

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Enerģētikas un elektrotehnikas fakultāte
Industriālās elektronikas un elektrotehnikas institūts

Anatolijs ZABAŠTA

Doktora studiju programmas „Elektrotehnoloģiju datorvadība” doktorants

**DATORVADĪBAS METOŽU UN PIEEJU IZSTRĀDE KRITISKO
INFRASTRUKTŪRU SAVSTARPĒJĀS IETEKMES ANALĪZEI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., asoc. profesore
N. Kuņicina

Rīga 2014

UDK 621.3(043.2)
Za 010 d

Zabašta A. Datorvadības metožu un pieeju izstrāde kritisko infrastruktūru savstarpējās ietekmes analīzei. Promocijas darba kopsavilkums.-R.: RTU Izdevniecība, 2009.- 25 lpp.

Iespiests saskaņā ar IEE institūta 2014. gada 15. maija lēmumu, protokols Nr. 77.



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā “Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai”.

ISBN 978-9934-10-580-7

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

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2014. g. 15. jūlijā Rīgas Tehniskā universitātē Kaļķu 1, 119. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Ivars Raņķis
Rīgas Tehniskā universitāte

Profesors, Dr. sc. ing. Elias Kyriakides
Kipras Universitāte, Kipra

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Andris Šnīders
Lauksaimniecības enerģētikas institūts, Latvijas Lauksaimniecības universitāte

APSTIPRINĀJUMS

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

Anatolijs Zabašta (Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, piecas nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, piecus pielikumus, 57 attēlus, kopā 155 lappuses. Literatūras sarakstā ir 91 nosaukums.

SATURA RĀDĪTĀJS

Tēmas aktualitāte.....	5
Pētījuma mērķis.....	5
Pētījuma uzdevumi.....	5
Zinātniskā novitāte.....	5
Pētījuma metodes.....	6
Darba praktiskais pielietojums.....	6
Autora publikācijas 2010–2014. g.....	6
Promocijas darba struktūra.....	7
1. Metodes un pieejas kritisko infrastruktūru mijiedarbības analīze.....	7
2. Kritisko infrastruktūru mijiedarbības modeļu analīze.....	8
3. Metrikas kritisko infrastruktūru analīzei.....	9
4. Elektroapgādes, telekomunikāciju un ūdensapgādes tīklu mezglu mijiedarbības modeļa izveide un simulācija.....	11
5. Kritiskas infrastruktūras datorvadības metodes, pielietojot bezvadu sensoru tīklus.....	17
Darba kopējie secinājumi.....	24
Izmantota literatūra.....	25

Tēmas aktualitāte

Kritisko infrastruktūru (elektroapgādes, siltumapgādes, ūdensapgādes un informācijas un komunikācijas tehnoloģijas tīklu) drošība, stabilitāte un uzticamība ir cieši saistīta ar savstarpējās mijiedarbības fenomenu. Ja mijiedarbības vairākas liela mēroga kritiskās infrastruktūras, tad tiešās saites starp tās elementiem veido atgriezeniskās saites, kas var radīt savstarpējas ietekmes.

Sakarā ar augošo pārraidīto datu apjomu pieaug atkarība no telekomunikāciju un interneta pakalpojumu sniedzējiem, tāpēc datu drošība un integritāte kļūst par ļoti svarīgu aspektu komunālajiem dienestiem un enerģijas piegādātājiem. Šādos apstākļos pieaug nepieciešamība pēc metodēm un rīkiem, kas ļautu infrastruktūras pārvaldītājiem izvērtēt un prognozēt savas kritiskās infrastruktūras darbību apstākļos, kad citās saistītajās infrastruktūrās notiek kļūmes, avārijas vai pakalpojumu kvalitātes pazemināšanās.

Pētījuma mērķis

Promocijas darba mērķis ir izstrādāt modeli, metodes un metrikas, kas ļautu kvantitatīvi novērtēt elektroapgādes un telekomunikācijas kritisko infrastruktūru ietekmi uz ūdensapgādes kritisko infrastruktūru gadījumos, kad servisa līmenis vai pakalpojumu pārtraukšana elektroapgādes un telekomunikācijas infrastruktūrā apdraud ūdens apgādes infrastruktūras darbību, un pārbaudīt izstrādātās pieejas pareizību ar reālas infrastruktūras piemēru.

Pētījuma uzdevumi

1. Izpētīt kritisko infrastruktūru savstarpējās ietekmes novērtēšanas metodes un piedāvāt metodi, kas ļautu novērtēt elektroapgādes un telekomunikācijas kritisko infrastruktūru ietekmi uz ūdens apgādes kritisko infrastruktūru pilsētās.
2. Piedāvāt metrikas, kas ļautu kvantitatīvi novērtēt elektroapgādes, telekomunikācijas un ūdens apgādes kritisko infrastruktūru savstarpējo ietekmi.
3. Izstrādāt simulācijas modeli, kas ļautu novērtēt elektroapgādes un telekomunikācijas kritisko infrastruktūru ietekmi uz ūdens apgādes kritisko infrastruktūru pilsētās gadījumos, kad servisa līmenis vai pakalpojumu pārtraukšana elektroapgādes un telekomunikācijas kritiskajā infrastruktūrā apdraud ūdens apgādes kritiskās infrastruktūras darbību.
4. Izmantojot imitācijas modeli un izstrādātās metrikas, kvantitatīvi novērtēt elektroapgādes un telekomunikācijas kritiskās infrastruktūras mezglu ietekmi uz ūdens apgādes kritiskās infrastruktūras mezgliem vienā Latvijas pilsētā.
5. Izpētīt tehniskos risinājumus, tehnoloģijas un veidus, kā tiek kontrolēts ūdens apgādes tīkla mezglu stāvoklis, izmantojot bezvadu sensoru tīklus.

Zinātniskā novitāte

1. Darbā ir izpētītas kritisko infrastruktūru savstarpējās ietekmes novērtēšanas metodes un tiek piedāvātas specifiskās metrikas, kas ļauj kvantitatīvi novērtēt elektroapgādes, telekomunikāciju un ūdens apgādes kritisko infrastruktūru savstarpējo ietekmi.
2. Darbā ir izstrādāts imitācijas modelis, kas ir balstīts uz moderno teoriju un tehnoloģijām, ar mērķi izpētīt kritisko infrastruktūru savstarpējo ietekmi.
3. Izmantojot imitācijas modeli, darbā ir eksperimentāli pārbaudīta jauna metode, kas ļauj izpētīt ūdensvada tīkla mezglu vidējā dīkstāves laika atkarību no rezerves barošanas avota darbības laika un rezerves barošanas avota nomainīšanas laika savstarpējas korelācijas noteikto parametru robežās, apstākļos, kad notiek elektroapgādes un telekomunikācijas tīkla dīkstāves.
4. Darbā izpētīti un izstrādāti jauni tehniskie risinājumi, kas ļauj kontrolēt ūdens apgādes tīkla mezglu stāvokli, izmantojot bezvadu sensoru tīklus.

Šis pētījums ir pirmais Latvijā un arī Baltijā, kur ir izstrādāts un eksperimentāli pārbaudīts modelis, kas imitē triju kritisko infrastruktūru savstarpējo ietekmi un kvantitatīvi mēra savstarpējās mijiedarbības.

Pētījuma metodes

Pētījuma gaitā tika izmantotas šādas zinātniskās metodes un paņēmieni: problēmas analīze, risinājumu hipotēzes izvirzīšana, analīze un sintēze, holistiskā – redukcionistiskā pieeja un modelēšana, infrastruktūru mijiedarbības modelēšana ar UML līdzekļiem, datormodelēšana un mijiedarbības imitācija MatLab® Simulink® StateFlow vidē, vairāku kritēriju optimizācijas metode, matemātiskās statistikas metode, eksperimentu plānošana un apstrāde datorprogrammā EDAOpt.

Darba rezultāti tika prezentēti un apspriesti deviņās starptautiskās zinātniskās konferencēs (skat. 1.Pielikumu).

Darba praktiskais pielietojums

Šajā pētījumā izstrādāta metode palīdzēs kritisko infrastruktūru pārvaldītājiem, kas darbojas kopējā teritorijā, novērtēt savstarpējo infrastruktūru ietekmi un plānot riska samazināšanas pasākumus. Piemēram, ja elektroapgādes operators ir informēts par savas infrastruktūras ietekmi uz telekomunikāciju, transporta vai ūdens apgādes kritiskajām infrastruktūrām, tas var noteikt atjaunošanas pasākumu prioritātes ārkārtas situācijās. Vai ūdens piegādātājs, apzinoties elektroapgādes pārtraukumu riskus, var pieņemt lēmumu par rezerves barošanu ūdens apgādes tīkla mezgliem.

Autora publikācijas 2010–2014. g.

1. A.Zabasta, N. Kunicina, Y. Chaiko, L. Ribickis, Automatic Meters Reading for Water Distribution Network in Talsi City, in proceeding of EUROCON 2011, 27-29 April 2011, Lisbon, Portugal, IEEE, Instituto Superior Tecnico, Instituto de Telecomunicacoes, p.1-4, ISBN 978-1-4244-7485-1, Scopus, Xplore.
2. A.Zabasta, N.Kunicina, "Approach for Monitoring and Measurement of Interdependent Services in Critical Infrastructures", Proceeding of the 11th International Symposium, Faculty of Power Engendering, Tallin University of Technology, Pärnu, Igaunija, 2012, 16 – 20.janvārī, ISBN 978-9985-69-051-2.
3. A.Zabasta, N. Kunicina, L. Ribickis, „The problem issues of intelligent monitoring and control of CIS in Latvia”, The journal “Electronics and Electrical Engineering” 2012, Nr.2(118), Kaunas University of Technology, ISSN 1392-1215 (print), ISSN 2029-5731 (online), Scopus, IEEE Xplore.
4. Zabašta A., Šeļmanovs-Plešs V., Kuņicina N, Wireless Sensor Networks Application at Water Distribution Networks in Latvia, Electrical and Control Technologies: Proceedings of the 7th International Conference on Electrical and Control Technologies (ECT 2012), Lietuva, Kaunas, 3.-4. Maijs, 2012. - 40- 43, lpp, ISSN 1822-5934, UDK 621.3(474.5) (06); 681.5(474.5) (06).
5. A.Zabasta, O.Nikiforova, N.Kunicina, “A Risk Based Modeling of Interdependencies in Critical Infrastructures through UML”, 53rd International Scientific Conference of Riga Technical University (RTUCON2012), pp.1-6. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference: Dedicated to the 150th Anniversary and the 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni: Digest. ISBN: 9789934103605
6. A.Zabašta, V.Plešs, N.Kunicina, L.Ribickis, “Wireless sensor networks for optimization of district heating”, 15th International Conference EPE-PEMC 2012, September 4-6, 2012, Novi Sad, Serbija, (Scopus), Proceedings of 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE PEMC 2012 ECCE), DS1d.1-5, IEEE Catalogue Number: CFP1234A-USB, ISBN: 978-1-4673-1971-3
7. A.Zabasta, O.Nikiforova, N.Kunicina, “Application of UML for Risk Based Interdependencies Modelling in Critical Infrastructures”, The 6th International Conference on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation” IMAACA 2012 - DHSS 2012 workshop, pp.1-6. IEEE Xplore, Proceedings of the International Defence and Homeland Security Simulation Workshop 2012, ISBN: 9788897999089.
8. N. Kunicina, A.Zabasta, A. Zhiravecka, A.Galkina, J.Soboleva, A.Patlins, „Embedded Systems for Emergency Situations in Automated Manufacturing of Wooden Briquettes”, Proceeding of the 15th International Conference on Mechatronics – Mechatronika 2012, 5-7.decembrī. pp. 224-229. Scopus. ISBN: 978-80-01-04985-3
9. N. Kunicina, A.Zabasta, J. Soboleva, „Control System Development for Emergency Situations in Automated Manufacturing Line of Wooden Briquettes”, The 9-th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM 2013), 1-3. Jūlijs 2013, Viļņa, Lietuva, abstrakts, P.142-142.
10. A.Zabasta, E.Casaliccio, N.Kunicina, Interdependencies impact on sustainable water infrastructure services, 3rd International Exergy, Life Cycle Assessment, and Sustainability Workshop & Symposium (ELCAS-3), 07 – 09 July, 2013, NISYROS – GREECE, lpp.661-670, IEEE Xplore, ISBN 9789602436912.
11. A.Zabašta, V.Plešs, N.Kunicina, L.Ribickis, Wireless Sensor Networks for Optimisation of District Heating, Journal of Energy and Power Engineering, David Publishing Company, Vol.7, No.7, 2013, 1362. - 1369. ISSN 1934-8975, e-ISSN, 1934-8983.

12. A.Zabašta, V.Dambrauskas, J.Deksnis, V.Deksnis, I.Gudele, K.Kondratjevs, A.Kriaučeliūnas, N.Kuņicina, K.Navalskaite, A.Nolendorfs, V.Šeļmanovs-Plešs, Proceeding of the Project (LLIV-312) „Smart Metering”, Engineering Research Institute, Ventspils International Radio Astronomy Centre of Ventspils University College, 2013, lpp.1-110, ISBN 978-9984-648-43-9.
13. A.Zabašta, T. Juhna, K. Tihomirova, J. Rubulis, L.Ribickis, „Latvian Practices for Protecting Water and Wastewater Infrastructure”, R. M.Clark, S.Hakim, Securing Water and Wastewater Systems, Global Experiences”, Springer, 2014, lpp.315-342, ISBN 973-3-319-01092-5, ISBN 973-3-319-01092-2 (eBook).

Promocijas darba struktūra

Promocijas darbā ir piecas nodaļas.

Promocijas darba 1. nodaļā ir analizētas zinātniskajā literatūrā aprakstītās dažādās pieejas, kuras tiek izmantotas, lai modelētu kritisko infrastruktūru savstarpējo atkarību.

2. nodaļa atspoguļo kritisko infrastruktūru modelēšanai un imitācijai veltīto pētījumu pārskatu.

3. nodaļā autors pēta kritisko infrastruktūru mijiedarbības kvantitatīvos raksturojumus un ar šo mērķi veic metrikas analīzi un klasifikāciju.

4. nodaļā tiek veikta metrikas aprobācija, izpētot triju infrastruktūru (elektroapgādes, telekomunikācijas un ūdensvada tīkls) savstarpējo ietekmi, pielietojot imitācijas modeli..

5. nodaļā autors analizē problēmas, ar kurām sastopas tehniskie speciālisti un pētnieki, kas ievieš praksē kritisko infrastruktūru datorvadības pārvaldības metodes, pielietojot bezvadu sensoru tīklus, un apraksta tehniskos risinājumus, kuri tiek izstrādāti apskatītajos projektos.

1. Metodes un pieejas kritisko infrastruktūru mijiedarbības analīzei

Šajā darbā tiek izmantota Rinaldi [5] ierosināta klasifikācija, pēc kuras atkarības tiek klasificētas šādi: *fiziskā*, *kibernētiskā*, *ģeotelpiskā* un *temporālā*. Uzmanība ir vērsta tikai uz parādībām, kas ir saistītās ar kritisko infrastruktūru *pakalpojumu kvalitātes un/vai funkcionalitātes degradāciju*.

Lai noteiktu savstarpējās atkarības indeksu, turpmāk tiks izmantots abstrakts jēdziens „*neoperējamība*”. *Neoperējamība* nozīmē infrastruktūras vai tās sastāvdaļas nespēju izpildīt tai paredzēto funkciju.

Pamatojoties uz savstarpējās atkarības definīciju, var secināt, ka *neoperējamības* pozitīvais pieaugums vienā infrastruktūrā veicina *neoperējamības* pieaugumu otrā infrastruktūrā, kas tiek izteikts ar (1.1) [2]

$$\frac{A \Leftarrow B}{\mu_{A,i}^T, \mu_{B,j}^T} \rightarrow \Delta x_A(t) = \phi(t, x_A^0, x_B^0, \Delta x_B^0), \quad (1.1)$$

kur mainīgais $t \in [t_0, t_0+T]$, bet x_A^0 izsaka infrastruktūras *A* neoperējamības līmeni, kuru mēra ar metrikas $\mu_{A,i}$ sākuma posmā pirms ietekmes no infrastruktūras *B*; x_B^0 izsaka infrastruktūras *B* neoperējamības līmeni, kuru mēra ar metrikas $\mu_{B,i}$ sākuma posmā pirms neoperējamības rašanās. Δx_A ir neoperējamības līmeņa izmaiņas infrastruktūrā *A* saistībā ar neoperējamības līmeņa palielinājumu infrastruktūrā *B*. Laiks t_0 ir moments, kad tika izraisīta neoperējamība infrastruktūrā *B*; savukārt T ir laikposms, kurā tika novērots neoperējamības efekts.

Saskaņā ar šo definīciju, ir vienkārši nodefinēt *atkarības indeksu*: *atkarības indekss* ir attiecība starp neoperējamības pieaugumu atkarīgajā infrastruktūrā pret neoperējamības pieaugumu ietekmējošajā infrastruktūrā. Tad indekss (1.2) ir mērāms kā atkarības pakāpe starp divām infrastruktūrām, kas reaģē uz neoperējamības izraisīšanu vienā no infrastruktūrām:

$$\delta_{A,B}^T = \left(\int_{t_0}^{t_0+T} \Delta x_A(\tau) d\tau \right) / \left(\int_{t_0}^{t_0+T} \Delta x_B(\tau) d\tau \right). \quad (1.2)$$

Jāņem vērā, ka *atkarības indekss* ir atkarīgs no liela parametru kopuma (1.3):

$$\delta_{A,B} = \delta_{A,B}(x_A^0, x_B^0, \Delta x_B^0, \Delta x_A, \eta_{A,i}, \eta_{B,j}, t_0, T). \quad (1.3)$$

Neoperējamības līmeņa izmaiņas infrastruktūrā A var izteikt attiecībā uz atkarību no infrastruktūras sastāvdaļām q . Infrastruktūra A ir atkarīga no sastāvdaļām q , respektīvi, kad pieaug neoperējamības līmenis šādās sastāvdaļās q , tad palielinās neoperējamības līmenis infrastruktūrā A kopumā:

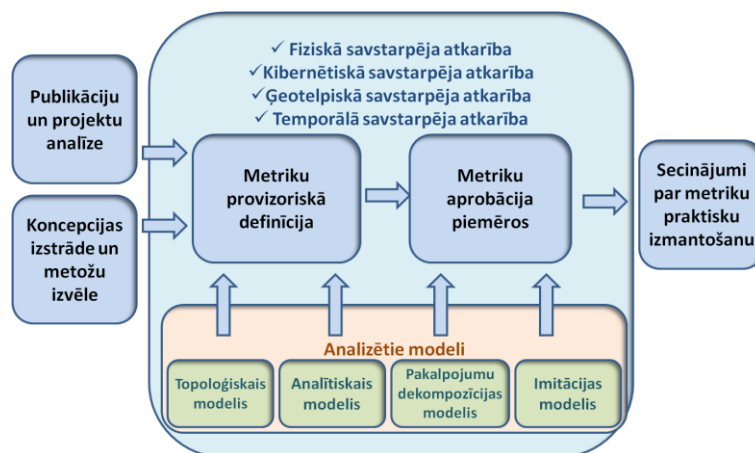
$$\Delta x_A(t) = \phi(x_A^0, x_q^0, \Delta x_q^0) \text{ kur } t \in [t_0, t_0+T]. \quad (1.4)$$

Šeit q var piederēt gan infrastruktūrai A , gan citai infrastruktūrai B . Var secināt, ka *atkarības indekss* raksturo atkarības pakāpi infrastruktūrā A attiecībā uz visiem n komponentiem infrastruktūrā B . Tātad *atkarības indekss* tiks definēts šādi:

$$\begin{aligned} \langle \delta_{A,B(q)}^T \rangle_W &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i [\int_{t_0}^{t_0+T} \Delta x_A(\tau, q_i) d\tau] / [\int_{t_0}^{t_0+T} \Delta x_B(\tau, q_i) d\tau] = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i [\int_{t_0}^{t_0+T} \phi_A(\tau, x_A^0, x_B^0, \Delta x_{q_i}^0) d\tau] / [\int_{t_0}^{t_0+T} \phi_B(\tau, x_A^0, x_B^0, \Delta x_{q_i}^0) d\tau], \end{aligned} \quad (1.5)$$

kur w_i ir katra komponenta q īpatsvars ar $w_i \in [0,1]$.

Relatīvais ilgums $R_{i,j} = T_j/T_i$ ir definēts kā attiecība starp dīkstāves ilgumu T_j infrastruktūrā J un dīkstāves ilgumu T_i infrastruktūrā I , kuras kļūmes kļūst par iemeslu dīkstāvēm J infrastruktūrā.



Att. 1.1. Pētījumā izmantotā metode

Tiek pētīta *fiziskā, kibernetiskā, ģeotelpiskā un temporālā* atkarība, kad par prioritāti tiek izvirzīta datu pieejamība un granularitāte. Pētījumā piedāvātā metode pielieto *holistisku, topoloģisku, holisistisku – redukcionistisku, analītisku un imitācijas* pieeju.

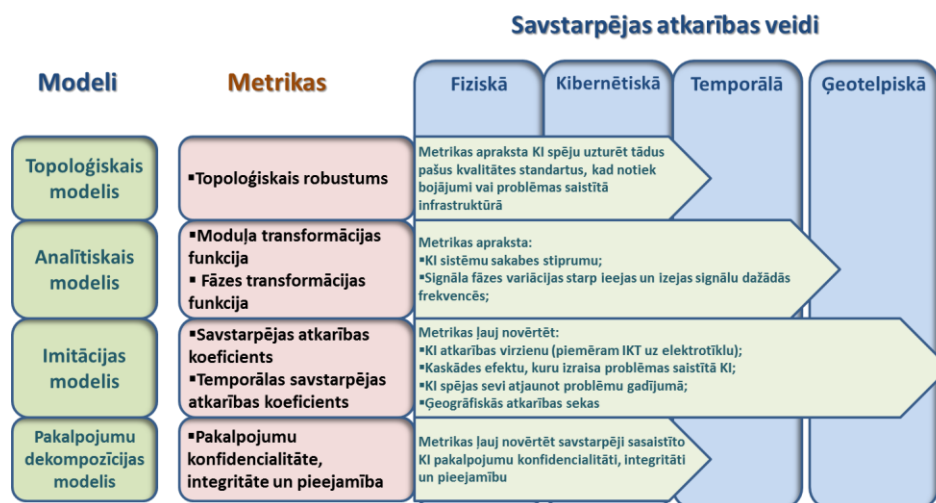
Nosauktās KI atkarības turpmākajās pētījuma nodaļās tiek analizētas, izmantojot četrus modeļus: *topoloģisko, analītisko, pakalpojumu dekompozīcijas un imitācijas modeli*, turklāt katram modelim tiek piedāvātas atbilstošas metrikas KI mijiedarbības kvalitatīvajam un kvantitatīvajam novērtējumam (skat. 1.1 att.).

2. Kritisko infrastruktūru mijiedarbības modeļu analīze

Balstoties uz *datu pieejamības un granularitātes pieeju*, pētījuma autors izanalizēja modelēšanas metožu izmantošanu saistībā ar infrastruktūru savstarpējas atkarības veidiem un izdarīja secinājumus par modeļu izmantošanu (skat. 2.12. attēlu).

Topoloģiskais modelis tiek veiksmīgi pielietots, lai pētītu fiziskās un kibernetiskās savstarpējās atkarības, tomēr tas ir maz piemērots ģeotelpiskās atkarības pētījumam un netika piemērots temporālai atkarībai. Skatoties no mērogojamības viedokļa, *topoloģiskais modelis* ir piemērots dažāda izmēra tīkliem, ņemot vērā modeļa izstrādāšanas un analīzes izmaksas.

Analītiskais modelis tiek viennozīmīgi izmantots, lai modelētu fiziskās, kibernetiskās un temporālās savstarpējās atkarības. Tikmēr ģeotelpiskā savstarpējā atkarība netika vispusīgi modelēta. Balstoties uz modeļa izstrādāšanas izmaksām, *analītiskais modelis* ir visai tuvs *imitācijas modelim*, bet, lai gan *analītiskā modeļa* rezultātu analīze prasa mazāk skaitļošanas resursu, atgriezenisko saišu un transformāciju funkciju definēšana prasa vairāk cilvēkresursu.



2.12. att. Izskatīto modeļu pielietojums KI mijiedarbības pētījumiem

Šajā nodaļā ir parādīts, ka *Pakalpojumu dekompozīcijas modelis* tiek veiksmīgi pielietots, lai pētītu savstarpējās atkarības starp pilsētas ūdens sadales tīklu, kas demonstrē savu pakalpojumu atkarību no elektroenerģijas piegādātāja pakalpojumiem, un telekomunikāciju pakalpojumu sniedzēja, izmantojot uz riska balstītu metodiku.

Imitācijas modelis dod iespēju modelēt visus savstarpējās atkarības veidus (skat. 2.12. att.). Imitācijas modelis ir vispiemērotākais, lai modelētu un imitētu fiziskās, kibernetiskās un temporālās konsekvences, kuras ūdensvada tīklā izraisa kļūmes, un bojājumus, kas notiek elektroapgādes un telekomunikācijas tīklā, tādēļ imitācijas modelis tiek izmantots triju KI mijiedarbību analīzei konkrētajā piemērā 4. nodaļā.

3. Metrikas kritisko infrastruktūru analīzei

Lai novērtētu mijiedarbības starp infrastruktūru mezgliem, autors izmantoja [1]: *Fiziskās atkarības koeficients (FAK)*, *Kibernetiskās atkarības koeficients (KAK)* un *Ģeotelpiskās atkarības koeficients (ĢAK)*.

Ūdens infrastruktūras Fiziskās atkarības koeficients:

$$FAK_{NW} = \frac{N(NW | NP)}{N(NP)}, \quad (3.1)$$

kur $N(NP)$ ir elektroapgādes tīkla mezglu darbības traucējumu proporcija un $N(NW/NP)$ ir ūdensapgādes tīkla mezglu darbības traucējumu proporcija energosistēmas zudumu dēļ.

Telekomunikācijas infrastruktūras Fiziskās atkarības koeficients:

$$FAK_{NT} = \frac{N(NT | NP)}{N(NP)}, \quad (3.2)$$

kur $N(NT/NP)$ telekomunikācijas tīkla mezglu darbības traucējumu proporcija energosistēmas zudumu dēļ. $N(NP)$ ir jāizvērtē kā skaitu, kad elektroapgādes infrastruktūra vai tās sastāvdaļas degradēja pakalpojumu kvalitāti ārēju notikumu dēļ T laika intervālā.

Kibernetiskās atkarības koeficients:

$$KAK_{NP} = \frac{N(NP | NT)}{N(NT)}, \quad (3.3)$$

kur $N(NP)$ ir elektroapgādes tīkla mezglu darbības traucējumu proporcija un $N(NP/NT)$ ir elektroapgādes tīkla mezglu darbības traucējumu proporcija sakaru pārtraukumu dēļ.

Ģeotelpiskās atkarības koeficients:

$$GAK_{NWTP} = \frac{N(NW | NP)}{N(NP)} + \frac{N(NT | NP)}{N(NP)} + \frac{N(NP | NT)}{N(NT)}, \quad (3.4)$$

kur $N(NW/NP)$, $N(NT/NP)$ un $N(NP/NT)$ ūdens, telekomunikāciju un elektroapgādes infrastruktūru traucējumu proporcija ģeotelpisku faktoru dēļ.

Apskatot koeficientus (3.1)-(3.4), var pieņemt, kā tā vērtība var būt mazāka, lielāka vai ekvivalenta "1". Ja $N(NW/NP)/N(NP) \geq 1$, tas nozīmē, ka ūdensapgādes tīkla mezgliem ir spēcīga atkarība no elektroapgādes tīkla mezgliem.

Laika mērogā izteiktās savstarpējās atkarības

Jēdziens *Relatīvais ilgums* var būt izmantots scenārijā, kurā notiek elektroapgādes, telekomunikācijas un ūdens apgādes tīkla mijiedarbība, lai mērītu *Fiziskās atkarības relatīvo ilgumu (FRI)* un *Kibernētiskās atkarības relatīvo ilgumu (KRI)*.

Ūdens apgādes tīkla mezglu *Fiziskās atkarības relatīvais ilgums*:

$$FRI_{NW} = \frac{T(NW)}{T(NP)} \quad (3.5)$$

Telekomunikācijas tīkla mezglu *Fiziskās atkarības relatīvais ilgums*:

$$FRI_{NT} = \frac{T(NT)}{T(NP)}, \quad (3.6)$$

Kibernētiskās atkarības relatīvais ilgums:

$$KRI_{NP} = \frac{T(NP)}{T(NT)}, \quad (3.7)$$

Papildus definētām metrikām 2.sadaļā tika definētas arī metrikas:

- **Tīkla topoloģiskais robustums** = $\langle 1 - P2 \rangle$.
- Pētot uz **analītiskās pieejas** balstītus modeļus, tiek definētas metrikas:
 - *Moduļa transformācijas funkcija* $|G(j\omega)|$, kas nodrošina metriku, ar kuru var mērīt saikni starp infrastruktūrām, kuru darbību modelē.
 - *Fāzes transformācijas funkcija* $\angle G(j\omega)$, kas analīze fāzes atšķirības starp ievades un izejas signālu dažādos frekvenču intervālos.
- Pētot uz **pakalpojumu dekompozīcijas** principiem balstītus modeļus, tiek definētas metrikas:
 - *Konfidencialitāte*: nav neatļautas informācijas izpaušanas attiecībā par datiem, kuru izmanto kritiskā infrastruktūra;
 - *Integritāte*: nav neatļautas izmaiņu sistēmas saistībā ar kritisko pakalpojumu sniegšanu;
 - *Pieejamība*: gatavība sniegt kritisko pakalpojumu ar atbilstošu servisa līmeni.

Iegūtie rezultāti tiek apkopoti 3.1. tabulā:

Metrikas kritisko infrastruktūru mijiedarbības novērtēšanai

Nr.	Metrikas	Savstarpējas atkarības veids			
		Fiziskās	Kibernētiskās	Ģeotelpiskās	Temporālas
1	Fiziskās atkarības koeficients	Jā	Jā	Jā	Nē
2	Kibernētiskās atkarības koeficients	Jā	Jā	Jā	Nē
3	Ģeotelpiskās atkarības koeficients	Jā	Jā	Jā	Nē
4	Fiziskās atkarības relatīvais ilgums un Kibernētiskās atkarības relatīvais ilgums:	Nē	Nē	Nē	Jā
5	Tīkla topoloģiskais robustums	Jā	Jā	Nē	Nē
6	Moduļa transformācijas funkcija un Fāzes transformācijas funkcija	Jā	Jā	Nē	Jā
7	Pakalpojuma konfidencialitāte, integritāte un pieejamība	Jā	Jā	Nē	Nē

4. Elektroapgādes, telekomunikāciju un ūdensapgādes tīklu mezglu mijiedarbības modeļa izveide un simulācija

Piedāvātais modelēšanas scenārijs imitē ūdensapgādes tīkla mezglu mijiedarbību ar elektroapgādes un telekomunikācijas tīkla mezgliem.

Tiek izvirzīts pieņēmums:

- Piedāvātais modelis ļauj izpētīt ūdensapgādes tīkla mezglu vidēja dīkstāves laika atkarību no rezerves barošanas avota darbības laika (RBDL) un rezerves barošanas avota nomainīšanas laika (RBNL) savstarpējās korelācijas noteikto parametru robežās un apstākļos, kad notiek elektroapgādes un telekomunikācijas tīkla dīkstāves.
- Ir iespējams izvērtēt savstarpējas mijiedarbības ar polinomu, un minimizētu ūdensapgādes tīkla mezglu vidējo dīkstāves laiku noteikto parametru robežās.

$$R_{i,j,k} = f(t, m_j^1, m_j^2, \dots, m_j^p, m_k^1, m_k^2, \dots, m_k^p; m_i^1, m_i^2, \dots, m_i^r) \rightarrow \min, \text{ kur } m_j^l \in M_j; m_k^n \in M_k; m_i^r \in M_i$$

$R_{i,j}$ - funkcija $f(\cdot)$ laika t . Specifisku metriku kopa: M_j (elektroapgādes tīkls), M_k (telekomunikācijas tīkls) un M_i , (ūdens apgādes tīkls), kurus izmanto, lai mērītu infrastruktūru j , k un i rezultativitātes līmeni.

Modeļa parametru izvēle un pamatojums

Rezerves barošanas avota darbības laiks (RBDL): balstoties uz iepriekšējo analīzi, tika izvēlēts ūdens apgādes tīkla mezglu darbības laiks no rezerves barošanas avotiem 0.1–6 stundas robežās.

Rezerves barošanas avota nomainīšanas laiks (RBNL), tiek pieņemts robežās starp 4–48 stundām.

Elektroapgādes tīkla mezglu parametru izvēles pamatojums

Elektroapgādes tīkla mezglu parametri tika izvēlēti, izanalizējot SAFI, SAIDI un CAIDI dati par Talsu un Ventspils sadales tīkla iecirkņiem un par Latviju kopā par 2011. Izmantojot minētus datus, tiek aprēķināti modeļa parametri: (skat. 4.3. tabulu).

Modeļa parametri: dīkstāves laiks un laiks starp bojājumiem

Rādītājs (stundas)	Talsi	Ventspils	Latvija
Vidējais dīkstāves laiks (MTTR average)	2.00	1.98	2.81
Maksimālais dīkstāves laiks (MTTR max.)	6.05	7.02	Nav pieejams
Vidējais laiks starp bojājumiem st. (MTTF average)	43817	66235	1564
Minimālais laiks starp bojājumiem st. (MTTF min.)	13519	20278	Nav pieejams

Rezultātā modelī tiek izmantoti šādi parametri:

- *Vidējais laiks starp bojājumiem*: $1564 : 5 = 313$ st. (200–500 st. robežās)
- *Simulācijas laiks* ir ierobežots 4000 stundās, kas nodrošina 9–12 ciklus.
- *Vidējais dīkstāves laiks*: 2.81 stundas ($\pm 2\sigma = 0.28$ – 5.34 st.)

Telekomunikācijas (GSM) tīkla mezglu parametru izvēles pamatojums

Vidējais laiks starp bojājumiem (MTTF): tiek izmantoti modeļa imitācijas rezultāti.

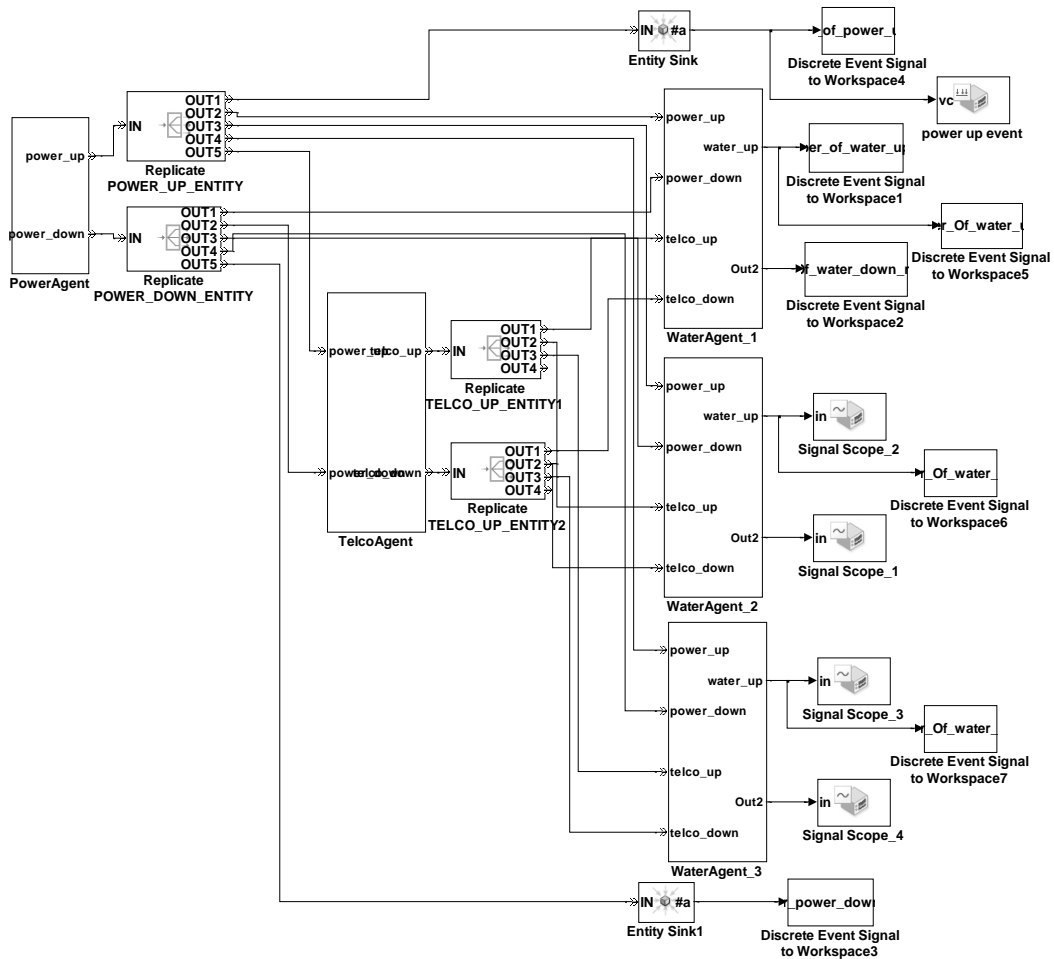
Rezerves barošanas avota darbības laiks - saskaņā ar TELE 2 normatīviem bāzes stacijas rezerves barošanas avota darbības laiks tiek projektēts 2 stundas. Izdarīts pieņēmums, ka minimālais un maksimālais darbības laiks, ko izmantotu modelī, : 0.1–5 stundas.

Vidējais dīkstāves laiks – TELE 2 papildus rezerves barošanas avotiem izmanto pārvietojamus elektroģeneratorus. Izdarīts pesimistisks pieņēmums, ka rezerves barošanas avotu nomaiņa ilgstošu elektroapgādes pārtraukumu gadījumos var svārstīties 3–32 stundu robežās.

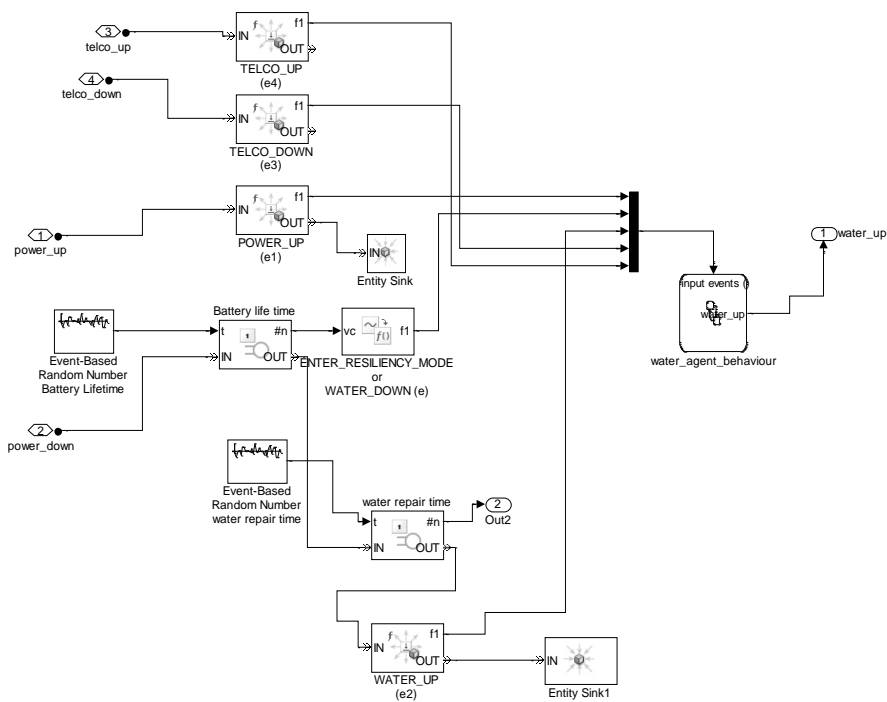
Modeļa apraksts

Šajā pētījumā ir izmantots MatLab® Simulink® StateFlow modelēšanas un imitācijas rīks kā populārs inženieru un zinātnieku modelēšanas rīks. 4.3. attēls atspoguļo sistēmas modeli, kas ietver vienu elektroapgādes tīkla mezglu, vienu telekomunikācijas tīkla mezglu un trīs ŪST mezglus.

Turklāt 4.4. attēls parāda simulācijas modeļa daļu, kas attēlo ūdens mezglu darbību.



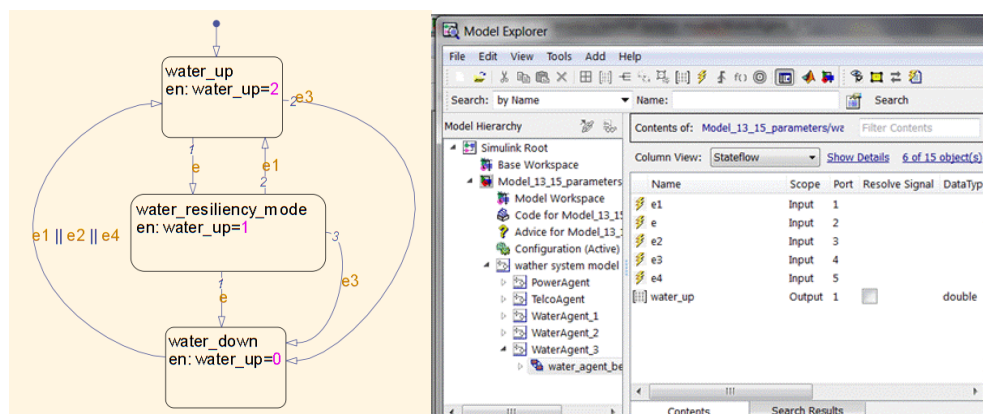
4.3. att. Sistēmas modelis, kas ietver elektroapgādes, telekomunikācijas un ūdens apgādes tīkla mezglus



4.4. att. Simulācijas modeļa daļa, kas attēlo ūdens mezglu darbību

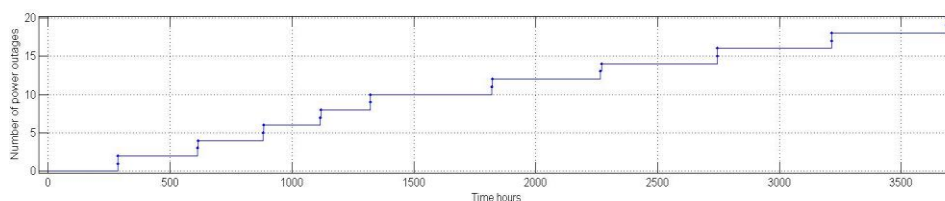
Ūdens mezgla modeļa ievadi (skat. 4.4. attēlu) tiek nodrošināti ar izejām no elektroapgādes tīkla modeļa: *Vidējais dīkstāves laiks* (“power_down”) un *Vidējais laiks starp bojājumiem* (“power_up”). Ievadi no telekomunikācijas tīkla modeļa nāk kā mezglu dīkstāves (“telco_down”) un kā mezglu darbības atjaunošanas signāli (“telco_up”). Pirmais gadījumu skaitļu ģenerators, izmantojot 4.2. nodaļā noteiktus parametrus, ģenerē RBDL, bet otrais gadījumu skaitļu ģenerators ģenerē RBNL parametrus.

„State flow chart” (SFC) uz 4.5a. attēlā pārslēdzas starp ūdens mezgla stāvokļiem: “water up”, “water node in resilience mode” (saņem barošanu no rezerves avota) un “water down”, kad ūdens mezgls nedarbojas normālā režīmā elektroapgādes vai telekomunikācijas infrastruktūras kļūmes dēļ. Attēls 4.5b. demonstrē mijiedarbību starp ievadiem, funkcijām un portiem ūdens mezgla SFC.

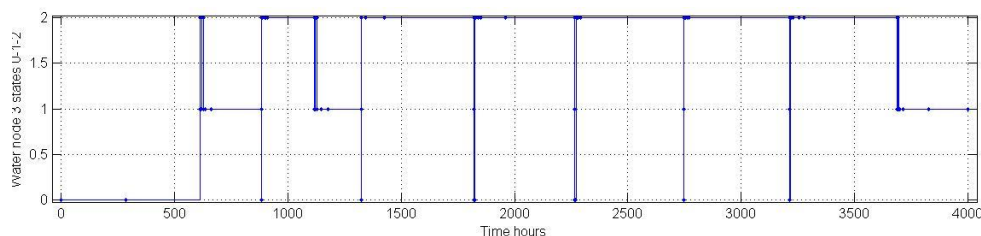


4.5. att. a) Ūdens tīkla „State Flow Chart”; b) Model Explorer, kurš demonstrē mijiedarbību starp ievadiem, funkcijām un portiem ūdens mezgla SFC

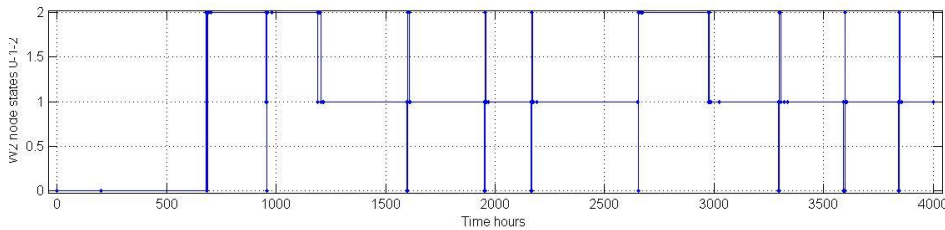
Attēls 4.6. parāda elektroapgādes mezglu dīkstāvju skaitu, savukārt attēli 4.7. un 4.8. parāda ūdens apgādes tīkla mezglu stāvokli, kur “2” nozīmē normālo darbības režīmu, “1” – mezgls nodrošina savas funkcijas, izmantojot rezerves barošanas avotu, un “0” – mezgls nefunkcionē sakarā ar elektroapgādes trūkumu, vai sakarā ar to, ka nedarbojas atbilstošais telekomunikācijas tīkla mezgls.



4.6. att. Elektroapgādes tīkla mezgla dīkstāves imitācijas laikā



4.7. att. Ūdens apgādes tīkla mezgla (W1) dīkstāves imitācijas laikā: 0-1-2



4.8. att. Ūdens apgādes tīkla mezgla (W2) dīkstāves imitācijas laikā: 0-1-2

Modeļa imitācijas rezultāti ir apkopoti 4.4. tabulā. Detalizētie imitācijas rezultāti atrodas 3. Pielikumā.

Imitācijas rezultāti norāda uz ciešo saikni starp kļūmēm elektroapgādes tīklā un dīkstāvēm ūdens sadales tīklā, jo ūdens infrastruktūras:

$$\text{Fiziskās atkarības koeficients } FAK_{NW} = \frac{N(NW | NP)}{N(NP)} = 116/150 = 0.77$$

Ūdensvada mezglu vidējais dīkstāves laiks 2.36 st. un elektroapgādes tīkla mezglu vidējais dīkstāves laiks 2.69 st., tāpēc laika mērogā fiziskās atkarības koeficients:

$$\text{Fiziskās atkarības relatīvais ilgums: } FRI_{NW} = \frac{T(NW)}{T(NP)} = 0.88.$$

Ja izmantot ūdensvada mezglu vidējo dīkstāves laiku, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu, proti, 1.80 stundas, tad $FRI_{NW} = \frac{T(NW)}{T(NP)} = 0.67$.

4.4. tabula

Modeļa imitācijas rezultātu kopsavilkums

Imitācijas rezultāti								
Imitācijas kārtas	1	2	3	4	5	6	7	8
Ūdensvada mezglu rezerves barošanas avota darbības laiks (st.)	0.1	3	6	1.5	4.5	5.5	2.75	1
Ūdensvada mezglu rezerves barošanas avota nomainīšanas laiks (st.)	48	24	4	36	12	46	43	38
Ūdensvada mezglu vidējais dīkstāves laiks (st.)	2.27	2.34	1.49	1.81	2.12	2.65	2.14	1.75
Elektroapgādes tīkla mezglu vidējais dīkstāves laiks (st.)	2.34	2.34	2.34	2.55	2.55	2.55	2.49	2.49
Laika mērogā fiziskās atkarības koeficients	0.97	1.00	0.64	0.71	0.83	1.04	0.86	0.70
Ūdensvada mezglu vidējais dīkstāves laiks, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu (st.)	2.27	1.56	0.99	1.92	1.65	1.77	1.71	1.81
Laika mērogā fiziskās atkarības koeficients, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu	0.97	0.67	0.42	0.75	0.65	0.69	0.69	0.73

Imitācijas rezultāti									
Imitācijas kārtas	9	10	11	12	13	14	15	Vidējais kopumā	
Ūdensvada mezglu rezerves barošanas avota darbības laiks (st.)	4	2.5	1.75	5	0.5	3.5	2		
Ūdensvada mezglu rezerves barošanas avota nomainīšanas laiks (st.)	32	28	22	19	15	10	6		
Ūdensvada mezglu vidējais dīkstāves laiks (st.)	2.88	3.16	1.74	3.62	2.42	2.60	2.46	2.36	
Elektroapgādes tīkla mezglu vidējais dīkstāves laiks (st.)	2.49	3.16	3.30	3.30	2.80	2.80	2.80	2.69	
Laika mērogā fiziskās atkarības koeficients	1.16	1.00	0.53	1.10	0.86	0.93	0.88	0.88	
Ūdensvada mezglu vidējais dīkstāves laiks, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu (st.)	1.73	2.01	1.74	1.98	2.42	1.82	1.57	1.80	
Laika mērogā fiziskās atkarības koeficients, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu	0.69	0.64	0.53	0.60	0.86	0.65	0.56	0.67	

Eksperimenta rezultāti demonstrē ne tikai eskalācijas efekta trūkumu, bet arī ŪST mezglu ievērojamu dīkstāvju laika samazināšanu, jo laika mērogā fiziskās atkarības koeficients, ņemot vērā elektroapgādes tīkla mezglu dīkstāvju skaitu, ir 0.67.

Eksperimenta rezultātu polinomiāla aproksimācija

Imitācijas dati tiek apkopoti ar EdaOpt eksperimentu rezultātu apstrādes rīku, kuru izstrādāja RTU pētnieki.

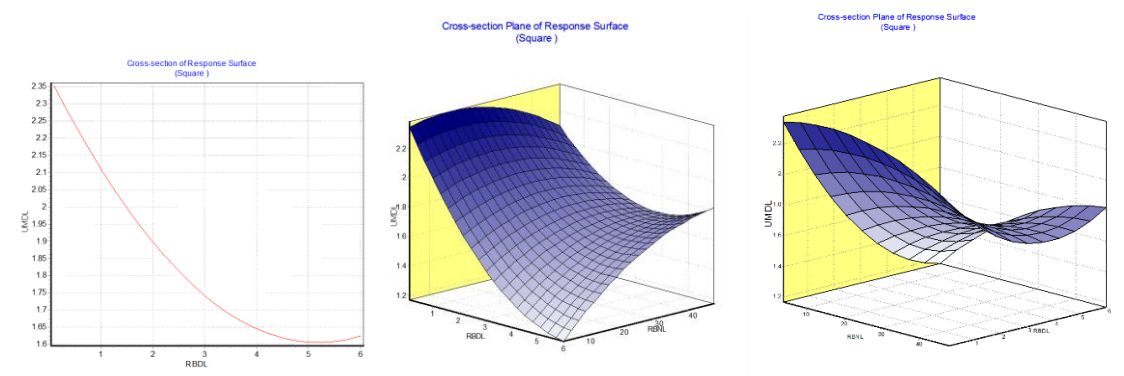
Tiek analizēta ūdensvada tīkla mezglu vidēja dīkstāves laika (ŪMDL) rādītāja atkarība no rezerves barošanas avota darbības laika (RBDL) un rezerves barošanas avota nomainīšanas laika (RBNL) rādītāju savstarpējas korelācijas noteikto parametru robežās. 4.10. attēla var redzēt divu un trīs dimensiju attēlus, kas demonstrē korelācijas starp ūdens apgādes tīkla mezglu RBDL, RBNL un ūdensvada mezglu vidējo dīkstāves laiku ŪMDL.

Ar EdaOpt palīdzību tiek izrēķināti polinoma koeficienti kvadrātiskai aproksimācijai ar viena mēģinājuma izslēgšanu. Rezultāta ir šāds polinoms:

$$R = 2.3532 - 0.3894 * X_1 + 0.00812 * X_2 + 0.0289 * X_1 * X_1 + 0.0035 * X_1 * X_2$$

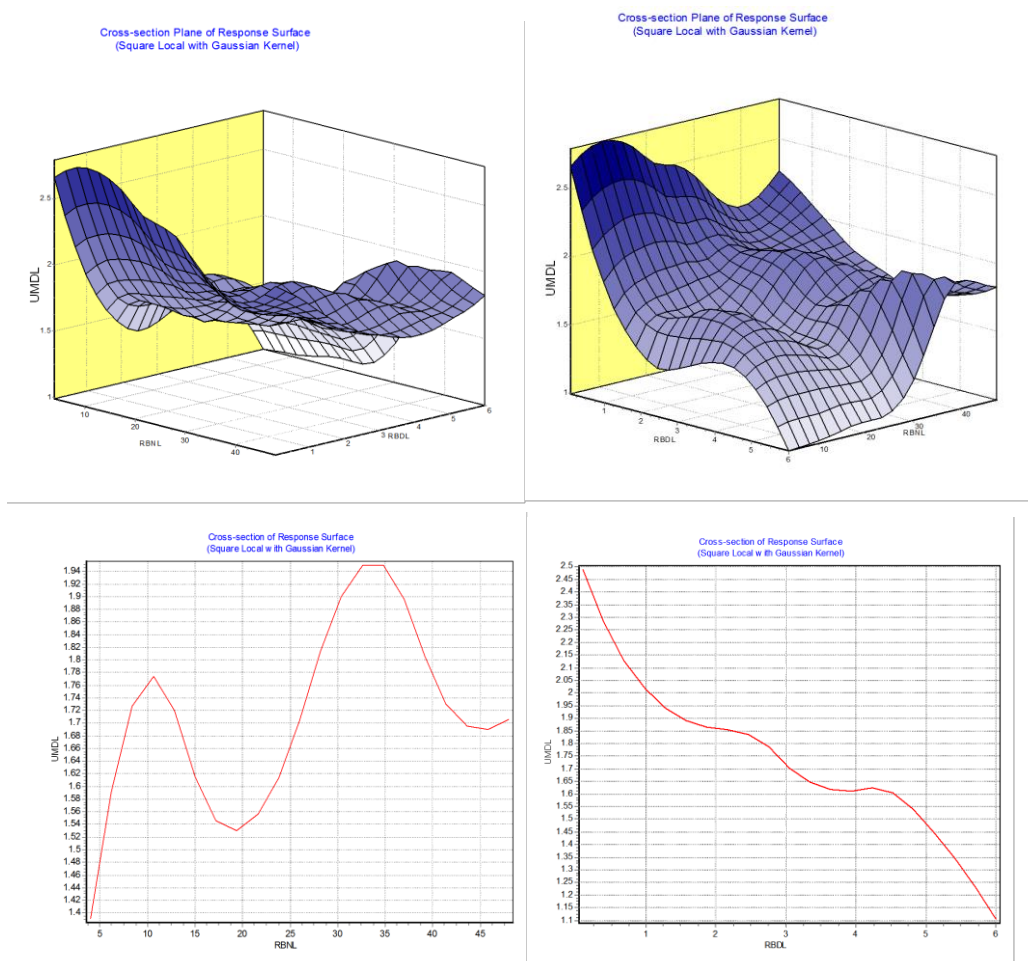
Savukārt kvadrātiskai aproksimācijai ar divu mēģinājumu izslēgšanu deva šādu polinomu:

$$R = 2.2919 - 0.4901 * X_1 + 0.0201 * X_2 + 0.0448 * X_1 * X_1 + 0.0037 * X_1 * X_2$$



4.10. att. Kvadrātiskā aproksimācija ar viena punkta izslēgšanu

Turpmāk tiek veikta lokāla aproksimācija ar mērķi konstatēt iespējamo lokālos minimumus. Aplūkojot 4.11. att., var redzēt vismaz divus lokālus minimumus.



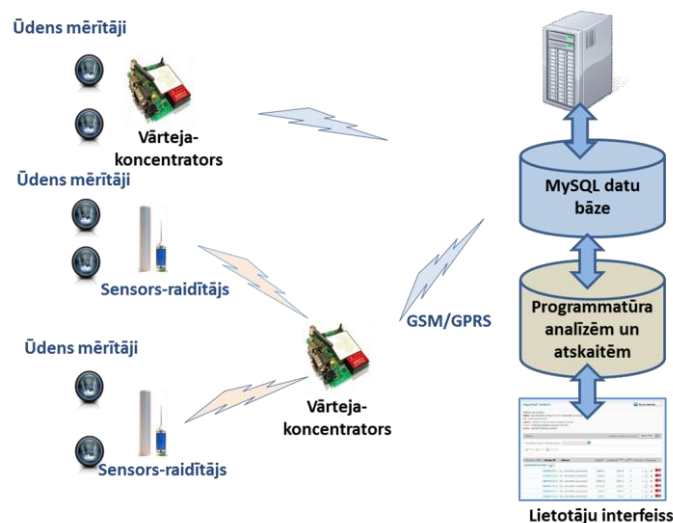
4.11. att. Lokāla kvadrātiskā aproksimācija ar viena punkta izslēgšanu

5. Kritiskas infrastruktūras datorvadības metodes, pielietojot bezvadu sensoru tīklus

Šajā sadaļā tiek aprakstīti tehniskie risinājumi, izstrādātie projekti, kuros piedalījās disertācijas autors.

Talsu novada datorizētas ūdenssaimniecības vadības kontroles sistēmas apraksts (2009–2011. g.)

Talsu novada datorizētas ūdenssaimniecības vadības un kontroles sistēmas tehnisko risinājumu [4] var apskatīt 5.1. attēlā.



5.1. att. Tehniskā risinājuma blokhēma (Zabašta [6])

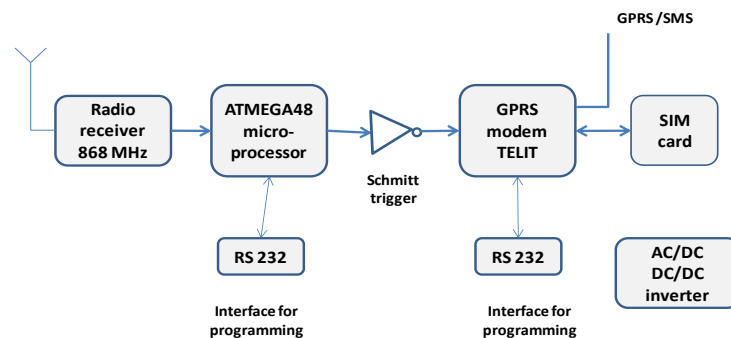
Kontroles sistēma izmanto šādus risinājumus:

- Ūdens plūsmas un ūdens spiediena mērītāji ar impulsu izejām nodrošina datus uz sensoriem - raidītājiem. Tie ir aprīkoti ar piederumu ("herkons"), kas pārveido magnētiskus signālus par elektriskiem impulsiem;
- Datu pārraide no sensoriem uz vārtejām - koncentratoriem tiek veikta, izmantojot „Short Range Devices” (SRD) nelicencētu telemetrijas joslu 868 MHz;
- GSM tīkls (GPRS) tiek izmantots datu pārraidei starp vārtejām - koncentratoriem un serveri;
- MySQL datu bāze tiek izmantota mērīšanas datu uzglabāšanai un apstrādei;
- Sistēmas lietotāju piekļuve datu bāzei tiek īstenota, izmantojot Web interfeisu.

Šāds risinājums nodrošina šādas priekšrocības:

- Centrālo serveri var izvietot jebkurā Latvijas vai ārzemju datu centrā, kur ir pieejams interneta pieslēgums;
- Izvēlēties jebkuru pieejamo GSM tīkla operatoru vai vairākus operatorus vienlaicīgi;
- Izmantot esošos mobilo operatoru tīklus un neveikt investīcijas telekomunikācijas tīkla attīstībā;
- Izmantot konkurences priekšrocības starp tīkla operatoriem, izvēloties vislabākās cenas un pakalpojumus;
- Attīstīt vadības un kontroles sistēmu un pievienot jaunus klientus bez lieliem kapitāliem ieguldījumiem;

Vārteja – koncentrators, attēlotais 5.2. att. periodiski saņem mērījumu datus, kas tiek nosūtīti no ūdens plūsmas un ūdens spiediena mērītājiem un pārraida tos uz serveri.



5.2. att. Vārtejas – koncentrators blokshēma (Talsi)

Vārtejas - koncentratoru galvenie elementi:

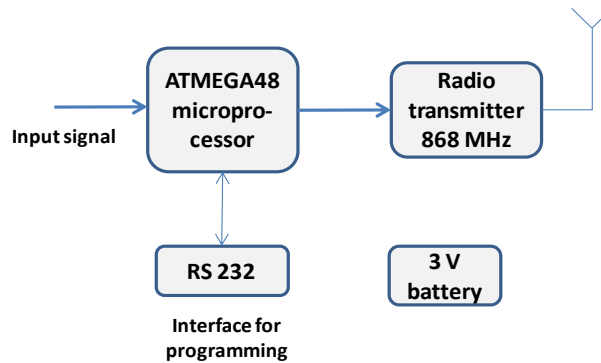
- Mikrokontroleris (Atmel), kas kontrolē uztvērēju un visu koncentratoru. Tā ir arī uzglabāšanas vieta uzskaites datiem, kas iegūti no pakļautiem sensoriem.
- Uztvērējs, kas izmanto Short Range Devices (SRD) nelicencētu telemetrijas joslu, 868–870 MHz;
- TELIT GSM modems GM862 (vai vēlākas modifikācijas) datu pārraidei. Tajā ir visi vajadzīgie elementi, lai īstenotu GPRS modema funkcijas. Modemam ir iekšējais procesors un atmiņa, lai veiktu programmēšanu Python valodā.

Sensora - raidītāja galvenā funkcija ir saņemt impulsus no skaitītāja, pārveidot tos ziņojumos un pārraidīt ar noteikto periodiskumu uz piesaistītu koncentratoru.

Sensora - raidītāja blokshēma (skat. 5.3. att.) sastāv no šādiem moduļiem:

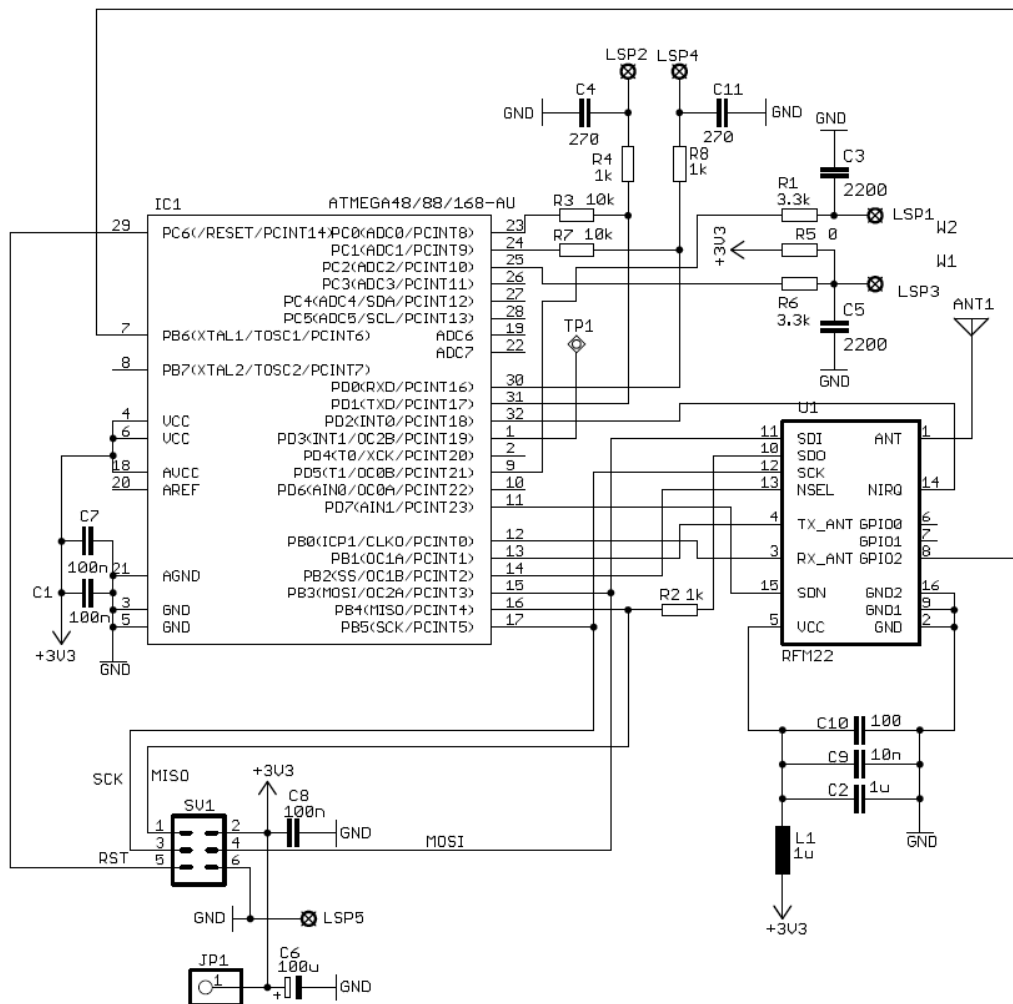
- ATMEGA48/88 mikroprocesors, kas saņem impulsus no plūsmas un spiediena mērītājiem, pārveido ziņojumā (par „telegrammu”) un nodod tos raidītājam. Mikroprocesors ir savienots ar mērītāju ar vadu ķēdi. Tas uztver herkona releja stāvokļa izmaiņas (impulsus) un reģistrē tos savā atmiņā.
- Mikroprocesors izmanto "C" valodā rakstītu programmu. Pielāgotais lokālām vajadzībām Wireless M-Bus protokols tiek izmantots, lai izveidotu radio saiti.

- Raidītājs RFM22, kas pārraida telegrammas uz koncentratoru, izmanto 868 MHz frekvenci.
- Barošanas moduli nodrošina 3 V baterija, kuras darbības laiks ir aprēķināts apmēram uz 6–10 gadiem.



5.3. att. Sensora - raidītāja blokhēma [6]

5.4. attēlā ir parādīta sensora – raidītāja ICR augšējās plates (RR42) elektriskā shēma.



1. RFM22 vieta likt RFM42.
2. Zem RFM42 likt planu izolāciju.
3. Rezistoru R5 nemontēt.

Att. 5.4. Sensora – raidītāja ICR augšējās plates (RR42) elektriskā shēma

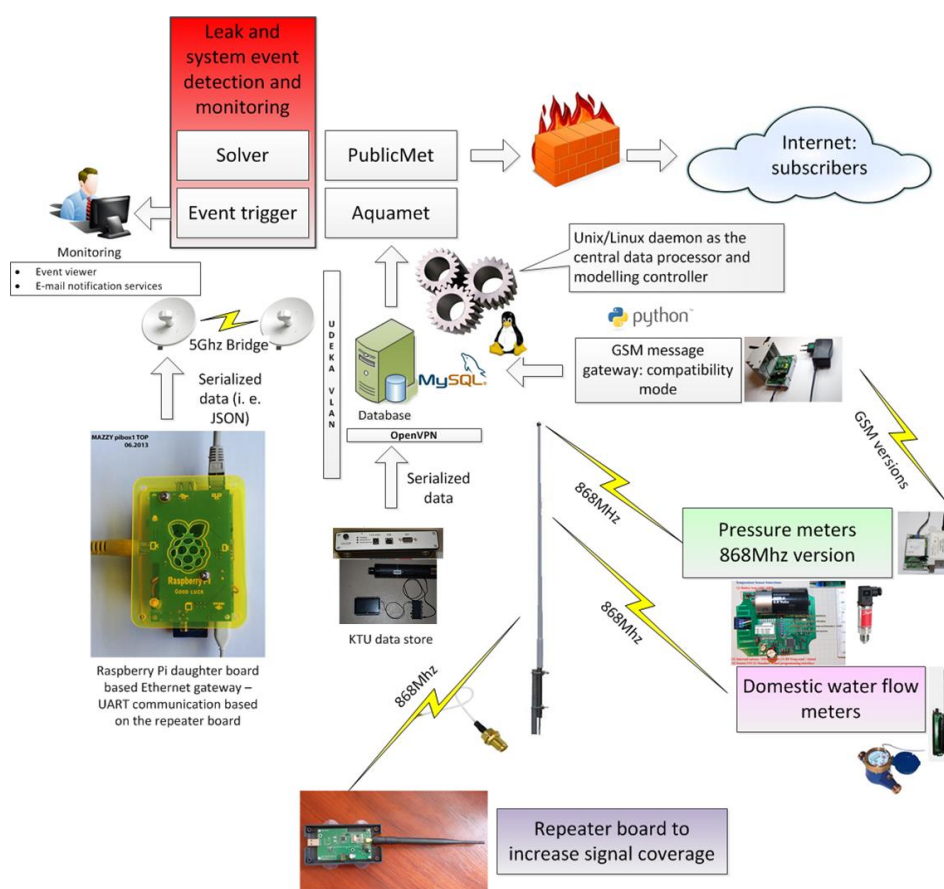
Attēlā 5.5. var redzēt sensoru – raidītāju ICR ar 3 V bateriju, kas atrodas starp augšējo un apakšējo plati.



5.5. att. Sensora - raidītāja ārējais izskats

Bezvadu sensoru tīkla tehnoloģijas pētījumi un eksperimenti Ventspilī (2012–2013. gads, dalībnieki: Ventspils Augstskolas VIRAC, Kauņas Universitātes Telekomunikāciju un elektronikas fakultāte, Latvijas Interneta Asociācija un Ventspils Ūdeka).

Eksperimentiem tiek izvēlēts ūdensvada tīkla slēgts segments ar vairākiem atzarojumiem. Tīkla ievads ir kontrolēts ar SCADA, kas nodrošina ieejas spiediena un plūsmas mērījumus.



5.8. att. “Smart Metering” sistēmas blokhēma (Zabašta u.c. [7])

„Smart Metering” sistēma, kuru izveidoja projekta gaitā, sastāv no šādām sastāvdaļām (skat. 5.8. att.) :

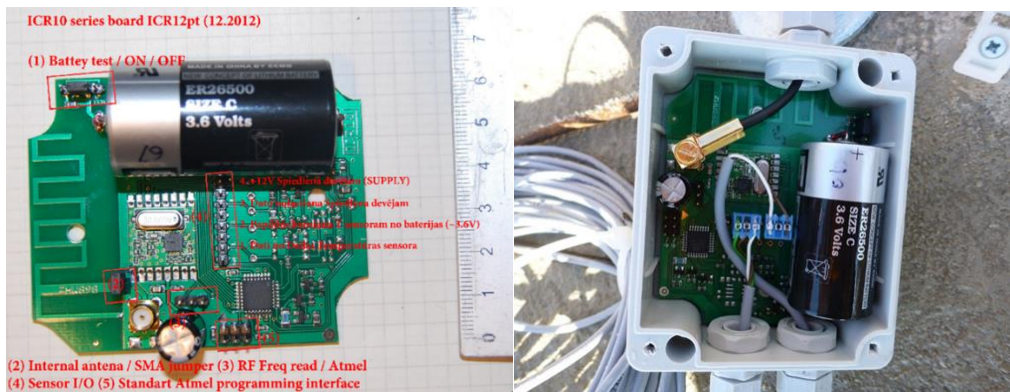
- Ūdens patēriņa un spiediena mērītāji;
- Sensori - datu pārraides ierīces, ISM diapazons 868 MHz;
- Ethernet vārtejas, kas pārveido signālus no sensoriem uz TCP/IP;
- 5 GHz Bridge, lai nodrošinātu datu plūsmu uz esošo pašvaldības Wi-Fi tīklu;
- GSM datu pārraides vārtejas;
- Sistēmas notikumu un noplūžu monitoringa un noteikšanas sistēma;
- Centrālā datu bāze;

- Tehniskais risinājums datu uzglabāšanas Kauņas Tehniskās Universitātes mērījumiem, veiktiem uz siltumtrasēm;
Smart Metering sistēmas visaptverošs apraksts ir sniegts turpmākajās nodaļās.

Sensori - transiveri

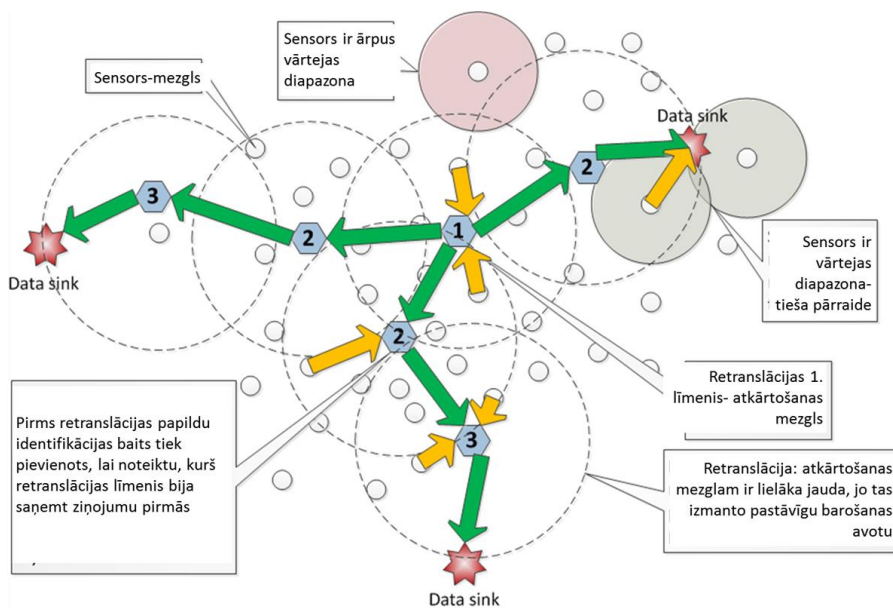
Vieglākai prototipēšanai un lētākai radio frekvences integrālās shēmas izmantošanai, tiek izvēlēts “HopeRF Electronics” radio frekvenču (RFM (22B/23B) modulis. Šādi mikročipi nodrošina vieglu integrāciju ar Atmel sēriju (ATMEGA48, ATmega88, ATMEGA168, ATmega328). Mikrokontrolera komunikācija ar radio moduli tiek veikta, izmantojot SPI (Serial Peripheral Interface Bus). Modulācijas shēma GFSK (Gausa Frequency-Shift Keying) tika izvēlēta, jo tā ir pielāgota izplatītākajām bezvadu sakaru tehnoloģijām, tādām kā Bluetooth, DECT utt. Papildus GFSK modulācijai “Manchester” kodēšanas shēma [3] tiek izmantota komunikācijās procesā.

Attēlā 5.9. ir parādīts sensora – raidītāja ārējais izskats ar iezīmētiem kontaktiem, kurus izmanto aparatūras testēšanai un programmēšanai.



5.9. att. Sensora – raidītāja ārējais izskats

Viena no tipiskām bezvadu tīklu problēmām rodas saistībā ar sūtījumu kolīzijām un maršrutizācijas kontroli. Ņemot vērā, ka pārraide notiek tikai vienā virzienā, neveidojas slēptie mezgli un citas problēmas. Izstrādātais risinājums (skat. 5.11. att.) paredz pirms ziņojuma retranslācijas papildu identifikācijas baita pievienošanu, lai būtu iespējams noteikt, kādu retranslācijas līmeni retranslē ziņojumā.



5.11. att. Ziņojumu retranslācijas metodes apraksts (Zabašta u.c. [7])

Ethernet vārteja - koncentrators

Ethernet vārtejas pirmā versija sastāv no uztveršanas ierīces, kas ir savienota ar "Raspberry Pi" mikroatoru (izmantojot USB seriālo interfeisu). Mikroatoru vadības programmatūra nosūta pakalpojumu komandas, lai iegūtu mērījumu datus no sensoru iekšējas atmiņas. Dati tiek serializēti un nosūtīti uz centrālo datu bāzi. Sensoru signālu uztveršanas aparatūrai kā pirmo versiju pielāgoja 868MHz testēšanas ierīci, kas tiek izmantota, lai diagnosticētu sensoru darbību, rādot reālā laikā uz LCD displeja datu pārraides vērtības.

5.17. attēlā kā piemērs ir parādīti uztveršanas aparatūras rādījumi, kas ir attēloti kā vienkārša teksta rindas: mērījumu reģistrēšanas datums, mēness, laiks, seriālais numurs, divu mērītāju rādījumi, baterijas mērījumi (STAT) un saņemta signāla mērījums (RS - tas ir RSSI signāla stiprums).

```
Date Time      SerialNr Count1 Count2 STAT rs fr
00.00 00:00:00 00000000 000000 000000 0000 FA 00
23.01 18:23:39 141B7C9F 000000 000000 031D 6E 00
23.01 12:56:29 141B7C45 000000 000000 0307 65 00
26.01 14:48:10 141B76CC 000CF1 000000 0317 5B 00
24.01 12:12:33 0C00006C 00FFFF 000000 0032 6E 00
24.01 12:06:29 0C000068 00FFFF 000232 0034 79 00
26.01 15:15:47 141B7D21 000001 000000 031B 5D 00
26.01 15:16:59 141B78F6 0058B5 000000 031E 86 00
```

5.17. att. Uztveršanas aparatūras rādījumu piemērs

Piemērā apakšā var redzēt, ka mērījumu dati pēc apstrādāšanas un šifrēšanas tiek nosūtīti no Ethernet vārtejas uz sistēmas centrālo datu bāzi turpmākas apstrādes mērķiem.

```
Setting DateTime: w30012330
Date and Time
30012330
Hash: 48aeac7f70751d80b09a6ac23eb5375b DateTimeRec: 1359581312 Device
type: 10 Device serial: 1B7C45 Value 1: 958 Value 2: 0 Battery: 796 RSSI: 120
http://exec.bitdev.lv/post.php?hash=48aeac7f70751d80b09a6ac23eb5375b&bat
tery=796&timestamp=1359581312&value2=0&value1=958&rssi=120&serial=1B7C45&type
=10
```

Otrā Ethernet vārtejas versija (skat. 5.18. att.) tika veidota pēc vispārēja iegultās platformas principiem ("generic embedded platform"). Tika izvēlēta Raspberry Pi ARM7 platforma, jo tā nodrošina nepieciešamu skaitļošanas jaudu, un tai ir kompozīta videoizeja. Šo ierīci var izmantot arī ar displeju, lai veiktu diagnostiku klātienē uz objektiem. Galvenais sistēmas process, mērījumu datu nolasīšana un piegāde uz sistēmas serveri tika uzrakstīta Python valodā un papildināta ar papildu atbalsta servisiem.



5.18. att. Viena no pirmajām vārtejas versijām (uzstādīta uz pansionāta “Selga” jumtas)

Otrās vārtejas versijā galvenie uzlabojumi:

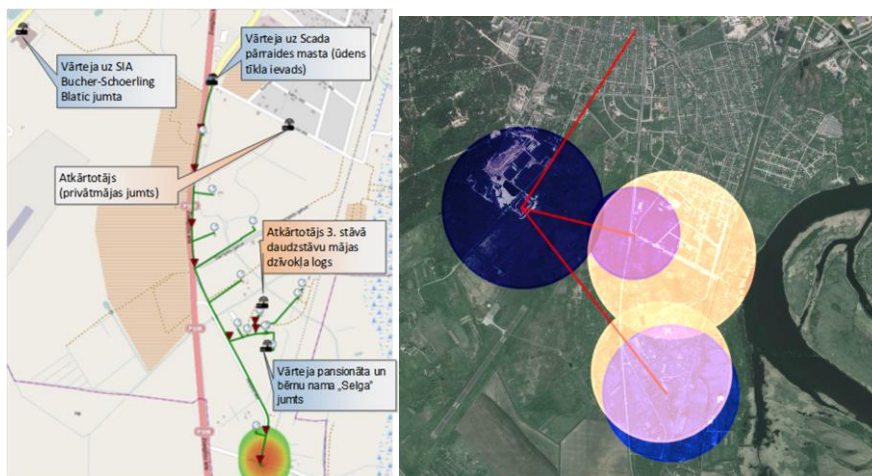
- “Aquamon Multi Threaded Daemon” programmatūra apstrādā USB datus un sagatavo nogādāšanai uz serveri;
- MONIT pakalpojuma paziņojumu un Aquamon pakalpojumu kontrole (e-pasta paziņojumu, problēmu noteikšana, pakalpojumu atjaunošana);
- VPN atbalsts (Tinc, PPTP, OpenVPN);
- Watchdog: Broadcom BCM2708 “watchdog” atbalsts (vārteju uzraudzība, pārslodzes gadījumā restartēšana);
- SD kartes atmiņas un log failu kontrole (RAMLOG).

Pēdēja uz Raspberry Pi Ethernet balstīta vārteja tiek aprīkota ar RF 868MHz uztveršanas “meitas” plati, “heartbeat” norādi, bezvadu tīkla adapteri un drošu izslēgšanas pogu. Kompozītu izeja tiek izmantota ērtai diagnostikas un kontrolei (sk. 5.19. att.).



5.19. att. PiBox Ethernet vārtejas ārējais izskats

5.22. attēlā var redzēt galīgu tīkla izkārtojumu, kur zili apļi atspoguļo Ethernet vārteju uztveršanas zonas, bet dzeltenie apļi parāda retranslatoru uztveršanas - raidīšanas zonas. Kopējais skaits ūdens plūsmas sensoru ir 14, bet ūdens spiediena skaitītāju kopskaits ir 9.



5.22. att. Izmēģinājuma tīkla galīgais variants

Kvalitātes veiktie testi, lai novērtētu sensoru tīkla veiktspēju - kāda mērījumu ziņojumu daļa sasniedz centrālo sistēmu,- atklāja, ka visi dati ir saņemti ar maksimālo kavēšanās laiku 2 stundās.

Darba kopējie secinājumi

- ❖ Balstoties uz *datu pieejamības un granularitātes pieeju*, analizēta modelēšanas metožu izmantošana saistībā ar infrastruktūru savstarpējas mijiedarbības veidiem, un ir pierādīts, ka pakalpojumu dekompozīcijas modelis var būt veiksmīgi izmantots, pielietojot datu pieejamības un granularitātes pieeju.
- ❖ Izpētīts pakalpojumu dekompozīcijas modelis KI mijiedarbības modelēšanai četros etapos reālā scenārijā nelielā Latvijas pilsētas teritorijā, kurā ar UML rīkiem tika izveidots PIM modelis un tika aprobētas uz riska novērtēšanu balstītās metrikas. Atšķirībā no eksistējošiem modeļiem, šis scenārijs ļauj izpētīt pilsētas ūdensapgādes tīkla (Talsi Ūdens), pakalpojumu atkarību no elektroenerģijas piegādātāja (Latvenergo) un telekomunikāciju pakalpojumu sniedzēja (GSM operators) pakalpojumiem.
- ❖ Analizētās un klasificētās kritisko infrastruktūru mijiedarbības kvalitatīvi un kvantitatīvi raksturojošas metrikas un ir pierādīts, ka:
 - ✓ metrikas var klasificēt un apkopot matricā saistībā ar savstarpējās atkarības veidiem, piemēram, *Fiziskās atkarības koeficients, Kibernētiskās atkarības koeficients, Fiziskās atkarības relatīvais ilgums, Tīkla topoloģiskais robustums* u.c.;
 - ✓ metriku praktiskai izmantošanai jānosaka pielietojšanas kritiskās robežas, jo var pieļaut, ka metrikas konkrētie parametri ir pamatoti tikai noteiktās robežās.
- ❖ Izmantojot *MatLab® Simulink® StateFlow* imitācijas modeli, darbā ir izstrādāta un eksperimentāli pārbaudīta metode, kura atšķirībā no eksistējošajām metodēm, ļauj izpētīt ūdensvada tīkla mezglu vidējā dīkstāves laika atkarību no rezerves barošanas avota darbības laika un rezerves barošanas avota nomainīšanas laika savstarpējās korelācijas noteikto parametru robežās, apstākļos, kad notiek elektroapgādes un telekomunikācijas tīkla dīkstāves. Ir pierādīts, ka:
 - ✓ ūdensapgādes mezglu vidējais dīkstāves laiks demonstrē ar kvadrātisko polinomu aprakstīto atkarību no rezerves barošanas avota darbības laika (RBDL) un rezerves barošanas avota nomainīšanas laika (RBNL) savstarpējās korelācijas noteikto parametru robežās;
 - ✓ lai gan aproksimācijas grafiki rāda, ka izpētītu parametru robežās polinomiāla funkcija tiecas uz minimumu tad, kad RBDL tiecas uz maksimumu, tomēr analīze atklāj arī funkcijas lokālus minimumus, kas ir saistīti ar telekomunikācijas tīkla mezglu noturību pret ārējas elektroapgādes pārtraukumiem;

- ✓ rezerves elektroapgādes avotu izmantošana ūdensvada tīkla mezglis ir efektīvs risinājums, ņemot vērā samērīgās izmaksas, tomēr tas nav pietiekošs, lai nodrošinātu nepārtrauktu un drošu datu savākšanu no objektiem, jo *fiziskās atkarības koeficients* ir 0.77, bet *laika mērogā fiziskās atkarības koeficients* ir 0.67;
- ✓ risinājumi, kas nodrošinātu nepārtrauktu un drošu datu savākšanu no ūdensapgādes tīkla objektiem, var būt:
 - rezerves barošanas avota darbības laika palielināšana;
 - papildus (“redundant”) tīkla mezglu izveidošana, šādā veidā palielinot sensoru tīkla robustumu.
- ❖ Izpētot tehniskus risinājumus un tehnoloģijas, ar kurām tiek kontrolēts ūdens apgādes tīkla mezglu stāvoklis, izmantojot bezvada sensoru tīklus, ir izstrādāts un eksperimentāli pārbaudīts:
 - ✓ bezvadu sensoru tīkla vārtejas prototips, kas papildus GSM-GPRS komunikācija kanālam ar centrālo sistēmu piedāvā Ethernet izeju uz bezvada 5.8 GHz tīklu;
 - ✓ ūdensvada spiediena mērījumu datu pārraidīšanas sistēma, kas, atšķirībā no eksistējošiem modeļiem, iekļauj uretāna apvalkā aizsargātu antenu, kuru montē akas vākā, un 868 MNz sensoru – raidītāju;
 - ✓ bezvadu sensoru uzliktais tīkls, kas tiek būvēts, pielietojot zvaigznes topoloģiju, apvienojot RF 868 MHz sensorus, Ethernet vārtejas (5.8 GHz), RF atkārtotājus un SCADA aparatūru, un kas tiek integrēts esošā pašvaldības Wi-Fi tīklā, kas pārklāj pilsētas teritoriju.
 - ✓ “Smart Meter” sistēma, kas sastāv no četriem bāzes komponentiem: Mērītāju datu saņemšanas komponente; Uzraudzības, statistikas un datu vizualizācijas saskarne; Klientu patēriņa statistika uzskaitē un norēķiniem un Noplūžu atklāšanas komponente;
 - ✓ ūdens noplūžu atrašanas ekonomiskā metode, kura, atšķirībā no eksistējošajām metodēm, ļauj ar četrus noplūžu detektorus pielietojumu lokalizēt potenciālu noplūdes atrašanas vietu.
- ❖ Turpmāks pētījuma virziens ir saistīts ar bezvada tīkla elementu attīstību ūdensapgādes infrastruktūras tīkla datorvadībai:
 - ✓ Modulārās vārtejas sakaru interfeisu moduļu izstrāde (GSM/GPRS - mobilie platjoslas pieslēgumi, CAN, Ethernet, 802.11b/g)
 - ✓ Pazeminātas temperatūras un paaugstināta mitruma ietekme uz bezvada tīkla elementiem, tai skaitā uz sensoriem-raidītājiem, uzstādītiem akās.

Izmantota literatūra

1. Buschi S., Casalicchio E., Brasca C., Ciapessoni E., D'Agostino G., Fioriti V., "Definition of a Metric for ICT-PS infrastructures", MIA Activity 4 Report (2010), pp.1-147.
2. D3.1.2 Refined interdependency metrics and indexes for risk prediction formulation – final version”, Project MICIE, FP7, STREP, 22/06/2010, PP.1-186.
3. Manchester Coding Basics Application Note, ATMEL, 9164A–AUTO–09/09, lpp.1028, <http://www.nesweb.ch/downloads/doc9164.pdf>, apskatīts 2014. gada februārī.
4. Projekts „Talsu novada datorizētas ūdenssaimniecības vadības kontroles sistēmas paplašināšana - piegāde un uzstādīšana”, Identifikācijas Nr. TNP 40/10.
5. Rinaldi S. M., Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies, Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences, 2004, pp.1-8.
6. Zabasta A., Kunicina N., Chaiko Y., Ribickis L., “Automatic Meters Reading for Water Distribution Network in Talsi City”, in proceeding of EUROCON 2011, 27-29 April 2011, Lisbon, Portugal, 2011, pp.1-6.
7. Zabašta A., Dambrauskas V., Deksnis J., Deksnis V., et al., Proceeding of the Project (LLIV-312) „Smart Metering”, Engineering Research Institute, Ventspils International Radio Astronomy Centre of Ventspils University College, 2013, pp.1-110.