

TECHNOLOGIES OF COMPUTER
CONTROL

DATORVADĪBAS TEHNOLOĢIJAS

INDUSTRIAL NETWORKS IN TIME CRITICAL
APPLICATIONSINDUSTRIĀLIE TĪKLI LAIKĀ KRITISKOS
UZDEVUMOS

Dmitry Bliznyk, *Ph.d.student*

Riga Technical University

Faculty of Computer Science and Information Technology

Department of Computer Network and System Technology

Address: Meza str.1, LV-1048, Riga, Latvia

E-mail: 6707961@gmail.com

Andris Ozols, *doc.,Dr.ing.*

Riga Technical University

Faculty of Computer Science and Information Technology

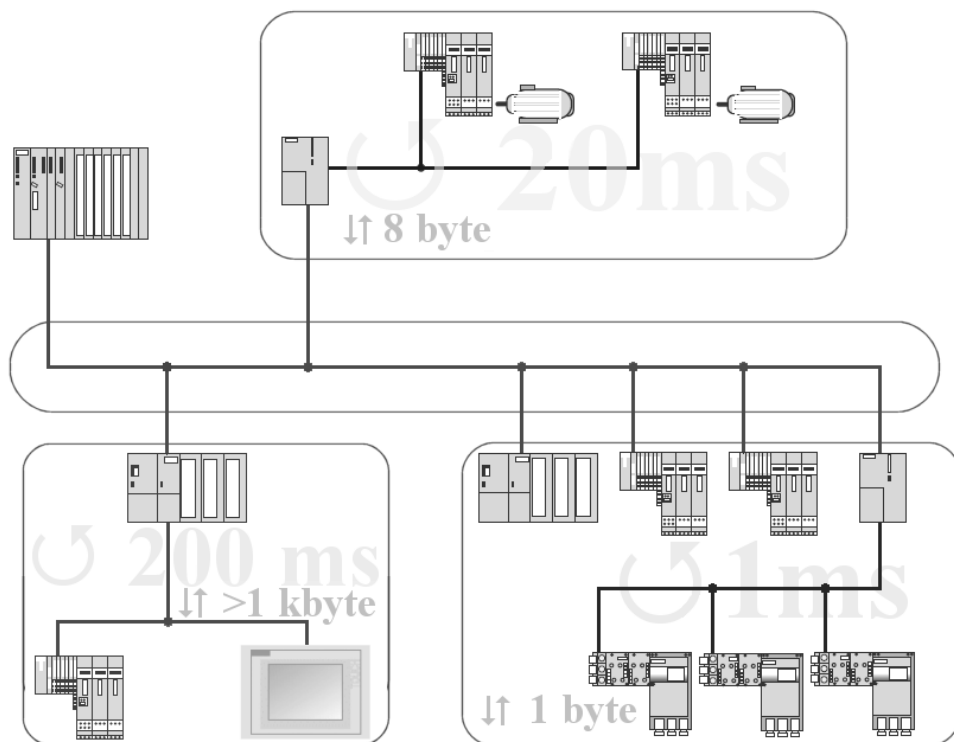
Address: Meza str.1, LV-1048, Riga, Latvia

E-mail: aozols@egle.cs.rtu.lv

Atslēgvārdi: industriālie tīkli, laikā kritiskie uzdevumi, Industrial Ethernet

1. Ievads

Nepārtraukti augošais komunikāciju nozīmīgums automatizētā ražošanā, prasa no industriāliem tīkliem tehnisko parametru attīstību, kā arī integrāciju ar pārējiem ražošanas etapiem.



1.1. att. ražošanas līnijas vadības un izpildes iekārtu shēma

Attēlā 1.1 ir redzams ražošanas līnijas shēmas piemērs. Tajā eksistē vairāki reģioni ar saviem uzdevumiem un prasībām pret tīklu, piemēram: ašu pozicionēšanas iekārtas ar mazu datu apmaiņas apjomu un ļoti mazo cikla laiku – zem 1 ms; vizualizēšanas iekārtas un dažādas I/O stacijas – liels datu apmaiņas apjoms, bet mazs reakcijas laiks - 200 ms, kas ir pilnīgi pietiekami, lai nejustu aizkavi starp reālo situāciju un vizualizēšanas iekārtā redzamo. Kā darba rezultāts būs piedāvāts risinājums kuru tīkla veidu pielietot shēmā redzamā situācijā.

2. Teorētiskas informācijas pētīšana

Industriālo tīklu pētīšanai laikā kritisko uzdevumu klasei tika izvēlēti sekojošie tīklu veidi (informācija tika ņemta no Siemens publikācijās [1]):

- Profibus DP – ir piemērots laikā kritiskiem uzdevumiem, jo ir izveidots uz marķiergredzena principa un spēj determinēti sadalīt pieeju tīklam;
- Profinet IO – tika speciāli radīts laikā kritiskiem uzdevumiem, palīdzoties īpašam laika daļes kopnes piekļuves principam spēj izveidot pilnīgi determinētu pieeju tīklam ar īpaši mazu cikla laiku;
- Industrial Ethernet – kaut arī nav speciāli paredzēts cikliskiem un laikā kritiskiem uzdevumiem, tomēr zinot kā uz tā bāzes tika izveidots Profinet IO tīkls, būtu interesanti izpētīt to uzvedību un iespēju robežās.

Tīklu salīdzināšanai un novērtēšanai ir nepieciešami kvantitatīvie kritēriji. Tikai izvēlēti sekojošie kritēriji:

- Reakcijas laiks - laiks, kas ir nepieciešams, lai attālinātais partneris reaģētu uz lokālas stacijas ārējo iedarbi.

- Precizitāte (drošums) - atkarība procentos starp kļūdu skaitu pret kopējo pārraidīto datplūsmu.
- Tīkla caurlaidspēja - informācijas vienību pārraides ātrums sekundē.
- Cena - tīkla organizācijas pasīvo un aktīvo iekārtu kopēja cena.

Lai konkretizētu un ierobežotu apskatāmo uzdevumu klasi tika izpētīta situācija Baltijas valsts ražošanas automatizācijā. Tika iegūta informācija par Latvijas, Lietuvas un Igaunijas dažādu dzērienu ražošanas līniju cikla laikiem. Rezultātā iznāk, ka visgarākais ražošanas cikls, iekārtās kur ir izmantots industriālais tīkls, ir vienāds ar 240 ms (AB „Kalnapilio-Tauro grupē” - 15 000 pud./st.), visīsākais – 66 ms (A/S „Aldaris” – 55 000 pud./st.). Izejot no iegūtas informācijas, tiks apskatīta industriālo tīklu spēja strādāt šādos apstākļos.

Apskatot teorētisko informāciju par Industrial Ethernet tīklu var uzzināt, ka tas būtībā ir visiem zināms parasts Ethernet tīkls, atbilstošs standartam IEEE 802.3. Zinot to, rodas jautājums: vai tīkls kas tika izveidots un tiek pielietots galvenokārt „ofisa” vajadzībām būs piemērots arī industrijā? Tagad šis jautājums tiks apskatīts sīkāk, pieejot tam no atvērto sistēmu sadarbības bāzes etalonmodeļa (OSI) transporta līmeņa. Ir zināms, ka Ethernet standartā izmanto TCP un UDP protokolus, var secināt, ka datplūsmas pārraidīšanai šajos līmeņos, tiek izmantots liels apjoms dienesta virsdatu, kas var stipri ietekmēt uz tīkla caurlaidspēju, samazinot to efektivitāti it īpaši ja sūtāmo datu apjoms ir mazs. Saskaņā ar IEEE 802.3 standartu maksimālais efektīvo datu apjoms ir vienāds ar 1500 baitiem un dienesta virsdatu apjoms ir 26 baiti. [2] Saskaņā ar RFC 760, 793 un 768 (IP, TCP, UDP) standartiem minimālie dienesta virsdatu apjomi kadriem ir attiecīgi 20, 20 un 4 baiti. [3] Turot prātā kadru iekapsulēšanu un TCP kadru apstiprināšanas datu apjomu izrēķināsim teorētisko datu pārraides efektivitāti atkarība no sūtāmo datu apjoma, katra no variantiem. To var atrast sekojoši: sūtāmo efektīvo datu apjomu (TCP gadījuma maksimāli – 1468 baiti un UDP gadījumā maksimāli – 1480 baiti) jāizdala ar kopējo tīklā sūtīto datu apjomu (efektīvo datu apjomu + dienesta virsdati + apstiprinājums) un reizinot ar 100, sanāk efektivitāte procentos no maksimālas tīkla caurlaidspējas.

Lietderības koeficients TCP/IP tīklam:

$$LDK = \frac{n}{n + 66 + 66} \cdot 100, \quad (2.1.)$$

kur n ir sūtāmo efektīvo lietotāja baitu skaits.

Lietderības koeficients UDP/IP tīklam:

$$LDK = \frac{n}{n + 50} \cdot 100, \quad (2.2.)$$

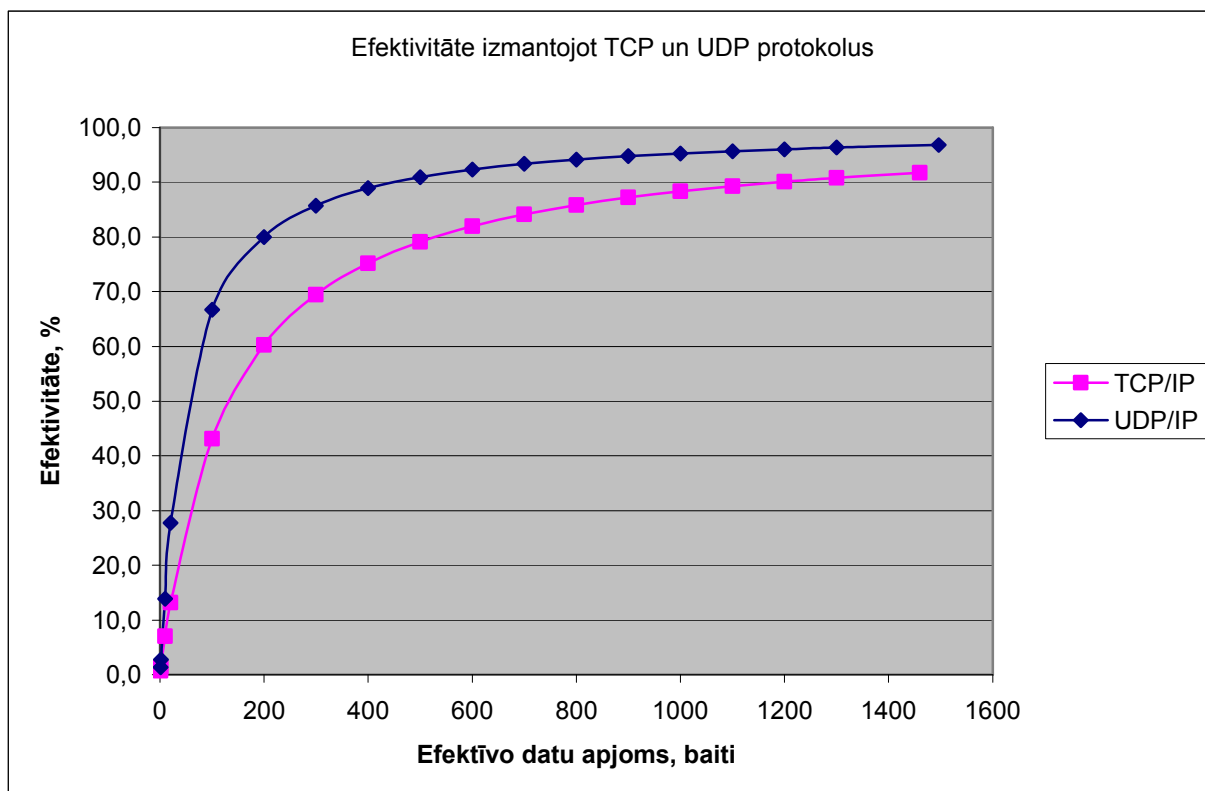
kur n ir sūtāmo efektīvo lietotāja baitu skaits.

Reālais ātrums nozīmē kādu datu pārraides ātrumu var sasniegt sūtot attiecīgo efektīvo datu apjomu. Tiek izskaitļots no efektivitātes, sadalot to ar 100 (jo tā bija izrēķināta procentos), reizinot ar izmantota tīkla caurlaides joslu baitos sekundē un dalot uz 1024, lai saņemtu atbildi Kbaiti/sekundē, nevis baiti/sekundē.

$$V = \frac{100000000}{8} \cdot \frac{LDK}{100} \cdot \frac{1}{1024}, \quad (2.3.)$$

kur LDK – tīkla lietderības koeficients.

Jāpiemin, ka ja Ethernet kadra datu apgabals ir mazāks par 46 baitiem, tad tas tiek papildināts ar nullēm, tādēļ pie nelieliem efektīvo datu apjomiem kopējais sūtāmais datu apjoms būs vienāds. Aprēķinos arī netika ņemts vērā laiks patērēts uz TCP protokolā savienojuma realizēšanu ar trīs rokasspiedienu metodi, jo to izmanto tikai vienu reizi komunikācijas sakumā.



2.1. att. Tīkla efektivitāte izmantojot TCP un UDP protokolus

Kā var redzēt attēlā 2.1 apmainoties ar nelielu datu apjomu tīkls strādā ļoti neefektīvi (efektivitāte ir zem 1%). Ja šādā tipa tīkls ir pielietots ofisa vai mājas vajadzībām, tad zaudējums protokola dienesta informācijas pārsūtīšanai nebūs īpaši pamanāms, jo mūsdienā tīkls ir galvenokārt izmantojams multimediju informācijas pārsūtīšanai (bilde, skaņa, video) un tāpēc lielākā daļa no datplūsmas būs ar maksimālā izmēra paketēm. Bet industriālo uzdevumu izpildīšanai ir nepieciešama apmaiņa ar nelielā apjoma datiem (zem 10 baitiem), tādēļ dienesta virsdatu apjoms sanāk daudz reizes lielāks par efektīviem datiem. Ko varētu šajā gadījumā darīt lai palielinātu tīkla efektivitāti? Kā viens no risinājumiem var būt UDP protokolā pielietošana, jo tam dienesta virsdatu apjoms ir mazāks nekā TCP protokolam (piecas reizes mazāks). Ja datu izmērs ir zem 10 baitiem, tad UDP protokolu efektivitāte ir divreiz lielākā. Jā vēl atcerēties, ka izmantojot TCP protokolu, pirms datu sūtīšanas notiek savienojuma realizācija („three-way handshake”), tad izmantot UDP protokolu ir vēl izdevīgāk, jo jebkura aizkave pirms pašu datu sūtīšana palielina reakcijas laiku, kas ir svarīgs kritērijs industriāliem tīkliem.

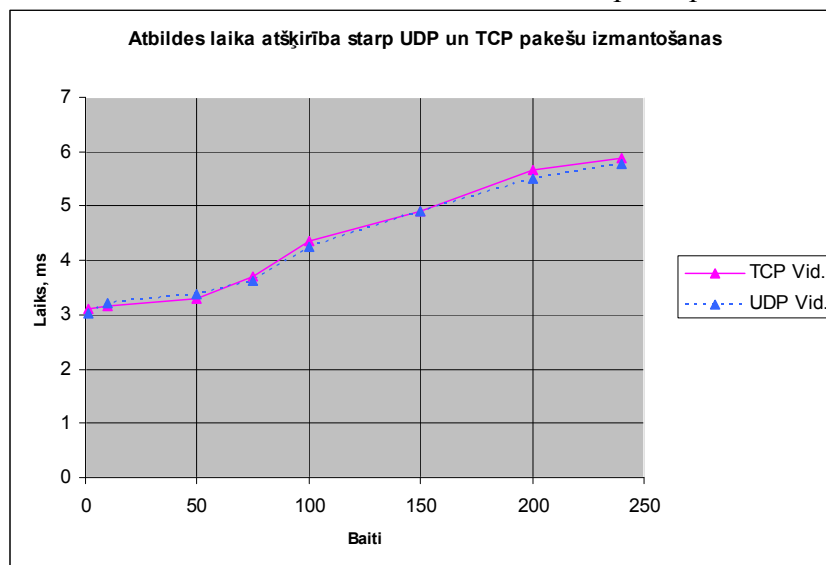
3. Tīklu salīdzināšana

Lai realizētu laikā kritisko uzdevumu prasības Profinet tīklā bija jāatteicas no OSI modeļa vidējiem slāņiem, tā lai uzreiz virs otrā slāņa ietu pielietojumu slānis. Tas ir viens no soliem, kas ir nepieciešams reāllaika un izohrona reāllaika režīmu funkcionēšanai.

Apskatīta pieeja OSI modeļa slāņu izmantošana dot iespēju samazināt laiku tērējamo uz dienesta virsdatu pārsūtīšanu un pakešu sagatavošanu. Bet tas vēl nedod iespēju pilnīgi determinēti sadalīt tīkla resursus starp visiem tīklā esošam iekārtam.

tīkli un tajā pielietotas iekārtas ir domātas izmantošanas industriālam vajadzībām, pie normāliem apstākļiem kļūdām rasties nevajadzētu, tādēļ turpmāk eksperimentos tīklu precizitāte un drošums tiks novērtēti 100% pēc noklusējuma, gadījumā ja tas mainīsies, tas tiks uzsvērts īpaši.

Veicot praktiskus eksperimentus tika izmantoti trīs komutatori saslēgti tādā veidā, lai visa tīkla slodze koncentrētos vienā komutatora portu pāri.

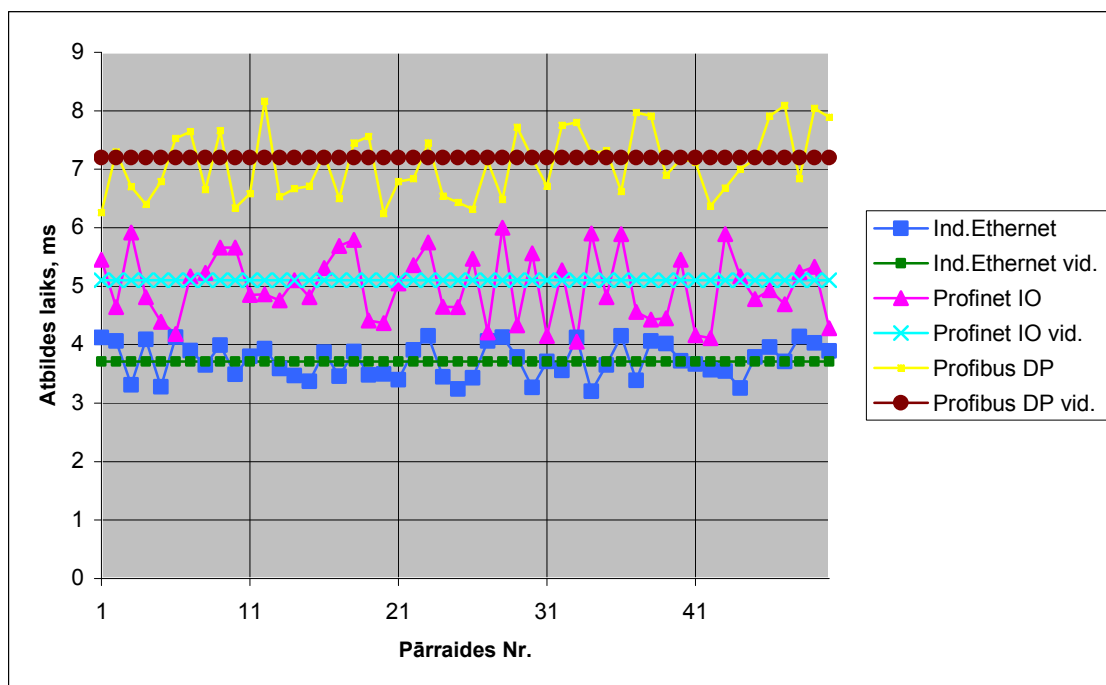


3.2. att. Atbildes laika pārbaude, izmantojot UDP un TCP protokolus

Iepriekš tika doti aprēķini, kuri secināja, ka industriālām vajadzībām ir izdevīgāk izmantot UDP protokolu, veicot praktiskus eksperimentus tika iegūti rezultāti, kuri ir redzami attēlā 3.2. Kā redzams praktiskie eksperimenti rāda, ka atbildes laiki atšķiras ļoti maz, bet kāpēc tad pēc teorētiskas daļas dotas informācijas UDP/IP tīklā reālais pārsūtīšanas ātrums pie mazu datu apjomu sūtīšanas būs gandrīz divreiz lielāks nekā izmantojot TCP/IP? To var paskaidrot ja izrēķināt cik daudz laika aizņems datu pārsūtīšana fiziskā vidē pie TCP/IP un UDP/IP protokoliem. Šo laiku var izrēķināt reizinot kopējo sūtāmo datu apjomu uz datu pārraides ātrumu (12.5 Mbaiti/s). Ko var secināt vadoties pēc izrēķinātiem laikiem? Eksperimentā minimālais iegūtais laiks ir ~3 ms, bet aizkave ko ienes signālu pārraide fiziskā tīklā ir desmitiem reižu mazāka. Tātad aizkavē galvenokārt rodas nevis pārraidot datus fiziskā vidē, bet pašā kontrolierī, sagatavojot un apstrādājot sūtāmo un saņemto informāciju. Tādēļ var secināt, ka Industrial Ethernet tīklā nav izdevīgi pielietot komunikāciju ar UDP protokolu, jo iegūtais reakcijas laika samazinātais lielums ir mazvērtīgs salīdzinājumā ar TCP protokola ieguvumiem savienojumā drošumā.

Veicot nākamo eksperimentu sēriju tika novērtēti Industrial Ethernet tīkla reakcijas laiki pie palielinātas slodzes, tie ir parādīti attēlā 3.2. Salīdzinot to ar eksperimentu pie minimālas slodzes var secināt, ka vidējais laiks ir palielinājies par ~0,5 ms. Neskatoties uz to, ka tika izmantoti tikai komutatori, reakcijas laiks ir acīmredzami palielinājies. Tas apstiprina teorētiskā nodaļā doto informāciju par komutējama tīkla datplūsmas regulēšanas mehānismiem. Ja palielināta slodze būtu sadalīta pa atsevišķiem komutatora portiem, tad katram savienojumam būtu izdalīta caurlaides josla 100 Mbps katrā virzienā un reakcijas laiks nemainītos. Mūsu gadījuma komutatoram visa slodze tika pievadīta pie viena porta pārsniedzot 100 Mbps, bet tā kā komutatora viena porta caurlaides josla ir 100 Mbps, tādēļ komutators izmantoja buferī izveidoto datplūsmas rindu un iespējami arī datplūsmas

ierobežošanas metodes. Tās kopumā arī radīja eksperimenta novēroto palielināto reakcijas laiku, jo komutatoram visa datplūsma ir vienlīdzīga. Tas apstiprina Industrial Ethernet trūkumu, ka jebkura jaunievadīta datplūsma kopējā automatizācijas tīklā, var radīt aizkaves katram tīkla mezglam, pat ja šīs papildslodzes vēlama prioritāte ir daudz mazākā nekā automatizācijas iekārtu datplūsmai.



3.3. att. atbildes laiki Industrial Ethernet, Profinet IO un Profibus DP tīklos pie maksimālas slodzes

Praktiski pārbaudot Industrial Ethernet trūkumu ir interesanti uzzināt eksperimenta rezultātus Profinet IO tīklā, kur tiek pielietotas datplūsmas prioritātes izmantojot IEEE 802.1q standarta definētos MAC katra prioritātes laukus.

Attēlā 3.3 ir redzami Profinet IO tīklā reakcijas laiki pie palielinātas slodzes, salīdzinot to ar eksperimentu bez papildslodzes var secināt, ka izmaiņu vidējā reakcijas laikā praktiski nav. Šī eksperimenta rezultāti pilnīgi apstiprina teorijā definēto prioritāšu kontroles principu. Profinet IO tīklā reālā laika datplūsmai ar speciālo MAC katra lauka palīdzību ir uzstādīta prioritāte lielākā nekā jebkurai citai ne reāllaika datplūsmai, tādēļ ja kopējais datplūsmas apjoms cenšas pārsniegt maksimālo komutatora caurlaides spēju, tad pirmkārt no bufera rindas tiks apkalpoti kadri ar lielāko prioritāti. Nelielas aizkaves var rasties gadījumā, ja ne reāllaika kadrs, sava izmēra dēļ, nepaspēja pārsūtīties atvelētā laikā. Papildus ir jāpiemin, ka Profinet IO izohronā režīmā šāda tipa problēmu nepastāv, jo ar aparatūras palīdzību ir realizēta citāda pieeja tīklam.

Projektā ar Profibus DP pārbaudi darbā ar palielinātu slodzi, arī ir redzama (att. 3.3) reakcijas laika palielinājums, vidēji par 0.7 ms. Regulēt Profibus tīklā ienesto datplūsmas intensitāti ir grūti, jo atšķirībā no Ethernet bāzētam tehnoloģijām, ģenerēt datplūsma Profibus tīklā bija iespējams tikai ar papildu kontrolieru iekļaušanu. Un tā kā to skaits nav liels, nebija iespējas pārbaudīt tīklu pie tā maksimālas slodzes, bet atceroties ka tīkla protokols ir marķiera gredzens var sagaidīt lineāro reakcijas laika atkarību no tīklā esošu staciju skaita.

Eksperimentu sērija reakcijas laika noteikšanai deva sekojošus rezultātus:

- apskatītie tīkli var būt izmantoti uzdevumos kur ir svarīga ātrā vadības iekārtas reaģēšana uz vadāma objekta parametru izmaiņām,
- Industrial Ethernet tīklu nav ieteicams pielietot uzdevumos ar ciklisko parametru novērošanu, to pielietošana būtu racionālā uzdevumos, kur kopā ar lielo datu apjomu sūtīšanu ir vajadzīga iespēja ātri reaģēt uz parametru izmaiņām,
- Profibus DP tīkls rada labus rezultātus un to var droši pielietot pat kustības kontroles uzdevumos,
- Profinet IO tīklam rezultāti ir labākie starp apskatītiem tīklu,
- Profibus DP tīkla pieejama aparatūra un konfigurācija deva iespēju pārbaudīt tas maksimālas spējas, bet Profinet IO tīkla aparatūras trūkuma dēļ, eksperimentāli tika pārbaudīts tikai parastais reālā laikā režīms, kurš nedod iespējas īstenot Profinet IO tīkla labāko efektivitāti.

Pirms dot galīgo tīklu novērtējumu un rekomendācijas ieviešana ražošanās sfērā ir jāpiemin iekārtu iespēju sinhroni saņemt un apstrādāt datus. Nepieminot eksperimentu gaitu un kvantitatīvus vērtējumus definēsim iegūtus rezultātus. Industrial Ethernet tīklā nesinhronitātes laiks ir tuvs atbildes laikam, jo lai iegūt iespēju komunicēt starp vairāku iekārtu pārim, katrām pārim ir jāprojektē savs savienojums un sūtītāja iekārtas programmā tiek secīgi izsauktas funkcijas kuri aktivizē katrs sava savienojuma datu pārraidi. Profinet IO tīkls pat strādājot ne izohronā režīmā, spēj nodrošināt pietiekami zemu sinhronitātes atšķirību.

Secinājums – iekārtu sinhronas darbības iespējas ir ļoti svarīgas laikā kritiskos uzdevumos, piemēram kustības kontroles uzdevumos. Visi trīs tīkli apskatītos režīmos nespēj pilnībā izpildīt prasību pret sinhronitāti, jo nesinhronitātes laiks ir salīdzināms ar komunikācijas cikla laiku. Katrā no apskatītiem tīkla veidiem ir savi skaidrojumi šai situācijai:

- Industrial Ethernet tīklā izmantota aparatūra neatbalsta sinhronizāciju starp iekārtām, kā arī pašā komunikācijas realizācija Siemens iekārtās nav domāta sinhronai darbībai;
- Profibus DP tīklā ir iespēja strādāt režīmā ar vienādiem cikla laikiem visos Profibus DP tīkla iekārtās, bet šo režīmu izmantošanai ir nepieciešamas speciālas iekārtas;
- Profinet IO tīkls parastā reāllaikā režīmā neparedz iekārtu sinhronizāciju, šim nolūkam ir jāizmanto speciālas iekārtas kas spēj strādāt izohronā reāllaikā režīmā.

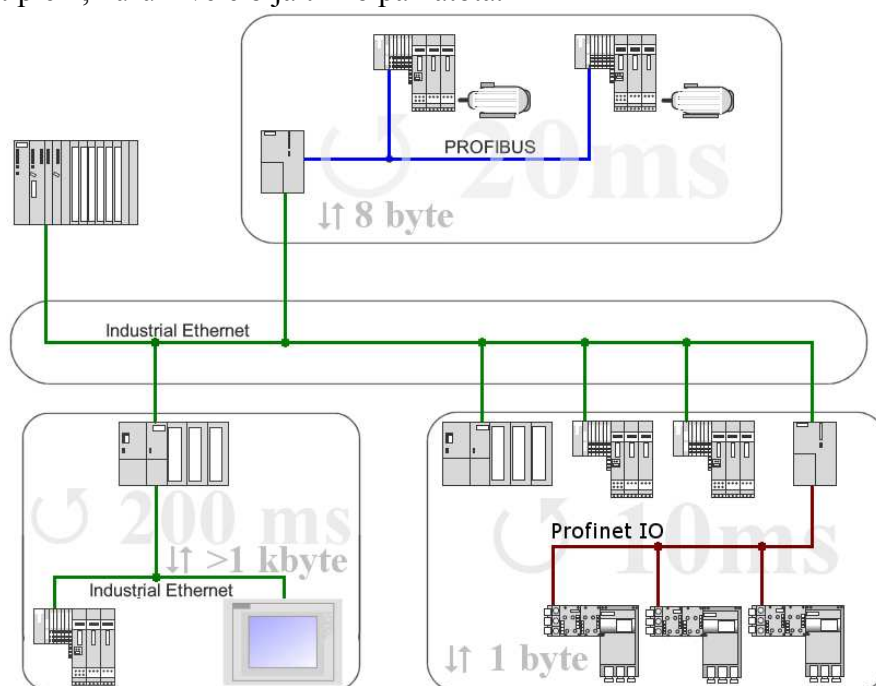
4. Secinājumi

Priekšlikumi ražošanai:

- Ja galvenais kritērijs ir mazs cikla un reakcijas laiks (<1 ms) un cena nav risinošais faktors, tad ir jāizmanto Profinet IO tīkls izohronā režīmā (kustības kontrole).
- Ja ir nepieciešams īstenot ciklisko komunikāciju (>5ms) un cenai ir lielā nozīme var izmantot Profibus DP tīklu, bet ne kustības kontroles uzdevumiem.
- Automatizācijās līnijās kur produktu apjoms stundā ir zem 35 000 vienībām stundā, ir iespējams izmantot Industrial Ethernet tīklu, jo tajā ir iespējams strādāt ar cikla laikiem virs 100 ms. Kā arī tas būtu pieņemams risinājums komunikācijai starp automatizācijas līnijas

iekārtam, kur ir svarīgs reakcijas laiks, bet nenotiek cikliskā komunikācija.

Attēlā 4.1. ir redzama iepriekš dota ražošanas līnijas shēma ar piedāvātiem tīklu tipiem, kuru izvēlē bija tikko pamatota.



4.1. att. ražošanas līnijas vadības un izpildes iekārtu shēma ar definētiem tīklu tipiem

5. Literatūra

1. Siemens, Selection Criteria for Networks and Service, 2004., 56 lpp.
2. IEEE 802.3 standarta apraksts / Internet. - http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.3-2005_section1.pdf, 628 lpp.
3. IP, TCP, UDP standartu apraksts / Internet. - <http://tools.ietf.org/html/>

Bļizņuks D., Ozols A. Industriālie tīkli laikā kritiskos uzdevumos.

Izstrādātais darbs dot informāciju par industriāliem tīkliem un to darbības režīmu izvēli laikā kritiskiem uzdevumiem. Apskatītie teorētiskie un praktiskie dati rāda nepieciešamas darbības industriālo tīklu efektivitātes palielināšanai definēto uzdevumu lokā, nepārkāpjot Industrial Ethernet tīkla standartus. Kopā ar to tiek parādīti šīs tehnoloģijas trūkumi un pielietojšanas robežas, pārkāpjot kurus ir jāizmanto specializētākus tīklus.

Bliznyk D., Ozols A. Industrial networks in time critical applications.

This paper considers industrial networks and solves choosing task for networks working mode in time critical applications. Examined theoretical and practical data reveals essential actions that are need to increase network efficiency in considered application range, not overstepping Industrial Ethernet standards. In addition, weak points and application ranges of this standard are considered.

Близнюк Д., Озолс А. Индустриальные сети в приложениях критичных по времени.

Данная статья дает информацию об индустриальных сетях и выборе для них соответствующих режимов работы, для приложений критичных по времени. Рассматриваемые теоретические и практические данные показывают необходимые действия для повышения эффективности сети в выбранном круге задач, не выходя за рамки стандарта Industrial Ethernet. В месте с тем показаны недостатки данной технологии, а также границы применения, претупая которые необходимо использование более специализированных технологий.