciacija, ļaujot konstatēt šo signālu izmaiņas ātrumu. „Relay” bloki ļauj iestatīt nostrādes līmeni, pie kura izmainās izejas signāls, kurš tiek padots uz summatoru, kā arī šī izejas signāla līmeni. Iestatot nostrādes un izejas signālu līmeņus, tika ņemts vērā eksperimentos un iepriekšējās simulācijās iegūtā informācija par aerācijas tvertnes dinamiku.

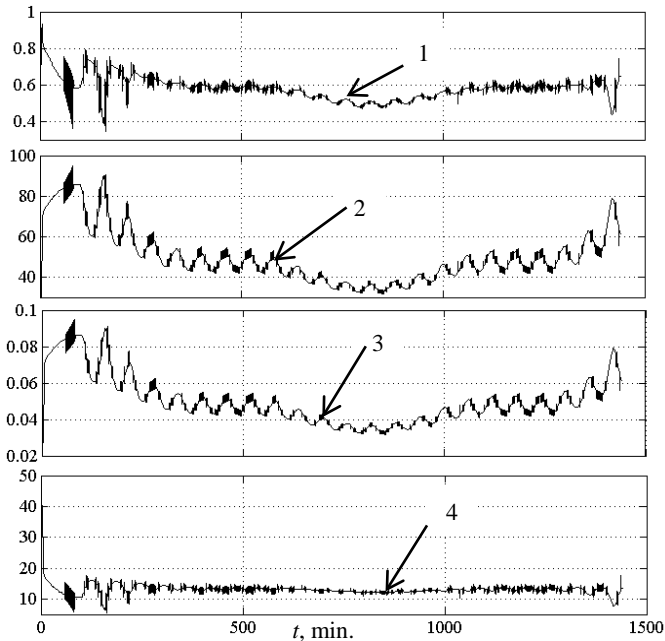
Simulācijas blokskāme ar kvaziinvariances bloku parādīta 10.attēlā, un simulācijas rezultāti –11.attēlā, inerces un jutības rādītāju izmaiņas – 12.attēlā.



10.att. NAI aerācijas kompresoru vadības modelis, lietojot kombinēto PID/kvaziinvariances vadību
Fig.10 WWTS air blower control system model using PID/quasiinvariant control



11.att. Simulācijas rezultāti, lietojot PID/kvaziinvariances vadību
 1 – skābekļa koncentrācija aerācijas tvertnē C ; 2 – aerācijas kompresora ražīgums L_g
Fig.11 Results of simulatin using PID/quasiinvariant control
 1 – oxygen concentration C in aeration tank; 2 – air blower intensity L_g



12.att. Inerces un jutības rādītāju izmaiņas, lietojot PID/kvaziinvariances vadību

1 – K_w ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$; 2 – T_a min., 3 – K_q ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$, 4 – T_q min.

Fig.12. Inertia and sensitivity ratios, using PID/quasiinvariant control

1 – K_w ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$; 2 – T_a min., 3 – K_q ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$, 4 – T_q min.

Simulācijas laikā, mainoties slodzei q , mainās aerācijas kompresoru darbība, un vienlaicīgi izmainās aerācijas tvertnes jutības un inerces rādītāji. Aerācijas tvertnes jutības rādītāja K_a izmaiņas diapazons bija robežās no 0.3 līdz 0.95 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$, tvertnes inerces rādītāja T_a izmaiņas diapazons bija robežās no 35 līdz 95 min, slodzes jutības rādītāja K_q izmaiņas diapazons bija robežās no 0.035 līdz 0.095 ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) \cdot ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) $^{-1}$, un slodzes inerces rādītāja T_q izmaiņas diapazons bija robežās no 5 līdz 9 min.

Pielietojot PID/kvaziinvarianto vadību, noviržu vidējā kvadrātiskā vērtība skābekļa koncentrācijai $\Delta C_{rms}=0.067\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ – ievērojami zemāka nekā visiem citiem pielietotajiem automātiskās vadības principiem.

Veikto simulāciju analīze liecina par to, ka PID/kvaziinvariantās vadības princips vislabāk spēj vadīt aerācijas kompresora darbu dinamiski mainīgā nestacionārā vidē ar mainīgiem jutības un inerces rādītājiem, nodrošinot augstu regulēšanas kvalitāti un mazu novirzi no iestatītās nepieciešamās skābekļa koncentrācijas aerācijas tvertnē.

Aerācijas kompresoru vadības principu salīdzināšanai pēc viena no optimizācijas kritērijiem – izmaksām, tika izveidota inovatīva operatīvo elektroenerģijas izmaksu aprēķina izteiksme nepārtrauktam procesam:

$$A = I_A \cdot a_A + B + \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot b(t) dt, \quad (17)$$

kur A – kopējās elektroenerģijas izmaksas laika periodā t_2-t_1 , LVL;
 I_A – aerācijas kompresoru aizsardzības ievadaizsardzības aparātūras nominālā strāva, A;
 a_A – maksa par ievadaizsardzības aparāta strāvas lielumu, LVL/A/gadā;
 B – maksa par pieslēgumu, LVL/gadā;
 $P(t)$ – aerācijas kompresoru momentānā jauda, kW;
 $b(t)$ – samaksa par patērēto elektroenerģiju konkrētā laikā, LVL·kW⁻¹·h⁻¹.

Izteiksme ievērtē gan enerģijas piegādātāja noteiktos maksājumus (tarifu plānus T6, T& un T8 (Latvenergo, 2011)) par pieslēguma izveidošanu un aizsardzību, kas parasti ir vienreizējas izmaksas, gan arī tiešās operatīvās izmaksas, aerācijas kompresoru elektrodzinējiem strādājot mainīgas slodzes apstākļos. Kontrolējot elektrodzinēju momentāno elektrisko jaudu, un zinot konkrētam diennakts un nedēļas laika periodam noteiktos elektroenerģijas tarifus, iespējams noteikt kopējās izmaksas konkrētam laika periodam.

Izteiksmes izmantošanai simulācijas procesā tika izveidots ekonomiskās efektivitātes aprēķinu simulācijas bloks, kas ietver sevī dažādu tarifu (T6 – nemainīgs tarifs visu laiku, T7 – tarifs, kas ievērtē dienas, nakts un brīvdienų noslodzi, un T8 – tarifs, kas ievērtē dienas, nakts, brīvdienų un maksimuma slodzes) ar atšķirīgu pielietošanu izvērtējumu industriālajiem patērētājiem. Šis bloks ir izmantojams kopā ar dažādiem vadības simulācijas blokiem, pieslēdzot tā ieeju pie aerācijas kompresoru ražīguma izejas. Līdz ar to iespējams vienlaicīgi modelēt ne tikai tehnisko un tehnoloģisko procesu, bet arī katra konkrētā modeļa ekonomiskos rādītājus.

Apvienojošie dati par tehniski ekonomiskās modelēšanas rezultātiem apkopoti 2.tabulā.

Ņemot vērā izvirzītos optimizācijas kritērijus, un simulācijas rezultātā iegūtos ekonomiskos datus, var konstatēt, ka vismazāko iestatījuma kļūdu un mazākās izmaksas piedāvā PID/kvaziinvariantās vadības sistēma.

Izvērtējot simulācijas rezultātus un pielietojot dažādus „Latvenergo” piedāvātos tarifu plānus industriāliem patērētājiem Preiļu NAI aerācijas kompresoru vadības sistēmai, var secināt, ka T7 tarifu plāns nav izdevīgs nevienā no modeļiem, jo izmaksas visos modeļos ir augstākas nekā citos tarifu plānos. Tarifu plānu T8 var izmantot, ja aerācijas kompresoru vadībai tiek izmantots visvienkāršākais un nekvalitatīvākais režīms, t.i., aerācijas kompresora nepārtrauktas darbības režīms. Tajā pašā laikā, ieviešot PID/kvaziinvarianto vadību, elektroenerģijas izmaksas kļūst līdzvērtīgas esošajām izmaksām, toties aerācijas kvalitāte būtiski uzlabojas, tāpēc šāds NAIS automātiskās vadības princips kopā ar standarta tarifu plānu T6 ir optimāls piedāvājums Preiļu NAI kvalitatīvai un ekonomiskai vadībai.

Tehniski ekonomiskās modelēšanas rezultāti
Results of technical and economical simulation

	Gada enerģijas izmaksas, LVL, lietojot: (Annual energy expenses, LVL, using:)			Regulēšanas kvalitāte, (Quality of control) * C_{rms} , ** ΔC_{rms} , $g \cdot m^{-3}$
	tarifu (tariff)	tarifu (tariff)	tarifu (tariff)	
	T6	T7	T8	
Nepārtraukti ieslēgts aerācijas kompresors (Air blower nonstop operation)	16018	16452	15976	*6.76
Divu kompresoru secīga darbība (Two air blowers sequential operation)	15014	15497	15060	*5.384
Divpozīciju programvadība (Two-posit automatic control)	12611	13038	12644	*3.055
PID regulators – standartkoeficienti (PID controller with standard coefficients)	11917	12332	11963	**0.101
PID regulators – piemeklēti koeficienti (PID controller with adjusted coefficients)	11857	12269	11903	**0.071
PID/kvaziinvariantā vadība (PID/quasiinvariant control)	11755	12207	11851	**0.069

SECINĀJUMI

1. Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišu operatīvo datu analīzes rezultātā konstatēta būtiska tehnoloģisko procesu modernizācijas ietekme uz notekūdeņu attīrīšanas ietaišu energoefektivitāti – modernizētām notekūdeņu attīrīšanas ietaišēm īpatnējais enerģijas patēriņš ir par 38.9% zemāks ($M=0.50 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$, $SD=0.075 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$).
2. Analītiskie pētījumi pierāda, ka notekūdeņu pieplūdei un enerģijas patēriņam to apstrādei Latvijas notekūdeņu attīrīšanas ietaišēs ir izteikts sezonāls raksturs, ko ietekmē gan vides temperatūra, gan nokrišņu daudzums, gan arī cilvēku aktivitātes cikliskums (diennaktī (6..8 stundas), nedēļā (darbadienu/brīvdienų cikls), gadā (4, 6, 12 mēneši)).
3. Autora izveidotā inovatīvā analītiskā izteiksme un datorsimulācijas modelis skābekļa šķīdībai ūdenī atšķirībā no iepriekš zināmajām ietver sevī ne tikai ūdens temperatūras un aerācijas tvertnes konstruktīvo parametru ietekmi, bet arī atmosfēras gaisa spiediena un skābekļa koncentrācijas ietekmi, kā arī notekūdeņu sāļainības ietekmi. Simulācijas rezultātu salīdzinājums ar eksperimentālo

pētījumu datiem apstiprina iegūtās analītiskās sakarības atbilstību kompleksajiem skābekļa šķīdības procesiem aerācijas tvertnē.

4. Analītiskie pētījumi apstiprina hipotēzi par notekūdeņu aerācijas tvertnes funkcionālo atbilstību nestacionāram objektam ar mainīgiem inerces un jutības rādītājiem. Nestacionaritāti nosaka kompleksais skābekļa šķīšanas process kopā ar mainīgiem aerācijas tvertnes un piesārņojuma inerces un jutības rādītājiem. Notekūdeņu piesārņojuma q izmaiņas ietekmē aerācijas tvertnes jutības rādītāju K_a un slodzes inerces rādītāju T_q . Aerācijas kompresoru ražīguma L_g izmaiņas ietekmē tvertnes inerces rādītāju T_a un slodzes jutības rādītāju K_q .
5. Promocijas darbā izstrādātais inovatīvais aerācijas tvertnes datorsimulācijas modelis ļauj risināt tiešā veidā analītiski neatrisināmu pārvades funkcijas vienādojumu sistēmu, kas apraksta aerācijas tvertnes un slodzes inerces un jutības rādītāju izmaiņas un mijiedarbību, tādējādi radot iespēju modelēt aerācijas tvertnē notiekošos procesus, un pārbaudīt dažādu vadības principu darbību. Regulējošās iedarbes un slodzes jutības un inerces rādītāji šajā modelī tiek nepārtraukti pārrēķināti un ievadīti pārvades diferenciālvienādojumu sistēmā.
6. Simulācijā konstatēts, ka aerācijas tvertne reaģē uz piesārņojuma un tam atbilstošā aerācijas kopresora ražīguma izmaiņām kā nestacionārs nelineārs objekts. Preiļu notekūdeņu aerācijas tvertnes simulācijā pie mainīga mazpilsētai raksturīga diennakts piesārņojuma tvertnes jutības rādītāja K_a izmaiņas diapazons bija robežās no 0.1 līdz 0.95 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, tvertnes inerces rādītāja T_a izmaiņas diapazons bija robežās no 30 līdz 95 min, slodzes jutības rādītāja K_q izmaiņas diapazons bija robežās no 0.03 līdz 0.095 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, un slodzes inerces rādītāja T_q izmaiņas diapazons bija robežās no 3 līdz 30 min, pie tam izmaiņu diapazoni dažādiem vadības principiem atšķirās. Vadības principi ar augstāku vadības kvalitāti uzrādīja šaurākus jutības un inerces rādītāju izmaiņas diapazonus.
7. Eksperimentālie pētījumi parāda būtisku atšķirību starp aerācijas tvertnes inerces rādītāju skaitliskām vērtībām pie dažādām slodzēm un notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas darba režīmiem (aerācijas tvertnes laika konstantes vērtība pie ieslēgta aerācijas kompresora ir 2.01 – 2.76 reizes lielāka nekā pie izslēgta aerācijas kompresora). Šādas atšķirības raksturīgas nestacionāriem nelineāriem objektiem.
8. Aerācijas tvertnes datorsimulācijas modeļa un eksperimentālo datu salīdzinošie pētījumi uzrāda ciešu sakarību ($R^2 > 0.997$), un apstiprina tā atbilstību aerācijas tvertnē notiekošiem procesiem. Tādējādi apstiprinās hipotēze par notekūdeņu aerācijas tvertnes funkcionālo atbilstību nestacionāram objektam.
9. Analītiski pierādīts, ka aerācijas kvalitāti un ergoefektivitāti būtiski ietekmē aerācijas tvertnes konstruktīvie parametri – tvertnes dziļums, aerācijas difuzoru skaits un tips, kā arī gaisa plūsmas intensitāte caur tiem. Aerācijas difuzoru

iegremdēšanas dziļuma palielināšana no 4 m līdz 6 m dod kopējā elektroenerģijas patēriņa samazinājumu par 3.2 % gadā. Optimāla aerācijas difuzoru izvēle un to skaita palielinājums rada līdz pat 4%, bet gaisa plūsmas intensitātes samazinājums caur difuzoriem rada līdz pat 3% elektroenerģijas patēriņa samazinājumu.

10. Iegūtās likumsakarības un analītiskās izteiksmes, kā arī simulācijas modeļi ļauj pamatot enerģiju taupošas notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas konstruktīvos risinājumus, izstrādāt katrai šādai sistēmai pielāgotu adaptīvas automātiskās vadības principu, pamatot tai atbilstošu elektroenerģijas izmantošanas tarifu plānu, kas nodrošinās energoefektīvu, ekonomiski un tehniski optimālu darbības režīmu notekūdeņu attīrīšanas sistēmās Latvijas mazpilsētās, tādējādi nodrošinot NAI darbības optimizāciju.
11. Apstiprinās hipotēze par to, ka notekūdeņu aerācijas inženiersistēmas kā nestacionāra tehnoloģiska objekta vadībai un optimālai darbībai nepieciešama kvalitatīvi iestatīta adaptīva automātiskā programvadība. Promocijas darba izpildes laikā izveidotais notekūdeņu aerācijas sistēmas kombinētās PID/kvaziinvariantās vadības princips paaugstina aerācijas kvalitāti mainīgos vides apstākļos, dodot iespēju paaugstināt sistēmas energoefektivitātes rādītājus. Tā ieviešana un atbilstoša tarifa izmantošana Preiļu notekūdeņu attīrīšanas ietaišu aerācijas kompresoru vadībā dos 4221 LVL ekonomiju gadā, un būtiski uzlabotu regulēšanas kvalitāti – tiks sasniegta nepieciešamā skābekļa koncentrācija ar minimālu novirzi $C=2\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($\pm 3.45\%$).

BACKGROUND, SCOPE, AND STRUCTURE OF RESEARCH

Wastewater aeration engineering system is important part of modern biological wastewater treatment system, which provides biological environment in the aerotank with oxygen necessary for metabolism. It includes air supply system, air blowers driven by electric motors with automatic control system which operates under particular program, and aeration tank with air diffusers system for even air distribution in wastewater (Fig.1).

Observations show that wastewater aeration engineering system consumes substantial part (40..80% depending on geographic location and technology used) of total energy consumption for wastewater treatment. Thus proper choice of air blowers automatic control system is important in order to get technically and economically optimal operation for particular wastewater treatment system.

Available sources of information and research analysis suggests that even if studies of sewage aeration engineering system elements are wide, they lack common perspective and understanding of the dynamic nature of the aeration tank, and influence of different control principles on the quality and efficiency of aeration.

Transient processes in aeration tank are observed at most part in relation to biological processes, and complex technical and technological solutions are incomplete. Few researches had been done on interaction between regulatory impact (air oxygen supply intensity) and perturbation (wastewater pollution) transfer functions inertia and sensitivity ratios and their variability - the aeration tank transfer function usually is presented as first order differential equation with fixed parameters.

Studies on oxygen solubility in wastewater had been looking at influence of different individual factors, but no complex analytic model taking in account set of factors affecting solubility of oxygen was developed and used in wastewater aeration control systems.

Lack of a common mathematical model that describes the non-stationary oxygen transfer process in the aeration tank sets limitations for the sewage treatment plant designers and operators to use the optimal (energy-efficient and high quality) aeration engineering system control algorithm, which takes in account the dynamics of the aeration tank.

Therefore the research on wastewater aeration engineering system and oxygen transfer in aeration tank including mathematical and computer simulation model development was done, and findings were used for optimal air blowers control system development.

HYPOTHESIS, AIM AND TASKS OF THE RESEARCH

The research hypothesis are:

1. wastewater aeration engineering system is nonstationary technological system with variable inertia and sensitivity ratios, and its operations are described by using system of non-linear differential equations with variable parameters;

2. optimal operations (appropriate quality and efficient use of energy) for wastewater aeration engineering system can be achieved by use of adaptive control system, which provides continuous recalculation of regulating impact and perturbation inertia and sensitivity ratios, and input of calculation results in aeration tank transfer functions system.

The aim of research: to justify theoretically and experimentally unsteady nature of wastewater aeration engineering system as nonstationary system with variable sensitivity and inertia ratios, and to offer innovative automatic control principle for wastewater aeration technological equipment, which can provide optimal (appropriate quality and efficient use of energy) operation.

The tasks to reach the stated aim:

1. To study waste water treatment plant energy consumption trends, tendencies and influencing factors.
2. To examine impact of wastewater aeration engineering system components on energy consumption and waste water treatment quality.
3. To investigate oxygen transfer and consumption in wastewater treatment plants, explore the influencing factors of oxygen solution process in water and their analytical patterns, and develop a complex mathematical model of oxygen transfer.
4. To carry out research on the dynamics of the aeration tank, clarifying analytical patterns of nonlinear sensitivity and inertia parameters, which state nonstationary nature of aeration tank.
5. To develop virtual model of aeration tank, and to investigate complex impact of different influencing factors on wastewater treatment quality and energy use efficiency.
6. To carry out experimental research in Preiļi wastewater treatment plants, and to determine the dissolved oxygen concentration changes in the aeration tank.
7. To perform comparative analysis of experimental and simulation data in order to evaluate virtual model adequacy.
8. To investigate wastewater aeration engineering system control principles efficiency and their optimization potential, using developed aeration tank virtual model.
9. To develop enhanced aeration wastewater engineering automatic control principle, which takes in account nonstationary nature of aeration tank, and makes adaptive adjustments of the control operation, thus providing optimized efficiency and economic parameters for particular treatment system.

APPROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK

The research was carried out in time period from 2005 till 2011. During this time 7 publications from which all of them comply with the requirements of generally recognized scientific publications.

Research novelty is proved by Latvia State patent No.13998 (patent publication data November 20, 2009) “Wastewater aeration quasiinvariant control system”, inventors Aigars Laizāns, Andris Šnīders, Jānis Greivulis.

List of publications:

1. Šnīders A., Laizāns A. Invariant Control of Wastewater aeration. **In:** Proceedings of 1st International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education) „*Advances in systems, computing sciences and software engineering*”, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Springer Publ. 2005–2006, pp.99–103.
2. Šnīders A., Laizāns A. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 5th International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava 2006, pp.160–164.
3. Šnīders A., Laizāns A. Computer aided modeling of wastewater aeration systems, **In:** Proceedings of the 3rd International Conference “*Rural development*”, Book 2, Kaunas, November 8–10, 2007, pp. 227–231.
4. Šnīders A., Laizāns A. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank. **In:** *Engineering for rural development*: Proceedings of the 6th International scientific conference. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Jelgava, 2007, pp.154–158.
5. Laizāns A., Šnīders A. Simulation of cost-efficient wastewater aeration control using invariant control principle. **In:** *INMATEH 2008 – I "AGRICULTURE AND ENGINEERING – complying with the European requirements"*, International scientific conference proceedings, January 28–29, 2008, Bucharest, Romania, pp. 183–188.
6. Шнидерс А.А., Лайзанс А.Д. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. **В:** *Высокие Технологии, Фундаментальные и Прикладные Исследования, Образование, Том 13, Сборник трудов, Под редакцией А.П. Кудинова, Г.Г. Матвиенко, 5.Международная конференция "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности"*, Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008., pp. 384–386
7. Laizāns A., Osadčuks V., Šnīders A. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. **In:** Proceedings of *INMATEH 2008 – II "Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry"*, International scientific conference, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania, pp. 132–137.

Research results presented in following international conferences in Latvia, Lithuania, Russia, USA, and Romania.

1. Invariant Control of Wastewater aeration.1st International Internet Conference on Systems, Computing Sciences and Software Engineering: CISSE – 05 (Computer, Information and System Sciences and Education): *Advances in systems, computing sciences and software engineering*, University of Bridgeport Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), USA, December 11–18, 2005.
2. Main conditions of wastewater aeration unit design parameters. 5th International scientific conference „*Engineering for rural development*”. Jelgava, May 18–19, 2006.
3. Impact of wastewater aeration process control techniques on the energy consumption. 13th International Scientific Conference: *Research for rural development*. LLU, Jelgava, May 19–22, 2006.
4. Notekūdeņu aerācijas invariantās vadības sistēma. Izstāde Latvijas reģionu sasniegumu pārskatam un attīstībai: "*Reģionālā attīstība Latvijā 2006*" . Posters Ķīpsalas izstāžu centrā 20.–22.aprīlī, Rīga,2006.
5. Computer aided modeling of wastewater aeration systems. 3rd International Conference: *Rural development*, Kaunas, November 8–10, 2007.
6. Oxygen transfer process simulation in wastewater aeration tank.6th International scientific conference: *Engineering for rural development*. LLU, Jelgava, 2007.
7. Нестационарная модель переноса кислорода в аэротенке биологической очистки сточных вод. 5.Международная конференция: *Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности*, Ст.Петербург, Россия, Апрель 2008.
8. System analysis of oxygen transfer in wastewater aeration tank. International scientific conference INMATEH 2008 – II: *Engineering And Management Of Sustainable Development In Agriculture, Transport And Food Industry*, July 18–19, 2008, Bucharest, Romania.
9. Round–table discussion. Wastewater treatment – experience and trends. 4th International Water Association’s International Young Water Professionals Conference. Conference held at the Clark Kerr Campus Conference Center of the University of California at Berkeley, USA, from July 16 to July 18, 2008.

1.WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS ENERGY CONSUMPTION PATTERNS THEORETICAL RESEARCH

Importance of aeration is stated by modern wastewater treatment technologies which use biodegradation. Analysis of waste biodegradation process confirms that oxygen is the main element needed to remove carbon, nitrogen and phosphorus from wastewater. Delivering proper amounts of oxygen in wastewater let biological environment in the wastewater treatment system to maintain their metabolism, and to even destroy chemical pollution.

The situation and trends in Latvia wastewater treatment plants (WWTP) energy consumption was analyzed in order to determine the factors influencing wastewater treatment plant operations, as well as oxygen transfer and solubility in wastewater, and dynamic parameters of the aeration tank, using analytical studies and simulations.

1.1. Analysis of Latvia wastewater treatment systems operations and energy consumption patterns

In order to determine influence of external factors on wastewater treatment plant energy consumption, analysis of different municipal WWTP in Latvia was conducted. Specific energy consumption ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) and wastewater inflow data from five municipal wastewater treatment plants with different stages of modernization were analyzed on monthly and annual base (19 data sets in total).

Dispersion analysis stated with 99.9% probability that annual trend in specific energy consumption differs substantially between municipal WWTP.

Impact of upgrade stage on energy efficiency was tested by using t - test, and splitting the WWTP in two groups – recently upgraded plants - in Bauska, in Liepaja, from 2007 in Jelgava, in Gulbene, from 2002 in Aizpute, operated using automatic control system, (the mean value of specific power consumption $M = 0.50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, standard deviation $SD=0.075 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$), and not upgraded plants - Preiļi from 2005 till 2009, Jelgava 2004 to 2006 – WWTP using manual control (the mean value of group specific electricity consumption $M = 0,78 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, $SD = 0,123 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$).

Since $t=5.71 > t_{krit}=2.201$ ($p=0.0001$), it can be assumed that difference between specific energy consumptions of defined groups is statistically significant – energy consumption of wastewater treatment plants using automatic control is significantly lower than those which are not upgraded.

The major part of energy in the wastewater treatment plants is being consumed by air blowers, and use of automatic control in air blower motors operation can improve dissolved oxygen concentration quality and oxigenization process efficiency.

In order to evaluate WWTP operation efficiency from long-term perspective, data of upgraded Gulbene WWTP energy consumption were analyzed. Dispersion analysis assured with 99.9% probability that specific energy consumption in this wastewater treatment plant shows monthly seasonality which repeats on annual basis. Spectral (Fourier) analysis revealed 4 and 6 months seasonality, as well as 12 months (annual) seasonality (Fig.2).

Correlation analysis of data about mean monthly air temperature, precipitation, wastewater volume and specific energy consumption in Gulbene WWTP revealed strong negative correlation between ($R^2 = -0.800$) specific energy consumption and precipitation – oxygenized water from precipitation enters wastewater system, and reduces the waste concentration in wastewater, thus reducing need for extra energy consumption. At the same time no relations were find between outside air temperature and wastewater volumes ($R^2 = -0.051$). Substantial negative correlation ($R^2 = -0.316$), was revealed also between outside air temperature and specific energy consumption – as lower is air temperature, as higher energy consumption. Thus temperature changes

must be taken in account in order to reduce energy consumption and increase overall efficiency.

1.2.Theoretical research of oxygen solubility

Oxygen dissolving in water is complicated physical process influenced by different factors. In order to evaluate aerotank dynamic response, it was necessary to introduce in the mathematic model of aerotank the analytic equation of oxygen solubility, which takes in account main influencing factors – oxygen concentration in air supplied, wastewater temperature and salinity, as well as air pressure.

1.2.1.Oxygen concentration in air impact on oxygen solubility

Observations of oxygen concentration in air prove substantial seasonality. Oxygen concentration change diapason is between 20.84% and 20.97 %, showing lowest scores during winter (BIO2 International, s.a.; Keeling, McEvoy, & Manning, 1998;Moiseeva, 1995).

Main reasons for such seasonality in oxygen concentration in air are the following: oxygen production changes during the year by plants, oxygen solubility in water increase due to water temperature decrease, as well as seasonal changes in human activities – increased oxygen consumption due to increased fuel burning for heating in cold weather. Observations also confirm assumption that oxygen concentration in urban area is lower than in countryside and in forests.

Oxygen concentration fluctuations are considerable, and this factor will be included in oxygen solubility formula, which then will be used for highly efficient wastewater aeration control system development.

1.2.2.Water temperature impact on oxygen solubility

Experimental research revealed that open basins water in summer (temperature 21°C) contains in average 13 g·m⁻³ nitrogen N₂, 9 g·m⁻³ oxygen O₂, and 35 g·m⁻³ carbon dioxide CO₂. (Meck, s.a.; Mack, s.a.). Saturation level of gases dissolved in water differs, and depends on water temperature (Colby, s.a.; Colt, 1984). With water temperature increase solubility of gases in water decreases (Colt, 1984; FAO, 1998).

Saturation level of oxygen solubility usually is being acquired from ready-made tables, which were developed from experimental data (Colt; 1984; YSI, s.a.). There are only few analytic expressions available currently (Truesdale, Downing, 1954; Weiss, 1970; Garcia, Gordon, 1992; Tromans, 2000; Sniders, 2003).

Using regression analysis of temperature impact on oxygen saturation in water experimental data (Colt, 1984), the formula describing this relation was acquired

$$C_s(\Theta) = 14.208 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (1)$$

This exponential expression which joins together oxygen saturation in water $C_s(\Theta)$ and temperature Θ (in Celsius degrees) with high accuracy describes the interdependence of those two factors ($R^2 = 0.997$), at the same time can be used as basic analytic expression for oxygen solubility multifactorial model development.

1.2.3.Wastewater salinity impact on oxygen solubility

Wastewater contains mixture of different dissolved salts, suspended solids, and live creatures – microorganisms, bacteria, etc. Experimental research shows that concentration and composition of salts dissolved have direct impact on oxygen concentration in water – as higher is salinity, as lower is oxygen saturation level in water (Colt, 1984). For simplified oxygen saturation calculations, non-dimensional coefficient is being introduced, which should take in account wastewater salinity (YSI, s.a.).

Obviously such approach does not allow to adjust oxygen saturation level neither to specifics of particular WWTP with its own composition and concentration of dissolved salts, nor to changes in dissolved salts composition and concentration.

Modified analytic expression which takes in account composition and concentration of dissolved salts in wastewater (using Mack, s.a.; Han, 2002) for use in mathematic model was created:

$$C_s = C_0 \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^n K_i c_i\right)^{-1}, \quad (2)$$

where C_0 – oxygen solubility in clean water, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,

i – index of the ione dissolved in water,

K_i – semiempirical constant for the indexed ione,

c_i – molarity of the indexed ione in water solution.

C – oxygen solubility in water with dissolved indexed iones, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.2.4. Atmospheric pressure and temperature complex impact on oxygen solubility

Observations (Colt, 1984) show that atmospheric pressure has impact on oxygen solubility in water – with diminishing atmospheric pressure oxygen solubility in water decreases.

Analytic expression which describes interrelation between air pressure and oxygen solubility was developed using modified Henry's formula:

$$C_x = p_x \cdot k_H^x = p_x \cdot A \cdot N_A \cdot \alpha^x, \quad (3)$$

where C_x – gas x solubility, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

k_H^x – Henry's constant for gas x (particularly – for oxygen), $(\text{g}/\text{m}^3)\cdot\text{Pa}^{-1}$;

p_x – partial pressure of gas x (in this formula – oxygen), Pa;

N_A – Avogadro's constant, mol^{-1} ;

A – coefficient taking in account oxygen density;

α^x – Bunzen's coefficient for oxygen, $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$.

Formula describing Bunzen's coefficient for oxygen was developed using experimental data (Weiss, 1970) and applying nonlinear regression model:

$$\alpha = 4.91 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (4)$$

Gas pressure impact on gas solubility can be described using modified formula (Broecker, Peng, 1982; Sawyer, McCarty, 1978):

$$C_1 \cdot p_1^{-1} = C_2 \cdot p_2^{-1}, \quad (5)$$

where C_1 and C_2 – gas solubility for two different pressures, $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;

p_1 and p_2 – gas pressures, Pa.

Formula describing complex impact of air pressure and temperature was created using expressions (3), (4) and (5):

$$C = p_x \cdot A \cdot N_A \cdot \alpha^x \cdot 4.91 \cdot \exp(-0.0219 \cdot \Theta). \quad (6)$$

1.2.5. Wastewater density impact on oxygen solubility

Air supply to aerotank must be provided with overpressure, if aeration is provided from a bottom of aerotank, because wastewater layer above the diffuser creates overpressure, and air blower must provide air pressure which is bigger than that created by wastewater layer – air pressure must be bigger than pressure in the diffuser submerging depth h in wastewater.

Water density changes have impact on necessary air blower output pressure. At the same time water in its liquid stage differs from other liquids substantially – its density changes nonlinearly with temperature changes. None of known oxygen solubility models take in account this nonlinear impact.

Expression describing air blower output pressure dependence on temperature and air diffuser submerging depth, and taking in account water density nonlinear dependence from temperature was created:

$$p_h = \rho \cdot g \cdot h = (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h, \quad (7)$$

where p_h – water pressure in depth h (required air blower pressure), Pa;

ρ – water density, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

h – air diffuser submerging depth, m;

g – gravity constant, $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

1.3. Oxygen solubility mathematic model

Mathematic model which describes the interrelation between oxygen solubility in wastewater and the scope of external factors – air pressure, oxygen concentration in air, wastewater salinity and dissolved ions composition, wastewater temperature, as well as air diffusers submerging depth, is presented in the formula developed by the author:

$$C_s = C(r_{O_2}, p_a, \Theta, K, c_i, h) = \frac{0.668 \cdot r_{O_2} \cdot \left(p_a + (-0.006 \cdot \Theta^2 + 0.0365 \cdot \Theta + 999.91) \cdot g \cdot h \cdot 10^{-3} \right)}{\exp\left(\sum K_i c_i + 0.0219 \cdot \Theta\right)} \quad (8)$$

where r_{O_2} – proportion of oxygen in air;

p_a – atmospheric pressure.

Virtual model of oxygen solubility using formula (8) and software package Matlab subprogram Simulink was developed (Fig.3) for further exploration of wastewater aerotank dynamic response.

1.4. Oxygen transfer stationary model

Using research results about oxygen transfer efficiency in wastewater aeration process (Šniders, 2003), updated formula for necessary air supply intensity (air blower capacity) L_g was created:

$$L_g = \frac{Q \cdot (L_a - L_t)}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 (C_s - C)} = \frac{q}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot (C_s - C)}, \quad (9)$$

where

- L_a – oxygen demand (BOD+COD) for full wastewater treatment, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
- L_t – remaining oxygen demand in effluent wastewater (BOD+COD), $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
- k_1 – adjustment coefficient taking in account air diffusers submerging depth h ;
- k_2 – adjustment coefficient taking in account wastewater temperature Θ impact on sludge activity;
- k_3 – adjustment coefficient taking in account density of diffusers σ , and air flow intensity through diffuser λ , $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
- k_4 – adjustment coefficient taking in account composition of active sludge, for optimal active sludge composition $k_4=1$;
- q – oxygen consumption in aerotank, $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$;
- Q – wastewater afflux, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;
- C_s – oxygen solubility, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;
- C – dissolved oxygen concentration in wastewater, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Computer simulation was provided using formula (9) and implementing in it Preiļi WWTP data. Simulation results analysis proves the statement that there is nonlinear relation between oxygen concentration C in wastewater, air supply L_g and oxygen consumption in aerotank (pollution) q – with air supply L_g increase oxygen concentration increases, and with pollution q increase oxygen concentration decreases (Fig.4).

Analytic expression $C=f(L_g)$ describing oxygen concentration in aerotank dependence on air supply intensity is nonlinear, and can be linearized only in narrow areas. Recalculation of transfer coefficients is necessary to get much more precise fit between simulation model and real processes occurring in aerotank.

1.5. Oxygen transfer nonstationary model

Assuming homogenous distribution of supplied air in the aerotank along its surface and equal dissolved oxygen concentration along aerotank volume, oxygen transfer then can be described as nonstationary dynamic process using oxygen balance equation in aerotank (Sniders, Skrastins, 1995; Sniders 1997):

$$T_a \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a \Delta L_g, \quad (10)$$

- where T_a – time constant of aerotank, min;
- K_a – transfer coefficient of aerotank, $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$;
- ΔC – dissolved oxygen concentration alteration, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

ΔL_g – air blower output capacity alteration, $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$.

Aerotank time constant T_a , which describes inertia of aerotank transient process, can be calculated using the formula:

$$T_a \approx \frac{V_a}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}, \quad (11)$$

where V_a – aerotank volume, m^3 .

Transfer coefficient of aerotank K_a , which describes aerotank sensitivity against control perturbation L_g , can be calculated using the formula:

$$K_a = \frac{C}{L_g} = \frac{C_S}{L_g} - \frac{q}{L_g^2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (12)$$

Load (pollution) balance in aerotank can be described using the following equation:

$$T_q \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q \Delta q, \quad (13)$$

where T_q – time constant of pollution transient process in aerotank, min;

K_q – transfer coefficient of load (pollution) in aerotank, $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot (\text{g} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$;

ΔC – dissolved oxygen concentration alteration, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

Δq – pollution alteration in afflux, $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$.

Time constant of load T_q , which describes inertia of pollution q transient process in aerotank, can be calculated using the formula:

$$T_q \approx \frac{V_a \cdot C}{q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (14)$$

Transfer coefficient of load (pollution) in aerotank K_q , which describes aerotank sensitivity from load q , can be calculated using the formula:

$$K_q = \frac{\Delta C}{\Delta q} = \frac{1}{L_g \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4}. \quad (15)$$

Analytic analysis and simulation of inertia and sensitivity coefficients revealed their nonlinear response against perturbances in aerotank. In case of rapid load and control perturbances changes these coefficients differ substantially from their static values in linear model.

This allow to state that aerotank can be described as nonlinear nonstationary object with variable inertia and sensitivity, which proves initially stated hypothesis.

The coefficients K_a and K_q , and constants T_a , and T_q are not static – they change values during aerotank operation, it is proposed to call them factors or indicators. Then T_a could be called aerotank inertia indicator, K_a could be called aerotank sensitivity indicator, T_q – load inertia indicator, and K_q – load sensitivity indicator.

Dynamic transient processes in aerotank from control parameter L_g and load perturbation q impact can be described using system of nonlinear nonstationary differential equations:

$$\begin{cases} T_a(L_g) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_a(L_g, q) \cdot L_g \\ T_q(q) \cdot \frac{d\Delta C}{dt} + \Delta C = K_q(L_g) \cdot \Delta q \end{cases} \quad (16)$$

Applying Laplace transform to the differential equations, the aerotank transfer functions of control and load impact were stated:

$$\begin{cases} W_a(s) = \frac{C_{ST}(s)}{L_g(s)} = \frac{K_a(L_g, q)}{T_a(L_g) \cdot s + 1}, \\ W_q(s) = \frac{\Delta C(s)}{\Delta q(s)} = \frac{K_q(L_g)}{T_q(L_g) \cdot s + 1} \end{cases} \quad (17)$$

where s – Laplace variable, s^{-1} .

These transfer functions can be used to develop virtual model of aerotank for computer simulation under variable control and load perturbation inertia and sensitivity indicators, and to simulate different control principles efficiency.

Software Matlab subprogram Simulink was used to develop aerotank virtual model (Fig.5). Blocks at the left side of model are used for aerotank construction and technology, as well as external environment and oxygen solubility describing parameters and perturbations introduction in the model, blocks at the right side of model comprise simulation result – dissolved oxygen concentration in effluent from aerotank.

Simulation block named „Calculation subsystem” (Fig.6) provides simulation of aerotank mathematic model, but blocks named „Transfer function1” un „Transfer function2” – aerotank transfer function indicators instant recalculation during simulation.

Important property of the model to be mentioned is that using it one can simulate both static and dynamic responses. For static simulation, values of control and load inertia T_q and T_a must be set to $T_q=T_a=0$.

Principles used in automatic control simulation transfer function realization do not allow to change inertia and sensitivity indicators online, because common understanding of these indicators is that they are constant and must be introduced initially. As current research stated that they are variables, it was necessary to develop special transfer function block with variable inertia and sensitivity indicators. Sample of regulating impact transfer function realization presented in Fig.7.

Through information input channels „q input” un „Lg input” transfer function receives actual pollution and air blower capacity, which is being used in blocks „Ka calculation” un „Ta calculation” for sensitivity and inertia factors recalculation, and further steps let to realize transfer function, and actual level of dissolved oxygen level C . Simulation block for load transfer function $W_q(s)$ has similar structure.

1.6. Comparative research of oxygen transfer nonstationary and stationary model

Comparative research of oxygen transfer nonstationary and stationary models was carried out in order to reveal how the choice of automatic control system affects quality of dissolved oxygen concentration regulation and parameters of control device.

Special simulation model was developed to provide comparative research, where two parallel operating aerotank simulation models were put together – one with variable inertia and sensitivity indicators – dynamic model, and another with constant inertia and sensitivity indicators – stationary model. Inertia and sensitivity indicators K_a , K_q , T_a and T_q for stationary model were used from those values revealed in dynamic model after process stabilizing ($C=\text{const}$).

Data used for simulation were taken from Preiļi WWTP technical and technological information:

- stated dissolved oxygen concentration in effluent $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;
- inertia and sensitivity indicators for stationary model:
 - $K_a=0.2153(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 - $T_a=49.91 \text{ min}$;
 - $K_q=0.0491 (\text{g}\cdot\text{m}^{-3})(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$;
 - $T_q=3.183 \text{ min}$.
- air blower capacity during first (stabilization) stage of simulation (up to time $t=350 \text{ min}$) set to $L_g=1120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (feed frequency of air blower asynchronous electric motor set to 50 Hz);
- second stage of simulation starts at time $t=350 \text{ min}$;
- air blower capacity during second stage of simulation set to $L_g=1008 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ (90% of maximum air blower capacity, provided by variable frequency drive with asynchronous electric motor and output frequency range 20..50 Hz).

Simulation results (Fig.8) show, that using stationary simulation, oxygen concentration in effluents decreases proportionally to the decrease of air blower capacity. Stabilized value reaches $C=1.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (10% reduction from stated value).

In the nonstationary dynamic model, second stabilization occurs at substantially lower dissolved oxygen concentration – $C=0.42 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (79% reduction from stated value).

Simulation results proves the statement, that nonstationary model responds to external changes substantially different than stationary model, and much more properly describes oxygen transfer process occurring in aerotank. Introduction of variable inertia and sensitivity indices in aerotank mathematic model and appropriate air blower control system adjustment are necessary

2. WASTEWATER AERATION EXPERIMENTAL RESEARCH

Experimental research took place in Preiļi WWTP. The main aim of experimental research was to reveal dynamic reactions of aerotank to perturbances,

and to evaluate adequacy of developed analytical model of aerotank to real processes in wastewater aerotank.

Two sets of measurements of dissolved oxygen concentration in effluents with time gap one year were provided.

Digital oxygen concentration measuring device „Lutron” DO–5510 was used. Dynamic properties of the device were tested before using it for measurements, and it was stated that dynamic response of the device is substantially faster than dynamic response of aerotank, and this device can be used for experimental measurements.

Data recorded during experiments were processed using non-linear regression analysis tools, and equations describing dissolved oxygen concentration for turned on and turned off air blower were revealed. (Table.1).

Inertia indices in both experiments differed, but kept the tendency that ratio between inertia indicator when air blower is turned on and turned off is stable (ranges from 2.01 to 2.76) which differs substantially from first order function, showing nonstationarity of aerotank as dynamic system.

3.COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA AND SIMULATION MODEL

Comparison of experimental data and simulation model was done using root mean square error method. During simulation, the dissolved oxygen concentration $C=8.66\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ was stated, which conforms to the experimental data saturation level.

Technical and technological data from Preiři WWTP were used in simulation – air blower capacity $L_g=1120\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, aerotank data ($\lambda=1\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $\sigma=0.063$, $h=4\text{ m}$), and external environment data typical for the experiments providing date ($\Theta=+10^\circ\text{C}$, $p_g=101.325\text{ kPa}$, $r_{O_2}=0.2097$).

Pollution level $q=189.8\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ was revealed as the level where both models showed equal saturation and shape of trend lines, and was found adequate for Preiři WWTP chemical and biological oxygen demand. Final (stabilized) values of inertia and sensitivity indicators at the end of simulation were following : aerotank sensitivity indicator $K_a=0.4645\text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, inertia indicator $T_a=37.33\text{ min}$, load sensitivity indicator $K_q=0.0375\text{ (g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{g}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, load inertia indicator $T_q=31.83\text{ min}$.

Root mean square error was calculated by instant differentiating of online calculated mean squares of the two data sets, and the result did not exceed $\Delta C_{rms}=0.15\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2.1% from amplitude $C=7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ at time $t=60\text{ min}$.), stating strong relation between the two data sets and proving that developed mathematic model of aerotank fits to experimental results and real process of oxygen transfer in aerotank.

4.AIR BLOWER CONTROL SYSTEM SIMULATION AND OPTIMIZATION

Research results prove that wastewater aeration engineering system is nonstationary dynamic system, which is influenced by a set of internal and external

variables. This allows to state the hypothesis that optimal control principle of air blower which provides acceptable quality and efficiency is microcontroller driven variable frequency drive with asynchronous electrical motor, which uses information from aerotank effluents about dissolved oxygen concentration as feedback about oxygen transfer processes and dynamics taking place in aerotank. Simulation of air blower and aerotank operations using different control systems was done in order to prove the hypothesis stated and to find technically and economically optimal control principle.

Optimal control principle means minimum operation costs in order to reach and keep stable stated dissolved oxygen concentration in effluent wastewater, and minimum discrepancy from stated dissolved oxygen concentration under dynamic load perturbances.

Mathematic model of aerotank with variable inertia and sensitivity indicators which were recalculated instantly during simulation was used for different air blower control principles comparison and control quality evaluation.

The main variable during simulation was oxygen demand (pollution) q in wastewater afflux. Initial pollution was set to $q=305 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, and during simulation time $t=1440 \text{ min}$. pollution alteration was simulated – 6 hour seasonality (pollution variation during the day – increase in pollution between 6:00 and 9:00, 12:00 and 14:00, and between 18:00 and 20:00, with pollution decrease between these time periods), 24 hour seasonality (daily changes), and quasi-random pollution seasonality during the day with period $t=30 \text{ min}$. Variation amplitude for all mentioned variations was set to 10% from initial pollution.

Control principles used in simulation:

- no feedback:
 - continuous operation of air blower;
 - operation of two air blowers (one is set for minimum pollution periods, and provides aeration and mixing, another is turned on time based principle, when pollution increases).
- feedback used (dissolved oxygen concentration in aerotank effluents):
 - operation of two air blowers (one is set for minimum pollution periods, and provides aeration and mixing, another is turned on, when pollution increases);
 - variable frequency driven asynchronous motor for air blower, with PID controller;
 - variable frequency driven asynchronous motor for air blower, with PID/quasiinvariant controller.

Criterion for comparison – conformity of dissolved oxygen concentration to stated concentration $C=2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Control principle using PID/quasiinvariant control was simulated using developed quasiinvariant control simulation block (Fig.9), which uses both dissolved oxygen concentration in effluents, and wastewater afflux (information about the parameter was taken from pollution simulation block).

Wastewater afflux and dissolved oxygen concentration signals differentiation in the quasiinvariant control block is taking place, allowing to state these signals variation speed. Blocks called „Relay” allow to state the status change levels and output levels which then are sent to adding unit. The status change and output levels were stated using information about aerotank dynamics gathered during experimental research and simulations.

Simulation model using PID/quasiinvariant control is presented in Fig.10, simulation results – in Fig.11, and variations in inertia and sensitivity indicators during simulation – in Fig.12.

During simulation air blower responds to pollution variation, and aerotank and load inertia and sensitivity indicators changes occur. Aerotank sensitivity indicator K_a variation was in a range between 0.3 and 0.95 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, aerotank inertia indicator T_a variation was in a range between 35 and 95 min, load sensitivity indicator K_q variation was in a range between 0.035 and 0.095 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, and load inertia indicator T_q variation was in a range between 5 and 9 min.

Using PID/quasiinvariant control, root mean square value of discrepancies from stated value was $\Delta C_{rms}=0.067\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, which is substantially lower than when using other automatic control principles.

Analysis of simulations results proves that PID/quasiinvariant control principle can provide the highest quality of air blower compressor operation in nonstationary dynamic environment with variable inertia and sensitivity indicators, providing adequate control quality and minimal discrepancy from stated dissolved oxygen concentration in wastewater aerotank effluents.

Comparison of air blower control systems using another optimization criterion – operational expenses, innovative operational electric energy related expenses calculation for continuous process was developed:

$$A = I_A \cdot a_A + B + \int_{t_1}^{t_2} P(t) \cdot b(t) dt, \quad (18)$$

where A – summary expenses related to electric energy in time period t_2-t_1 , LVL;
 I_A – nominal currency of air blower electric motor connection and protection device, A;
 a_A – costs based on connection and protection device nominal currency value, LVL/A/per annum;
 B – expenses for connection to grid, LVL/per annum;
 $P(t)$ – air blower electric motor electric power, kW;
 $b(t)$ – electric energy tariff, LVL·kW⁻¹·h⁻¹.

The equation developed takes in account tarriff plans offered by energy supplier (tarriff plans T6, T& un T8 (Latvenergo, 2011)), expenses related to connection to grid and protection of grid (usually one-time expenses), and direct operational expenses related to air blower electric motor operation under variable load and frequency. If main control parameter is electric power of electric motor, and appropriate tariff applied, overall operational expenses for particular time period can be calculated.

Operational expenses calculation formula was used in simulations, and special simulation block was developed, which included set of appropriate tariffs to be used for air blower economic efficiency evaluation (T6 – constant tariff system, T7 – tariff taking in account time-of-day loads, and T8 – tariff taking in account time-of-day and day-of-week loads). This simulation block can be used together with different control simulation blocks, by connecting its input to air blower capacity signal, allowing to make technical and economical simulation simultaneously, and to reveal each control unit technical and economical data.

Simulation results are provided in Table.2.

Taking in account stated optimization criterions, and simulation results, PID/quasiinvariant control system outperformed all other control principles presenting the smallest discrepancy from stated dissolved oxygen concentration, and lowest operational expenses.

Using different tariffs offered by „Latvenergo” to industrial consumers for Preiļi WWTP energy supply, simulation results revealed that tariff T7 gives the highest expenses levels, thus showing no value for any of control principles used.

Tariff T8 can be used only if the simplest control principle offering the lowest output quality (nonstop air blower operation) was applied. At the same time implementation of automatic control system, which uses PID/quasiinvariant principle, provides comparable expenses, but substantially higher control quality. This automatic control system together with tariff T6 is optimal solution for Preiļi wastewater treatment plant, offering high quality and efficient operation.

CONCLUSIONS

1. Analysis of Latvia municipal wastewater treatment plants operational data reveals substantial plant reconstruction impact on operational efficiency – specific energy consumption for wastewater treatment in modernized wastewater treatment plants ($M=0.50 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, $SD=0.075 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$) is 38.9% lower than in those which are not reconstructed.
2. Analytical research proves that wastewater afflux and specific energy consumption for wastewater treatment has seasonal patterns depending on environment temperature, precipitation intensity and human activity cycles (daily (6..8 hours period), weekly (working days/ holidays), annual(4, 6, 12 months period)).
3. Innovative analytic expression and simulation model of oxygen solubility in water created by author differs from previously known because takes in account not only water temperature and aerotank design, but also atmospheric air pressure, oxygen concentration in air, and wastewater salinity. Simulation results and experimental data comparison assures conformity of analytic expression to oxygen transfer process in aerotank.
4. Analytic research states the hypothesis that wastewater aerotank is nonstationary object with variable inertia and sensitivity indicators. Nonstationarity is a result of combined impact of oxygen transfer process and

variable aerotank inertia and sensitivity. Wastewater pollution q variation influences aerotank sensitivity indicator K_a and load inertia indicator T_q . Air blower capacity L_g variation influences aerotank inertia indicator T_a and load sensitivity indicator K_q .

5. Aerotank simulation model presented in thesis paper is innovative approach in computer simulation, providing possibility to solve directly analytically unsolvable system of transfer functions, which describes aerotank and load interaction and inertia and sensitivity variability, allowing simulation of oxygen transfer process in aerotank and test of different control principles. Inertia and sensitivity indicators in this model are calculated instantly and introduced online in the system of transfer function differential equations.
6. Computer simulation revealed that aerotank responds to pollution variation and air blower capacity variation as nonstationary nonlinear object. Simulation of Preiļi wastewater aerotank using pollution variation with characteristics usual for small municipality daily seasonality showed variation range of aerotank sensitivity indicator K_a between 0.1 and 0.95 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, aerotank inertia indicator T_a variation range was between 30 and 95 min, load sensitivity indicator K_q variation range was between 0.03 and 0.095 $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$, and load inertia indicator T_q variation range was between 3 and 30 min. Variation ranges for different control principles differed substantially, and indicators variation ranges for control principles with higher control quality were narrower.
7. Experimental research showed substantial difference between aerotank inertia indicator numeric values under different loads and wastewater aeration engineering system operation principles (aerotank time constant, when air blower is turned on, is 2.01 – 2.67 times larger than, when air blower is switched off). Such difference characterizes nonstationary nonlinear objects.
8. Comparative research of aerotank computer simulation model and experimental data show strong relation between them, and prove conformity of developed model to oxygen transfer processes in aerotank. This allows to state that the hypothesis about wastewater aerotank as nonstationary object is verified.
9. Analytic analysis proves importance of aerotank constructive parameters – aerotank depth, number and type of air diffusers, and air flow intensity through the diffusers, on aeration quality and energy efficiency. Increasing air diffusers submerging depth by 2 meters - from 4 m to 6 m, allows to decrease annual energy consumption by 3.2%. Optimal air diffuser choice and increase of diffusers number decreases annual energy consumption by 4%, but air flow intensity decreases energy consumption by 3% annually.
10. Analytical expressions and etiological principles, as well as developed simulation models allow to ground design of efficient wastewater aeration engineering system, and to develop adaptive automatic control principle adjusted to particular system, and to set appropriate energy utilization tariff

plan, which provide efficient, economically and technologically optimal operation principle for small Latvia municipal wastewater treatment plant, ensuring optimal operation of particular wastewater treatment plant.

11. Research and simulation results prove the hypothesis that adaptive automatic control system is necessary for control and optimal operation of wastewater aeration engineering system as nonstationary technological object. Combined PID/quasiinvariant control principle developed during the research improves aeration quality in variable environment, allowing efficiency increase. Introduction of this principle together with appropriate tariff in Preiļi wastewater treatment plant air blower control system will decrease annual operational expenses by 4221 LVL, and substantially increase aeration quality – stated dissolved oxygen concentration $C=2\pm 0.069 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ in aerotank effluents will be reached, and discrepancy from stated value will be small, just $\pm 3.45\%$.

INFORMĀCIJAS AVOTI (SOURCES OF INFORMATION)

1. BIO2 International inc. USA. *Are Oxygen Levels Changing?* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: http://www.o2zone4life.com/earth_article.html
2. Broecker W.S., Peng T.H. (1982) Tracers in the sea. Eldigio Press Lamont Doherty Geological Observatory, 690 p.
3. Colby. *Solubility of Oxygen in Water*. (tiešsaiste) (skatīts 20.01.2006) Pieejams: <http://www.colby.edu/chemistry/CH331/O2%20Solubility.html>
4. Colt, J. (1984). Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity, and pressure. *American Fisheries Society, Special Publication*. No. 14. 154 pp.
5. FAO (Food and Agriculture organization of United Nations). *Site selection for aquaculture: chemical properties of water*. (tiešsaiste) (skatīts 06.04.2006) Pieejams: <http://www.fao.org/docrep/field/003/AC183E/AC183E04.htm>
6. Garcia, H.E., Gordon, L.I. (1992) Oxygen solubility in seawater: Better fitting equations. *Limnology and Oceanography*, 37(6), 1992, pp 1307–1312. (tiešsaiste) (skatīts 29.07.2006) Pieejams: http://www.aslo.org/lo/toc/vol_37/issue_6/1307.pdf
7. Han, K.G. (2002) *Fundamentals of aqueous metallurgy*. p.76. (tiešsaiste) (skatīts 25.04.2010) Pieejams: http://books.google.lv/books?id=jv1W8Q5i_MEC&pg=PA76&dq=Han+solubility&cd=3
8. Keeling, R., McEvoy, E., Manning, A. Atmospheric oxygen concentrations at Alert Station in relation to the global carbon cycle. *Canadian Baseline Program: Summary of Progress to 1998*. (tiešsaiste) (skatīts 22.02.2010) Pieejams: https://bluemoon.ucsd.edu/publications/ralph/26_Alert.pdf

9. Mack, P. *Dissolved Oxygen and the three S.* (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2008) Pieejams: <http://illinois.sierraclub.org/RPG/reports/do1.pdf>
10. Meck Norm. (1996) *Dissolved Oxygen, Koi Club of San Diego*, 1996 (tiešsaiste) (skatīts 26.03.2007) Pieejams: http://www.vcnet.com/koi_net/do.html
11. Moiseeva, N.I. (1995) Decreased oxygen content in the atmosphere—an ecological disaster imperceptibly sneaking up? *Aviakosmicheskaia I Ekologicheskaja Meditsina = Aerospace And Environmental Medicine*, Vol. 29 (3), pp. 52–55.
12. PG&E (2003) (Pacific Gas and Electric Co.) *Municipal wastewater treatment plant energy baseline study, PG&E new construction energy management program*. June 2003. 43 p. (tiešsaiste) (skatīts 24.03.2008) Pieejams: <http://www.cee1.org/ind/mot-sys/ww/pge1.pdf>
13. Reardon, D.J. (1995). Turning down the power. *Civil Engineering*—ASCE, Vol. 65, No. 8, August 1995, pp.54–56.
14. Sawyer, C.N and McCarty, P.L. (1978). *Chemistry for Environmental Engineering*, 3rd Edition. McGraw–Hill Book Company, NY, NY. 532 pp.
15. Sniders, A. (2004) Feedback & Feedforward control of wastewater aeration. **In:** *Proceedings of the International Conference “Advanced technologies for energy producing and effective utilization”*, Jelgava, pp. 124–129, June 2004.
16. Tromans, D. (2000) Modeling Oxygen Solubility in Water and Electrolyte Solutions. **In:** *Industrial and Engineering Chemistry Research.*, 2000, 39 (3), pp 805–812.
17. Weiss, R.F. (1970) The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* Volume 17, Issue 4, August 1970, pp 721–735.
18. YSI. *Oxygen Solubility Table*. (tiešsaiste) (skatīts 21.03.2007) Pieejams: <http://www.ysi.com/media/pdfs/DO-Oxygen-Solubility-Table.pdf>