

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті” коммерциялық
емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Тлегенов Асхат Калдыбаевич

Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді
пайдалануды зерттеу

МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

7M06202 – «Телекоммуникация» мамандығы

Алматы 2026

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ
МИНИСТРЛІГІ

“Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті”
коммерциялық емес акционерлік қоғамы

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

ӘОЖ 621.396.946 (043)

Қолжазба құқығында

Тлегенов Асхат Калдыбаевич

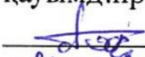
Магистр академиялық дәрежесін алу үшін
МАГИСТРЛІК ДИССЕРТАЦИЯ

Диссертация атауы

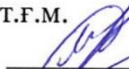
Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық
байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу

Дайындау бағыты

7М06202 – «Телекоммуникация»

Ғылыми жетекшісі,
қауымд.профессор, PhD,
 Хабай А.
«20» 01 2026 ж.

Пікір беруші,
Energo university,
«Телекоммуникациялық
инженерия» кафедрасының
қауым. профессоры, PhD, т.ғ.к
 Ермекбаев М.М.
«20» 01 2026 ж.

Норма бақылаушы,
ЭТЖТ каф. аға оқытушысы,
т.ғ.м.
 Марксұлы С.
«20» 01 2026 ж

Алматы 2026



КОРҒАУ А ЖІБЕРІЛДІ

ЭТЖТ кафедрасы меңгерушісі

т.ғ.к. профессор

 Гантай Е.

«20» 01 2026 ж

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

7M06202 – «Телекоммуникация»



БЕКІТЕМІН
ЭТЖТ кафедрасы меңгерушісі
Т.К. Сауымд. профессор

Таштай Е.

2024 ж.

**Магистрлік диссертацияны орындауға арналған
ТАПСЫРМА**

Магистрант Тлегенов Асхат Калдыбаевич

Диссертация тақырыбы: «

Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу»

Университет Ректорының 2024 жылғы «13» 11 №5210/6 бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған диссертация тапсыру мерзімі «30» 12 2025 ж.

Магистрлік диссертацияның бастапқы деректері: 2,4 ГГц лицензиясыз жиілік диапазонында жұмыс істейтін байланыс стандарттарына негізделген өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілерде қолданылатын негізгі протоколдардың жүктеме деңгейіне тәуелді түрде деректерді сенімді жеткізу, кідірісті шектеу және энергия тиімділігін қамтамасыз ету міндеттеріне шолу жасау.

Магистрлік диссертацияда әзірлеуге жататын мәселелер тізімі:

а) Сымсыз желілік басқару жүйелері үшін модельдік-болжамды басқару әдісін қарастру.

б) Сигналдың таралу арнасы, арналық бұзылыстар және қабылдағыш модельдеріне талдау

в) Сымсыз желілік басқару жүйесі талаптарына сай параметр аймағында жұмыс істейтін моделдік-болжамды басқару (МББ) алгоритмін құруды

г) MATLAB ортасында сымсызбасқару сенсорларудың моделделін құру нәтижелерге талдау жасау.

Ұсынылатын негізгі әдебиеттер: 1) Kim, B.-S., Kim, S., Kim, K.H., Sung, T.-E., Shah, B., & Kim, K.-I. Adaptive Real-Time Routing Protocol for (m,k)-Firm in Industrial Wireless Multimedia Sensor Networks. *Sensors*, 2020, 20(6), 1633. <https://doi.org/10.3390/s20061633>. 2) Peng, M., Li, B., Yan, Z., & Yang, M. A Spatial Group-Based Multi-User Full-Duplex OFDMA MAC Protocol for the Next-Generation WLAN. *Sensors*, 2020, 20(14), 3826. <https://doi.org/10.3390/s20143826>. 3) Lee, W., Kim, T., & Kim, T. Distributed Node Scheduling with Adjustable Weight Factor for Ad-hoc Networks. *Sensors*, 2020, 20(18), 5093. <https://doi.org/10.3390/s20185093>. 4) Elsharief, M., El-Gawad, M.A.A., Ko, H., & Pack, S. EERS: Energy-Efficient Reference Node Selection Algorithm for Synchronization in Industrial Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 2020, 20(15), 4095. <https://doi.org/10.3390/s20154095>

Магистрлік диссертацияны дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлім атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекші мен кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер бойынша әдебиеттік шолу жасау:	01.03.2025 – 01.06.2025	<i>Орындалады</i>
2.4 ГГц ISM негізгі протоколдарды талдау және бағалау критерийлерін анықтау, жүктеме деңгейіне тәуелді PDR/кідіріс/энергия көрсеткіштерін тандау	01.10.2025 – 03.09.2025	<i>Орындалады</i>
Сымсыз желілік басқару жүйесі талаптарына сай параметр аймағында жұмыс істейтін моделдік-болжамды басқару (МББ) алгоритмін құруды	01.11.2025 – 15.10.2025	<i>Орындалады</i>
MATLAB ортасында сымсызбасқару сенсорларудың моделделін құру нәтижелерге талдау жасау	25.12.2024 – 01.12.2025	<i>Орындалады</i>

Аяқталған магистрлік диссертация үшін, оған қатысты бөлімдердегі диссертация кеңесшілері мен норма бақылаушының қойған

қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Магистрлік диссертация тақырыбын талдау	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. Қауымдастырылған профессоры, PhD А.Хабай	<i>01.09.2025</i>	<i>А.Хабай</i>
Теориялық ақпарат	Ғылыми жетекші ЭТЖҒТ каф. Қауымдастырылған профессоры, PhD А.Хабай	<i>20.12.2025</i>	<i>А.Хабай</i>
Норма бақылау	ЭТЖҒТ каф. аға оқытушысы, т.ғ.м. Маркұлы С.	<i>20.01.2026</i>	<i>С.Маркұлы</i>

Ғылыми жетекшісі

Білім алушы тапсырманы орындауға алды

Күні

А.Хабай
А.К.Тлегенов

Хабай А.

Тлегенов А.К

«____» _____ 2024 ж.

АНДАТПА

Бұл диссертациялық жұмыста өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелерінде сымсыз сенсорлық протоколдарды тиімді қолдану, деректерді сенімді жеткізу, кідірісті шектеу және энергия тиімділігін арттыру мәселелері қарастырылды.

2,4 ГГц диапазонында физикалық арна әсерлері ескеріліп, TDMA және CSMA/CA жағдайында пакеттің сәтті жеткізілу ықтималдығы Монте–Карло әдісі және Бернулли мен Марковтық FSMC модельдері арқылы бағаланды.

Байланыс сенімділігін арттыру үшін модельдік-болжамды басқару мен желілік параметрлерді бірлесіп оңтайландыруға негізделген интеграцияланған мақсаттық функция ұсынылып, MATLAB модельдеуімен дәлелденді.

АННОТАЦИЯ

В данной диссертационной работе рассматриваются вопросы эффективного применения беспроводных сенсорных протоколов в системах промышленной автоматизации, обеспечения надежной передачи данных, ограничения задержек и повышения энергоэффективности.

С учетом воздействий физического канала в диапазоне 2,4 ГГц вероятность успешной доставки пакетов в условиях TDMA и CSMA/CA оценивалась с использованием метода Монте–Карло, а также моделей Бернулли и марковской FSMC.

Для повышения надежности связи предложена интегрированная целевая функция, основанная на совместной оптимизации модельно-прогнозного управления и сетевых параметров, эффективность которой подтверждена моделированием в среде MATLAB.

ABSTRACT

This master's thesis investigates the effective application of wireless sensor protocols in industrial automation systems, focusing on reliable data transmission, delay constraints, and improved energy efficiency.

Considering physical channel effects in the 2.4 GHz band, the probability of successful packet delivery under TDMA and CSMA/CA is evaluated using the Monte Carlo method as well as Bernoulli and Markov FSMC models.

To enhance communication reliability, an integrated objective function based on the joint optimization of model predictive control and network parameters is proposed and validated through MATLAB-based simulations.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарына шолу	11
1.1 Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер протоколдары, стандарттары және нақты уақыттағы басқару	11
1.2 Сымсыз желілік басқару жүйесіндегі негізгі мәселелерді талдау	13
1.3 Сымсыз байланыс желісі	15
1.4 Сымсыз желі стандарттары	17
1.5 Сымсыз басқару жүйесін талдау және жобалау	21
1.6 Сымсызы ортаны басқару параметрлері	22
2 Сымсыз желілік басқарудағы протоколдардың жоспарлау және тұрақтылықты қамтамасыз ету әдістері	25
2.1 Сымсыз желілік басқару жүйелері үшін модельдік-болжамды басқару	25
2.2 Болжамды басқару алгоритмінің математикалық тұжырымдалуы	26
2.3 Сымсыз байланыс жүйесінің тұрақтылығы мен жинақталу шарттары	30
2.4 Жоспарланған басқарудың сипаттамалары	31
2.5 Модельдік болжамды басқару және бірлескен жобалау тәсілі негізіндегі біріктірілген мақсаттық функцияны әзірлеу	32
2.6 Параметрлерді баптау және сезімталдықты талдау	33
3 Сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын технологиялық тұрғыдан талдау жасау	35
3.1 Автоматты басқару жүйесіндегі сымсыз байланыс архитектурасы	35
3.2 Сымсыз өлшеу техникасындағы қиындықтары	39
3.3 Сымсыз сенсорлық желі стандарттарына талдау жасау	40
3.4 Сымсыз байланыс протоколдына тәжірибелік зерттеу	47
4 IEEE 802.15 стандартындағы протоколдарға сәйкес MATLAB ортасында сымсызбасқару сенсорларын моделдеу	53
4.1 Сымсыз байланыс сенсорларын зерттеу	53
4.2 Сигналдың таралу арнасы, арналық бұзылыстар және қабылдағыш модельдеріне талдау	55
4.3 Сигналдың арналық бұзылыстар	57
4.4 Еркін кеңістіктегі жол жоғалтуды сипаттау	57
4.5 Көлеңкелік әлсіреуді модельдеу	57
4.6 Қабылдағыш (Receiver) моделі	58
4.7 Арна моделінен SINR және пакеттік қате ықтималдығын талдау	60
4.8 Multi-hop Co-design маршрутизациясы және end-to-end пакет жоғалту	64
4.9 СЖБЖ талаптарына сай параметр аймағындағы МББ арқылы табу	66
Қорытынды	70
Пайдаланған әдебиеттер тізімі	72
Қосымша А	76

КІРІСПЕ

Қазіргі заманғы өнеркәсіптік автоматтандыру «Индустрия 4.0», заттар интернеті (IoT), киберфизикалық жүйелер тұжырымдамаларына негізделіп, өндірістік процестерді қашықтан және нақты уақыт режимінде басқаруды талап етеді. Мұндай ортада сымды байланыс инфрақұрылымын құру әрқашан тиімді бола бермейді: кабель тарту құны жоғары, күрделі технологиялық алаңдарда қолжетімсіз аймақтар көп, ал мобильді объектілер мен жылжымалы механизмдерді сымды түрде қосу мүмкіндігі шектеулі. Осыған байланысты өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер мен сымсыз желілік басқару жүйелері (СЖБЖ) кеңінен зерттелуде және өндірістік практикаға енгізілуде. Дегенмен, өндірістік ортада радиожиілік кедергілер, көпсәулелі шағылысу, көлеңкелік әлсіреу, пакеттік жоғалу және желілік кідірістер басқару жүйесінің орнықтылығы мен дәлдігіне тікелей әсер етеді. Сондықтан байланыс протоколдарын тек жоғары өткізу қабілеті немесе төмен қуат критерийлерімен таңдаумен шектелу жеткіліксіз; басқару алгоритмдері мен желілік деңгейдегі протоколдарды бірлесіп қарастыру қажеттілігі туындайды[3-4].

Осы зерттеудің мақсаты – өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді пайдалану үшін IEEE 802.15.4 стандартына негізделген арна моделін, ортаны басқару және маршрутизация деңгейлерін модельдік-болжамды басқарумен (МББ) бірлесіп жобалау арқылы СЖБЖ-ның сенімділігі, кідірісі және энергия тиімділігі арасындағы оптималды компромисті қамтамасыз ететін параметрлер аймағын анықтау.

Қойылған мақсатқа жету үшін зерттеу міндеттері ретінде өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілерге арналған негізгі протоколдар мен стандарттарға (IEEE 802.15.4/802.11, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, LoRaWAN, NB-IoT, 6LoWPAN, RPL, 6TiSCH) әдебиеттік шолу жасап, олардың архитектуралық ерекшеліктерін, артықшылықтары мен шектеулерін жүйелеу; IEEE 802.15.4 (2.4 ГГц DSSS PHY) үшін жол жоғалту, лог-нормаль көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу және қабылдағыш шу әсерін ескеретін арна моделін құрып, Монте–Карло әдісі арқылы SINR және L биттік пакеттер үшін қателіктің ықтималдығын анықтау. TDMA және CSMA/CA MAC-сұлбалары үшін single-hop режимінде пакетті сәтті жеткізу ықтималдығын $p_{s,i}$ есептеу және пакеттік жоғалтуды Бернулли мен Марковтық модельдері арқылы сипаттап, олардың математикалық күтімі, дисперсиясы және қатарынан жоғалатын пакеттер саны $E[N_{loss}]$ бойынша салыстыру. multi-hop желіде single-hop жоғалтуларға сүйене отырып end-to-end пакеттік жоғалу ықтималдығын $P_{loss,e2e}$ бағалау, hop саны аз, бірақ SINR төмен маршрут пен hop саны көп, SINR жоғары маршрутты салыстырып, co-design маршрутизация арқылы трафикті $(\alpha, 1-\alpha)$ үлестіру негізінде СЖБЖ сенімділік талабын $(P_{loss,e2e} \leq 1\% - 5\%)$ ($P_{tx,i}$, T_s , N_{retx} , θ_{MAC} , θ_{route}) бірлесіп оңтайландыруға арналған біріктірілген мақсаттық функцияны әзірлеп, күй векторына $x(k)$, $q_i(k)$, $\chi_s(k)$ шамаларын енгізу арқылы СЖБЖ динамикасының дискреттік моделін құру; соңында MATLAB ортасында ұсынылған МББ-co-design

схемасын имитациялық модельдеу арқылы пакеттік жоғалу, кідіріс және энергия тұтыну көрсеткіштерін бағалап, СЖБЖ параметрлерінің талапқа сай аймағын анықтау қарастырылады.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы IEEE 802.15.4 (2.4 ГГц DSSS PHY) үшін өндірістік орта факторларын (көпсәулелі өшу, көлеңкелік әлсіреу, интерференция және шу) ескеретін арна моделін құрып, SINR–PER байланысын Монте–Карло әдісімен бағалау тәсілін қолданумен; TDMA және CSMA/CA режимдеріндегі single-hop жеткізуді бірізді салыстыру үшін пакеттік жоғалтуларды Бернулли және FSMC (Марковтық) модельдері арқылы сипаттап, жоғалтулардың уақыттық корреляциясының (қатарынан жоғалтулардың) СЖБЖ басқару сапасына ықпалын көрсетуімен; multi-hop ортада hop саны мен SINR арасындағы компромисті ескеретін co-design маршрутизация (трафикті α бойынша үлестіру) идеясын end-to-end сенімділік талаптарын орындау тұрғысынан негіздеумен; сондай-ақ желілік параметрлерді (қуат, дискреттеу периоды, ретрансляция саны, MAC және маршрутизация параметрлері) басқару алгоритмімен бір мезетте таңдауға мүмкіндік беретін МББ–co-design біріктірілген оңтайландыру қойылымын ұсынумен айқындалады.

Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңызы өнеркәсіптік СЖБЖ-ны жобалау кезінде сенімділік–кідіріс–энергия көрсеткіштері бойынша протоколдар мен параметрлерді дәлелді таңдауға арналған әдістемелік негіз ұсынуымен; IEEE 802.15.4 негізіндегі арна–желі модельдері мен MATLAB-тағы имитациялық модельді инженерлік есептеулерде, оқу-зертханалық жұмыстарда және тәжірибелік жобалау кезеңінде параметрлерді алдын ала бағалау үшін қолдану мүмкіндігімен; сондай-ақ ұсынылған МББ–co-design тәсілі жүктеме өзгерісі мен арна сапасы нашарлаған жағдайларда сымсыз басқару жүйесінің орнықтылығын сақтап, байланыс ресурстарын тиімді пайдалануға бағытталған практикалық шешім ретінде қолданылуымен негізделеді.

1 Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарына шолу

1.1 Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер протоколдары, стандарттары және нақты уақыттағы басқару

Технологиялық жетістіктер мен стандарттау жұмыстарының арқасында сымсыз сенсорлық желілердің қолданылу аясы кеңейіп келеді. Қазіргі таңда бұл желілер тұрмыстық техникаларда, ауыл шаруашылығында, көлік саласында және өндірісте кеңінен қолданыла бастады[5]. Соңғы уақытта трансиверлер мен байланыс протоколдары сияқты технологиялардың жетілдірілуіне байланысты өнеркәсіптік салада сымсыз сенсорлық желілердің қолданылуы артып отыр.

Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілерге құрылғылар арасындағы ақпарат алмасуда жоғары сенімділік, беріктік және нақты уақыттағы байланыс талап етіледі. Осы талаптарға сай келетін күрделі протоколдарды әзірлеу бағытында көптеген зерттеушілер мен әзірлеушілер жұмыс істеп жатыр. Бұл арнайы шығарылым өнеркәсіптік салада сымсыз сенсорлық желілерді қолдануға, оларға арналған протоколдар мен қосымшаларға, сондай-ақ сенімділік пен нақты уақыт режимінде мәлімет жеткізу талаптарына негізделген соңғы зерттеулер мен әзірлемелерге арналған.

Нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін фирмалық модель үшін бейімделгіш бағыттау желілік деңгейге қатысты протоколын ұсынады [6]. Бұл модель нақты уақыт талаптарын анықтайды және нақты уақыт ағынындағы кез келген қатарынан келетін k хабарламаның кемінде $m-i$ өз мерзімінде жеткізілуі тиіс, бұл қызмет сапасының жеткілікті деңгейін қамтамасыз етеді. Мақалада бейімделгіш бағыт таңдау және трафикті үлестіру алгоритмі ұсынылған. OPNET жүйесінде жүргізілген бағалау нәтижесі бұл ұсынылған әдістеменің фондық трафикке қарамастан динамикалық ақауларды азайта отырып, энергия тұтынуды да төмендететінін көрсеткен.

Келесі екі әдебиетте медиа қатынау басқару деңгейіне қатысты. Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілердің жоғары тығыздықпен орналастырылған жағдайда туындайтын төмен қатынау тиімділігі мен кедергілердің таралуы мәселесін шешу мақсатында кеңістікке негізделген көппайдаланушылы протоколы ұсынылған. Теориялық талдау арқылы қатынау арнасындағы түйіндер санының орташа мәні, жүйенің өткізу қабілеті және аумақтық өткізу қабілеті есептелген. NS2 симуляторындағы модельдеу бұл теориялық талдауды қолдап, ұсынылған протоколдың тиімділігін көрсеткен.

МББ деңгейіндегі ad-hoc желілері үшін жаңа үлестірілген жоспарлау әдісін ұсынады [7]. Ұсынылған әдіс екі қайта үлестіру кезеңінен тұрады: түйін ішіндегі (intra-node) және түйіндер арасындағы. Түйін ішіндегі жоспарлау басымдыққа негізделген бірнеше кезек арқылы пакеттерді қайта бөледі, мұнда өзіндік әділдік индексі қолданылады, бұл өткізу қабілеті мен кідірісті

жақсартуды көмектеседі [8]. Түйіндер арасындағы жоспарлау көршілес түйіндер арасында ұяшықтарды қайта үлестіру арқылы әділдікті арттыруды көздейді. Java негізіндегі желілік симуляторда жүргізілген модельдеу бұл әдістің пакеттерді жеткізу өнімділігін алдын ала берілген салмақтық факторға байланысты реттей алатынын және өткізу қабілеті мен кідіріс жағынан дәстүрлі алгоритмдерден асып түсетінін көрсетті [9].

Уақытты синхрондау өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер саласындағы тағы бір маңызды зерттеу бағыты. Осыған арналған мақалада энергияны үнемдейтін эталондық түйінді таңдау алгоритмі ұсынылған. энергияны үнемдейтін эталондық түйінді таңдау алгоритмі – қосылған эталондық түйіндер санын азайтып, өтулер санын минималды деңгейде ұстап тұрады. 25 нақты аппараттық платформадан тұратын тәжірибелік желіде жүргізілген бағалау нәтижесі бойынша, энергияны үнемдейтін эталондық түйінді таңдау алгоритмі бұрыннан бар, сымсыз сенсорлық желілердегі уақытты синхрондау алгоритмдері/протоколдары және төмен қуатты кестелеу әдісі секілді әдістермен салыстырғанда аз хабарлама жіберуді (яғни аз энергия тұтынуды) талап етеді. Сонымен қатар, MATLAB көмегімен кең ауқымды желіге арналған модельдеу бұл әдістің уақытты синхрондаудың дәлдігін жоғалтпай, энергияны үнемдейтінін көрсетті [10]. Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілердің кеңінен танымал стандарттарына – IEEE 802.15.4 және ISA 100.11a қатысты шолуда IEEE 802.15.4/ZigBee стандартына негізделген, апатты жағдайларды және қауіпті оқиғаларды кең аумақта анықтауға бағытталған[8]. Бұл мақалада кластерлік ағаш құрылымындағы Өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілердің динамикалық қайта конфигурациялау механизмі ұсынылған. Ұсынылған алгоритм әр сенсор түйіні тудырған жүктемеге қарай, желі жүктемесінің жинақталған мәніне сүйене отырып, IEEE 802.15.4 негізіндегі ірі масштабты кластерлік таралу желісінің артық жүктелген тармақтарына байланыс ресурстарын автоматты түрде қайта үлестіреді. Симуляторында жүргізілген бағалау нәтижесінде, бұл әдістеменің кластерлік ағаш желісін динамикалық қайта конфигурациялау кезінде қажетті қызмет көрсету сапасын қамтамасыз ететіні дәлелденген.

ISA100.11a стандартына негізделген сымсыз желілік басқару жүйесін сипаттайды. Бұл жүйе сенсорлық құрылғылардан (түйіндер), желі менеджерінен, контроллерден және сымды жетектен (актуатор) тұрады. Жүйе біріктірілген резервуар жүйесіндегі сұйық деңгейін басқарады. Контроллер сенсор сілтемесінің үзілуі басқару циклінің жұмысына әсер ететінін бағалау үшін байланыс тұрақтылығын есептеп, ағымдағы сілтеме тұрақсыз болған жағдайда балама жолды тандайды [10].

Алғашқы тәжірибелік сынақтар көрсеткендей, сілтеме тұрақтылығы факторы басқару жүйесіндегі қателіктің өзгерісін алдын ала болжауға мүмкіндік береді. Байланыс тұрақтылығына негізделген басқару жүйесі бойынша жүргізілген сынақтар бұл метриканың ықтимал тұрақсыздықтарды алдын ала анықтап, басқару циклінің істен шығуын болдырмайтынын

көрсетті. Тіпті желідегі үзілімдер жағдайында да жүйедегі қате рұқсат етілген шектен аспайды [11].

Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдары өндірістік үдерістерді қашықтан бақылауға және басқаруға мүмкіндік береді, себебі бұл құрылғылар арасында физикалық сымдарсыз байланыс орнатуға жол ашады. Мұндай протоколдардың артықшылықтарына оңай орнату, ауқымдылық (масштабталу мүмкіндігі) және техникалық қызмет көрсету шығындарының төмендеуі жатады. Кеңінен қолданылатын протоколдарға Zigbee, WirelessHART, Wi-Fi және 5G сияқты ұялы байланыс технологиялары жатады олардың әрқайсысы қамту аймағы, деректер жылдамдығы және қуат тұтыну секілді факторларға байланысты әртүрлі қолдану қажеттіліктеріне сай келеді.

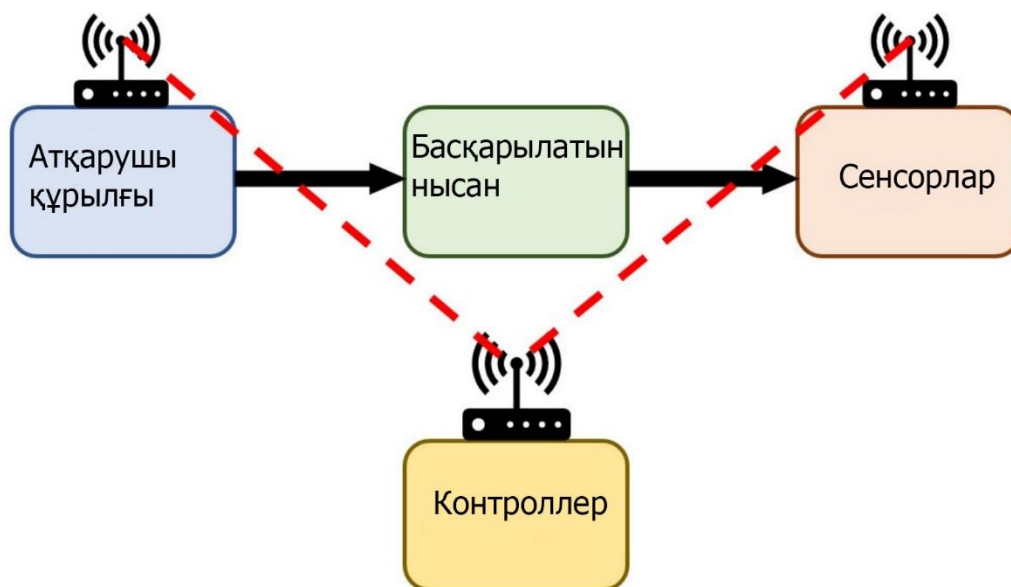
1.2 Сымсыз желілік басқару жүйесіндегі негізгі мәселелерді талдау

Сымсыз желілік басқару жүйесі (СЖБЖ) бұл жүйенің әртүрлі түйіндері арасындағы сигнал алмасу үшін сымсыз байланыс арналарын пайдаланатын желілік басқару жүйесі. Басқаша айтқанда, СЖБЖ жүйесінде контроллер сенсорлармен және атқарушы құрылғылармен сымсыз арналар арқылы байланысады. Бұл желіде контроллер сенсорлар арқылы алынған және басқарылатын объектіге орнатылған өлшеу сигналдарын сымсыз арна арқылы қабылдайды. Содан кейін, контроллер басқару сигналдарын жасап, оларды сымсыз арна арқылы атқарушы құрылғыларға жібереді, бұл басқарылатын жүйенің динамикасына әсер етеді [12]. Басқару жүйелері, ақпараттық жүйелер және физикалық құрылғылар арасындағы өзара әрекет соңғы жылдары айтарлықтай артты. Бұл есептеу, бақылау, датчиктер және сымсыз желі технологияларының үздіксіз дамуына байланысты болып отыр [13]. Мұндай интеграцияның нақты көріністері соңғы жылдары пайда болған Тактильді интернет, Заттар интернеті (IoT) және киберфизикалық жүйелер сияқты нақты уақыт режимінде физикалық жүйелерді басқаруды талап ететін салаларда айқын байқалады.

Сымсыз желілік басқару жүйелерін енгізу көлік, өндіріс және энергия өндіру сияқты бөлінген қосымшаларға деген сұраныстың артуына байланысты өте тиімді бола бастады. СЖБЖ жүйелерінің кейбір артықшылықтарына түйіндерді (құрылғыларды) орналастырудағы икемділік, сымды байланысқа қарағанда техникалық қызмет көрсетуге кететін күш-жігердің азаюы, сондай-ақ көптеген қолданбаларда мобильді түйіндерді пайдалану мүмкіндігі жатады [14]. Жалпы алғанда, СЖБЖ жүйелері икемділігімен, қауіпсіздік деңгейінің жоғары болуымен, орнату және техникалық қызмет көрсетудің қарапайымдылығымен ерекшеленеді.

1.1-суретте СЖБЖ жүйесінің типтік үлгісі көрсетілген. Ол физикалық объектіден, сенсорлардан, атқарушы құрылғылардан (актуаторлар), контроллерден және сымсыз байланыс арналары жүйесінен тұрады. Бұл

салада бұлтты есептеу технологиялары, жетілдірілген басқару әдістері, сымсыз желілер және кірістірілген есептеу жүйелері секілді заманауи технологиялардың қарқынды дамуы СЖБЖ жүйелерінің өркендеуіне себеп болып отыр. Сонымен қатар, мұндай жүйелердің дамуына өнеркәсіптік автоматтандыру, ғимараттарды басқару, авионика және автокөлік жүйелері сияқты салалардағы жаңа қолданбалардың пайда болуы да өз әсерін тигізді.



1.1-сурет – Сымсыз желіге негізделген басқару жүйесінің моделі

Қазіргі ғылыми зерттеулерде сымсыз желілік басқару жүйелері бойынша бірқатар тақырыптар теориялық және практикалық тұрғыда қарастырылған. Осы зерттелген бағыттардың кейбір мысалдарына мыналар жатады: сымсыз желі жағдайында сенсорлар мен атқарушы құрылғылар үшін қолданылатын орталықтандырылмаған оқиғаға негізделген басқару әдісі [15], үсенсорлық желілер. көп агентті жүйелер ұшақтардың динамикасын модельдеу, өндіріс орындарын сымсыз желілер арқылы автоматтандыру, бағалаушы алгоритмдерінің жинақталуын ескере отырып СЖБЖ арқылы қамтылатын аумақты барынша кеңейту, сондай-ақ, байланыс жүйесінің энергия тұтынуын азайта отырып, басқару мен байланыс жүйелерін бірлесіп оңтайландыру [16].

Әдебиеттерде талқыланатын маңызды мәселелердің бірі СЖБЖ жүйелерінде қолданылатын топология, яғни желілік құрылым. Жалпы алғанда, СЖБЖ жүйелерінде үш түрлі жүйе құрылымы пайдаланылады:

- сенсорлар мен атқарушы құрылғылардың бірнеше түйінінен тұратын физикалық жүйе;
- кіріс және шығыс терминалдары бірнеше түйін арқылы жүзеге асырылатын басқару жүйесі;
- түйіндер мен сымсыз байланыс арналары біріктірілген толыққанды СЖБЖ жүйесі.

Топологияның құрамына қарапайым байланыс кестесін және есептеу тапсырмаларын орындау мүмкіндігі кіреді. Басқару жүйесінің ауқымын кеңейту және бірнеше сенсорлар мен атқарушы құрылғылар түйіндерін пайдалану мүмкіндігі көрсетілген. Ену (интрузия) детекциясы жүйесі де қарастырылып, оған байланысты топологиялық шарттар зерттелген. Сенімсіз байланыс арналары мен түйіндер жағдайында жұмыс істейтін топологияның моделі мен жобасы ұсынылған [17].

Топологияның жобасы мен анықтамасы егжей-тегжейлі сипатталған және байланысты жобалау аспектілері, соның ішінде біріктірілген жобалау мен модельді ықшамдау мәселелері талқыланған. Сенімсіз жағдайларға арналған топология жобасы ұсынылып, сенсорлар, атқарушы құрылғылар және басқарушы түйіндердегі, сондай-ақ барлық түйіндер арасындағы байланыс арналарының сенімсіздігі ескерілген [18].

Сымсыз желілік басқару жүйелерін дамуы туралы көптеген әдебиеттерде қарастырылған. Интернетті пайдалана отырып әртүрлі қосымшаларға арналған қашықтан басқару әдістері қарастырылып, басқару және есептеу теориялары арасындағы өзара әрекет ескерілген. Өнеркәсіпке қатысты қолданбалардағы нақты уақыттағы сымсыз сенсор-атқарушы желілері сымсыз желілік басқару жүйелерін туралы шолу берілген[19]. Бұл шолуға сымсыз желілік басқару жүйелерін жүйелерінде қолданылатын талдаулар мен алгоритмдер, протоколдарды қолдану және Сымсыз желілік басқару жүйелерін бірлескен жобалау тәсілдері кіреді.

Өнеркәсіптік IoT қосымшаларына арналған теориялық балама ретінде стохастикалық басқару әдістері ұсынылған, мұнда арнаның жүктемесі, конфигурацияланған байланыс протоколы және жүйедегі кідіріс әсері қарастырылған. Бұл жұмыстағы желі қашықтан, жергілікті немесе бұлтты жүйе болуы мүмкін, ал оның жұмыс істеу сипаттамасы әртүрлі бағдарламалық кітапханалар арқылы модельдеу нәтижесінде алынған. Сымсыз желі мен терең оқыту арасындағы байланыстарға жан-жақты шолу [20] де берілген. Сонымен қатар, мобильді жүйелерге терең оқытуды ендіру және сымсыз/мобильді желілердегі терең оқыту негізіндегі зерттеулер қарастырылған.

1.3 Сымсыз байланыс желісі

Келесі мысал сымсыз арналардың басқару жүйелерімен қалай өзара әрекеттесетінін көрсетеді, бір секірісті (single-hop) сымсыз желі протоколы — IEEE 802.15.4, СББЖ жүйесінде сенсорларды басқару құрылғысымен байланыстыру үшін қолданылады [22]. Бұл мысалда басқару шығыны ретінде жүйе күйінің қажетті мәннен ауытқулары мен басқару сигналдарының мәнінің квадратиктік қосындысы алынады. Басқару үшін ең жоғарғы рұқсат етілген шығын мәні 6 деп белгіленген, алайда бұл көрсеткіш осы қолданылып отырған протоколдың шектеулеріне байланысты қол жеткізілмейді. Жалпы алғанда, егер хабарламада кідіріс орын алса, дискреттеу периоды мен жоғалу

ықтималдығы артса басқару шығыны да ұлғаяды. Бұл дегеніміз, қысқа дискреттеу периодтарын қолдану хабарламадағы кідіріс пен жоғалу ықтималдығын шекті мәндерге жақындатып, жүйені орнықсыздыққа жақындатады. Қорытындылай келе, басқару және байланыс жүйелері арасындағы өзара әрекеттестікке байланысты СББЖ жүйесінде орындалу мүмкіндігіне қол жеткізу оңай емес екенін байқауға болады.

Сымсыз желілік басқару жүйесіндегі талдаулар мен мәселелер

Байланыс желісі	Басқару дизайны	СББЖ қолдану салалары	СББЖ-дегі қауіпсіздік мәселелері
Стандарттар	СББЖ үшін бірлескен жобалау	Зырылдауық жел жүйелері	
Пакет кідірісі	СББЖ онтайландыру үшін бірлескен жобалау	Көлік ішілік сымсыз желі	
Пакеттің жоғалуы / түсіп қалуы	СББЖ онтайландыруға арналған интерактивті жобалау тәсілдері	Авиация ішілік сымсыз байланыс	
Арианың өшуі	Қатысты зерттеу жұмыстарының қысқаша мазмұны	Ғимаратты автоматтандыру	
Соңнан соңға дейінгі қосылу		Өнеркәсіптік автоматтандыру	
Кідіріс тербелісі		Суды айдау жүйелері	
Желі дизайны			

1.2-сурет – Сымсыз байланысты басқару жүйесіндегі талдау құрылымы мен негізгі мәселелер

Сымсыз сенсорлық желілер өнеркәсіптік қолданбаларда кеңінен қолданылады және мұндай жүйелерді тиімді пайдалану үшін арнайы байланыс протоколдары мен техникалық талаптар қажет. Өнеркәсіптік ортада қолданылатын сымсыз сенсорлық жүйелер үшін түрлі стандарттар бар, олардың әрқайсысы желінің архитектурасы мен жұмыс істеу ерекшеліктеріне байланысты таңдалады. Бұл стандарттар жобалау принциптері мен сенімділік, энергия тиімділігі, деректер жеткізу жылдамдығы сияқты параметрлер бойынша ерекшеленеді.

Өнеркәсіптік автоматтандыруда нақты уақыт режимінде жұмыс істеу өте маңызды, сондықтан мұндай жүйелерде деректер алмасудың кідірісін азайтатын және сенімділікті арттыратын арнайы протоколдар мен алгоритмдер қолданылады. Мысалы, WirelessHART сияқты желілер нақты уақыттағы басқару үшін тиімді жоспарлау мен синхрондалған жұмыс істеуді қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, сымсыз сенсорлық желілер мен басқару құрылғыларының жобалануында байланыс пен басқару жүйелерінің өзара үйлесімді әрекеттестігі үлкен рөл атқарады. Осы екі жүйенің дұрыс интеграциясы басқару дәлдігін арттырып, жалпы жүйенің орнықтылығы мен сенімділігін қамтамасыз етеді.

1.4 Сымсыз желі стандарттары

Сымсыз желілік басқару жүйелерінде (СЖБЖ) ең жиі қолданылатын байланыс стандарттары – IEEE 802.15.4 және IEEE 802.11, сондай-ақ олардың жақсартылған нұсқалары. Әсіресе, WirelessHART, ISA-100.11a және IEEE 802.15.4e стандарттары түгелдей IEEE 802.15.4 физикалық деңгейі негізінде құрылған. Бұған қоса, Интернет-инженерлік жұмыс тобының (ИИЖТ) соңғы зерттеулерінде төмен қуатты әрі тұрақсыз желілерде Internet Protocol Version 6 (IPv6) қолдану қарастырылған. Мысалы, 6LoWPAN, төмен қуатты және тұрақсыз желілерге арналған маршрутизациялау протоколы (RPL), сондай-ақ 6TiSCH технологияларының барлығы да IEEE 802.15.4 стандартымен үйлесімді.

Кесте 1.2 – Сымсыз стандарттардың салыстырмасы

Сымсыз стандарттардың салыстырмасы Физикалық деңгей	Ортаға қол жеткізу әдісі	Деректерді тасымалдау деңгейі (Data Link)	Маршруттау (Routing)
IEEE 802.15.4	DSSS	CSMA/CA, GTS бөлінуі	-
Сымсыз стандарттардың салыстырмасы Физикалық деңгей	Ортаға қол жеткізу әдісі	Деректерді тасымалдау деңгейі (Data Link)	Маршруттау (Routing)
WirelessHART	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 MAC	TDMA, арнаны ауыстыру, арнаны қара тізімдеу (Channel blacklisting)
ISA-100.11a	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 MAC	TDMA, арнаны ауыстыру, арнаны қара тізімдеу (Channel blacklisting)
IEEE 802.15.4e	IEEE 802.15.4 PHY	TSCH, DSME, LLDN	-
6LoWPAN	IEEE 802.15.4 PHY	IEEE 802.15.4 MAC	Ықшамдау, фрагментация
RPL	Кез келген	Кез келген	-

6TiSCH	IEEE 802.15.4 PHY	TSCH	Басқару, ресурстарды бөлуді жоспарлау, өнімділікті бақылау (Performance monitoring)
IEEE 802.11	тікелей таралым спектрі, ортогоналды жиіліктік мультиплекстеу	DCF, PCF	-
IEEE 802.11e	тікелей таралым спектрі, ортогоналды жиіліктік мультиплекстеу	EDCA, HCCA	-

IEEE 802.15.4 стандарты бастапқыда төмен жылдамдықты, аз энергия тұтынатын және арзан персоналды аумақтық желілер үшін жасалған, бұл стандарт бастапқыда кідіріс пен сенімділік мәселелерін ескерместен әзірленген болатын. Ал WirelessHART, ISA-100.11a және IEEE 802.15.4e стандарттары IEEE 802.15.4-тің физикалық деңгейінің негізінде жасалып, оған қосымша уақыттық бөлінген көптік қолжетімділік (TDMA), жиілікті ауыстыру және көп бағыттылық сияқты мүмкіндіктерді қосу арқылы кідірістерді азайтуға, пакеттерді сенімді түрде жеткізуге кепілдік беруге және энергияны одан әрі үнемдеуге бағытталған [24].

Екінші жағынан, IEEE 802.11 стандарттарының тобы сымсыз жергілікті желі бастапқыда жоғары жылдамдықпен деректер жіберуді және үздіксіз желілік байланысты қамтамасыз ету үшін әзірленгенімен, соңғы уақытта осы стандарттарға өнеркәсіптік сымсыз байланыстардағы қызмет көрсету сапасын қамтамасыз ету мақсатында бірнеше қосымша кеңейтулер ұсынылды. Әсіресе, IEEE 802.11e стандарты нақты уақыт режиміндегі қосымшаларды қолдау үшін айтарлықтай жетілдірілді. Осы бөлімшеде біз базалық IEEE 802.11 және IEEE 802.11e стандарттарының негізгі жұмыс істеу принциптерін сипаттаймыз. Стандарттардың қысқаша салыстырмасы 3-кестеде берілген.

Стандарт арнаға қол жеткізудің екі режимін анықтайды: біріншісі – beacon қолданылатын режим, бұл режимде уақыттық слоттарға бөлінген тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және соқтығыстардың алдын алу механизмі және қосымша кепілді уақыттық слоттарды бөлу механизмі қолданылады, екіншісі beacon қолданылмайтын, қарапайым слоттарға бөлінбеген тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және соқтығыстардың алдын алу механизмі режимі. Байланыс «суперфреймдер» деп аталатын уақыттық терезелер арқылы ұйымдастырылады. 1.3-суретте

beacon қолданылатын режимдегі суперфрейм құрылымы көрсетілген. Әрі қарай, біз beacon режиміне тоқталамыз.



1.3-сурет – IEEE 802.15.4 стандартындағы суперфрейм құрылымы.

Желіні үйлестіруші координатор әрбір beacon интервалы сайын өзінің PAN желісін анықтау және онымен байланысатын түйіндерді синхрондау үшін beacon кадрларын (маяк сигналдарын) үнемі жіберіп отырады. Координатор мен түйіндер белсенді кезең ішінде, яғни суперфрейм ұзақтығы кезінде байланыса алады және белсенді емес кезеңде төмен қуатты режимге өтеді. Суперфреймнің құрылымы екі параметр арқылы анықталады: beacon реті, суперфрейм реті. Бұл параметрлер суперфреймнің жалпы ұзақтығы мен оның белсенді кезеңінің ұзақтығын келесі формулалар арқылы анықтайды.

$$T_{SD} = \text{Суперфреймнің негізгі уақыт мөлшері} \times 2^{SO} \quad (1.1)$$

$$T_{BI} = \text{Суперфреймнің базалық ұзақтығы параметрі} \times 2^B \quad (1.2)$$

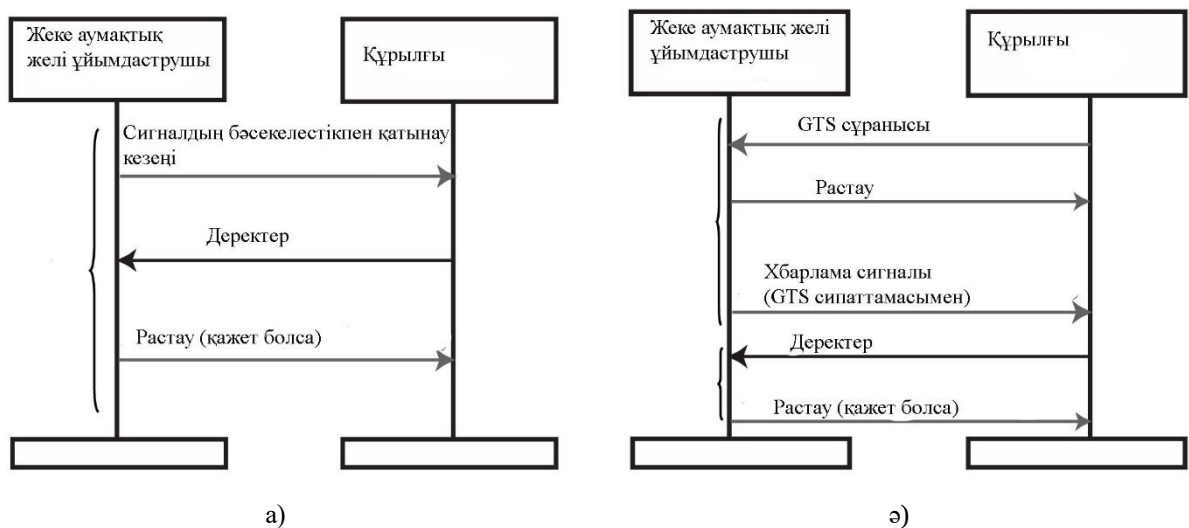
Мұнда $0 \leq SO \leq BO \leq 14$, ал суперфреймнің негізгі уақыт мөлшері бұл SO (суперфрейм реті) 0-ге тең болғандағы суперфреймді құрайтын символдар саны. Сонымен қатар, суперфрейм 16 бірдей өлшемдегі слотқа бөлінеді, әр слоттың ұзақтығы бір суперфрейм слотына тиесілі базалық уақыт ұзақтығына тең.

Әрбір белсенді кезең екі бөлікке бөлінуі мүмкін: бәсекелестікке негізделген қатынау кезеңі, Қажет болса, бәсекелессіз қатынау кезеңі ол кепілді уақыттық слоттардан құралады. Бәсекелі қатынау кезеңінде уақытқа сезімтал емес деректер мен кепілдендірілген уақыт слоты сұраныстарын арнаға жіберу үшін слоттарға бөлінген тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және соқтығыстардың алдын алу механизмі қолданылады. Ал бәсекесіз қатынау кезеңі кезеңінде нақты уақытты қажет ететін деректерге арналған арнайы өткізу жолағы пайдаланылады. 1.4-суретте beacon режиміндегі бәсекелестікке негізделген қатынау кезеңі және бәсекесіз қатынау кезеңі кезеңінде деректерді жіберу механизмі көрсетілген.

Пакет жіберу сұранысы орындалған кезде, алдымен арнаға кіруге қатысты айнымалылар инициализацияланады. Бұл кезде қақтығысу терезесінің өлшемі slot-based тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және соқтығыстардың алдын алу механизмі үшін 2 мәніне орнатылады. Кейінге қалдыру көрсеткіші және кейінге қалдыру әрекеттерінің саны сәйкесінше macMinBE және 0 мәндеріне теңестіріледі. Келесі кезеңде түйін кездейсоқ түрде $[0, 2^{\text{BE}} - 1]$ аралығынан бір мәнді тандап, сонша слотқа тең уақыт күтуге өтеді. Бұл күту кейінге қалдыру кезеңдерімен өлшенетін слоттар арқылы жүзеге асады.

Күту уақыты аяқталғаннан кейін арнаның бос не бос еместігі тексеріледі. Егер арна қаблданған ақпарат игналы қолданылмайтын режимде бос болса, пакет бірден жіберіледі. Ал егер сигнал режимінде арна бос болса, CW мәні 1-ге азаяды. Егер осыдан кейін $\text{CW}=0$ болса, пакет жіберіледі, ал керісінше жағдайда екінші рет арнаны тексеру жүзеге асырылады. Егер арна бос болмаса, келесі жаңартулар орындалады: $\text{NB}=\text{NB}+1$, $\text{BE}=\min(\text{BE}+1, \text{macMaxBE})$ және CW қайтадан 2-ге теңестіріледі.

Соңында, жүйе NB мәнінің $\text{macMaxCSMABackoffs}$ шегінен аспағанын тексереді. Егер $\text{NB} < \text{macMaxCSMABackoffs}$ болса, алгоритм кейінге қалдыру уақыты таңдалатын 2-қадамға қайта оралады. Ал NB осы шектен асып кетсе, пакет жойылады және жіберілмейді.



1.4-сурет – Хабар тарататын сигналыдың бәсекелестікпен қатынау кезеңі мен бәсекелессіз қатынау кезіндегі қолданылатын режимдегі деректерді жіберу процесі: а) уақытқа сезімтал емес деректер пакетік сұранысын жіберу; ә) Уақытқа сезімтал деректер пакетін жіберу.

IEEE 802.11 стандарты бастапқыда жоғары өткізу қабілеті бар желілерге арналса да, өнеркәсіптік деңгейдегі сапалы қызмет көрсетуге бейімделу үшін IEEE 802.11e нұсқасы енгізілді. Суперфрейм құрылымы маяк (beacon) арқылы синхрондалып, екі негізгі кезеңге бөлінеді. Бәсекелестікпен қатынау кезеңінде мұнда құрылғылар тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және

соқтығыстардың алдын алу механизмі алгоритмі арқылы желіге қатынау үшін бәсекелеседі. Бәсекелессіз қатынау кезеңі GTS арқылы нақты уақыттағы маңызды деректер арнайы бөлінген уақыт интервалдарында жіберіледі. Тасымалдаушыны тыңдау арқылы көптік қатынау және соқтығыстардың алдын алу механизмі алгоритмі екі түрлі режимде әртүрлі жұмыс істейді: beacon қолданылатын режимде кейінге қалдыру таймері слоттың басында, ал beacon қолданылмайтын режимде бірден іске қосылады. Бұл алгоритм қақтығыссыз және тиімді арнаға қол жеткізуді қамтамасыз етуге бағытталған.

1.5 Сымсыз басқару жүйесін талдау және жобалау

Сымсыз желінің кемшіліктері басқару контурларының өнімділігін төмендетіп, жүйенің тұрақсыздығына әкелуі мүмкін. Сондықтан, бұл айнымалылардың жабық басқару жүйесіне сандық түрде қалай әсер ететінін түсіну өте маңызды.

Басқару жүйесін талдаудың бұл жерде екі негізгі мақсаты бар 1) желі жобасына қойылатын талаптарды анықтау, 2) нақты басқару алгоритмін жобалау. Біріншіден, басқару жүйесінің тиімділігі желідегі хабарламалардың жоғалуы мен кідірісі сияқты сипаттамаларға байланысты болғандықтан, басқару сапасын қамтамасыз ету үшін сымсыз желіге нақты талаптар жиынтығы анықталады. Бұл тәсіл желі сенімділігін, кідірісті немесе энергия үнемділігін жалпы жақсартудан гөрі, басқару жүйесінің шектеулерін ескеріп, желіні оңтайландыруға мүмкіндік береді. Екіншіден, басқару жүйесін талдау негізінде, сымсыз желі толықтай мінсіз жұмыс істемеген жағдайда да басқару тиімділігін қамтамасыз ететін басқарушы жобаланады.



1.5-суретте – Басқару жүйесін талдау және жобалау процесі көрсетілген.

Басқару жүйесін талдау және жобалауда сымсыз желілердің кемшіліктері (кідіріс, хабарламаның жоғалуы, үлгілеу жиілігі) басқару жүйесінің жұмысына қалай әсер ететінін зерттейді. Жүйенің орнықтылығы мен тиімділігі үшін бұл факторлар ескеріле отырып, тиісті басқару алгоритмдерін жобалауды қажет етеді.

Оқиғаға негізделген дискреттеу бұл әдісте мәліметтерді жинау және жіберу нақты бір оқиға (мысалы, өлшенген мән шекті деңгейден асқанда) болғанда ғана іске асады. Бұл тәсіл желі мен энергия ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Оқиға арқылы басқару – басқару әрекеті тек алдын ала белгіленген оқиға немесе шарт орындалғанда ғана орындалады. Бұл жүйенің реакциясын нақты әрі үнемді етеді. Өзін-өзі іске қосатын басқару – бұл жүйе алдыңғы жағдай негізінде келесі басқару әрекетін алдын ала есептеп жоспарлайды. Бұл әдіс нақты уақыттағы кері байланысты қажет етпей, болжамды негізде жұмыс істейді[19].

Уақытқа және оқиғаға негізделген дискреттеу арасындағы салыстыру – бұл уақытқа және оқиғаға негізделген басқару тәсілдерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстырады. Уақытқа негізделген тәсіл – қарапайым және болжамды, ал оқиғаға негізделген тәсіл – тиімді және ресурсты үнемдейді. Жүйе талаптарына байланысты осы екі тәсілдің ең қолайлысын таңдау ұсынылады

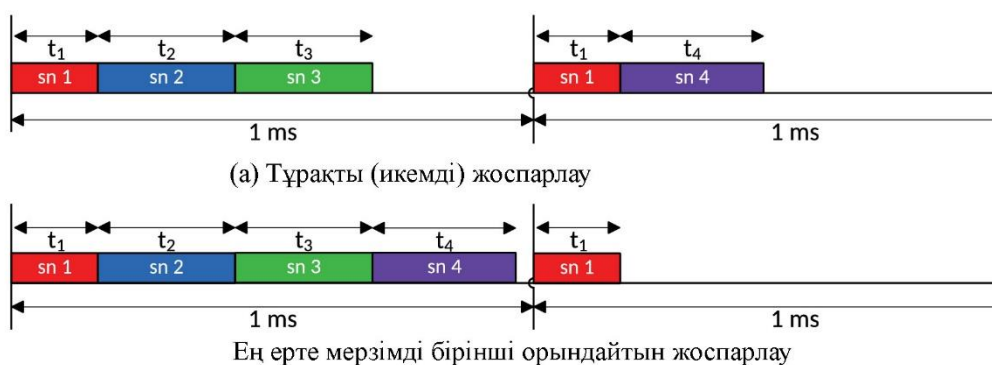
1.6 Сымсызы ортаны басқару параметрлері

IEEE 802.11 стандартына сүйене отырып, нақты уақытты сымсыз желілік басқару жүйелері үшін мерзімімен шектелген басқаруға арналған протоколы және қызмет көрсету сапасын саралау мүмкіндігі ұсынылады. Бұл протокол периодты трафикті өңдеу үшін екі арнайы механизмді қолданады: 1) қақтығысқа сезімтал кейінге қалдыру механизмі, 2) мерзімге сезімтал қайта жіберу шектерін тағайындау механизмі. Кейінге қалдыру алгоритмі кейінге қалу уақытын шектеулі етіп қамтамасыз етеді, ал мерзімге сезімтал қайта жіберу шектері әртүрлі периодты трафик түрлеріне олардың мерзімдік талаптарына байланысты сараланған шектер тағайындайды[20].

Алдымен, желідегі кідіріс уақытының статистикалық таралуы әртүрлі фондық трафик жағдайларында шынайы өндірістік сценарийлерге ұқсас трафик үлгілері кезінде тәжірибе жүзінде бағаланады. Кейін бұл тәжірибелік нәтижелер теориялық талдау арқылы расталады, бұл жақсы жобаланған өндірістік байланыс жүйелерінде жиі кездесетін қанықпаған трафик жағдайында жүзеге асырылады. Өнімділік бағалауы көрсеткендей, егер өндірістік сымсыз жергілікті желіде трафик жүктемесі жеңіл (20%-дан төмен) болса, кідірістер, әдетте, шектелген болып қалады. Ал егер трафик жүктемесі жоғарылай түссе (40%-ға дейін), онда жетілдірілген таратылған арнаға қол жеткізу әдісі арқылы қамтамасыз етілетін қызмет көрсету сапасы механизмі

маңызды басымдыққа ие хабарламалар үшін болжалды тәртіп пен шектелген кідірістерге қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Физикалық деңгейде дискреттеу периодтары мен беру мерзімдеріне байланысты басымдықты тағайындау мен жоспарлау алгоритмі ұсынылады. Бұл алгоритм бейімделгіштіктің ең жоғарғы деңгейін қамтамасыз етуге, уақытпен іске қосылатын түйіндердің пакет жоғалтуына және оқиғаға негізделген түйіндердің берілісін тиімді түрде ұйымдастыруға бағытталған. Бейімделгіштіктің мағынасы келесі мысал арқылы көрсетіледі. Желіде 4 сенсор түйіні бар делік. Әр сенсор түйіні $i \in [1, 4]$ деп белгіленеді. 1-сенсордың пакет генерация периоды 1 мс, ал жіберу уақыты $t_1 = 0.15$ мс. 2, 3 және 4-сенсорлар үшін пакет генерация периоды 2 мс, ал жіберу уақыттары $t_2 = 0.20$ мс, $t_3 = 0.25$ мс және $t_4 = 0.30$ мс. 1.6 (а) және 1.6(ә) суреттері неде (а) уақыт бойынша біркелкі бөлінген тұрақты (robust) жоспарды, (ә) Ең ерте дедлайн жоспарын көрсетеді. (а)-суреттегі тұрақты кесте – пакеттердің жоғалуына төзімділігі жағынан (ә)-дегі бұл нақты уақыттағы жүйелерде қолданылатын тапсырмаларды жоспарлау алгоритмін жоспарына қарағанда жақсырақ. Мысалы, егер 1-сенсордың алғашқы 1 мс ішіндегі пакеті сәтті жіберілмесе, тұрақты жоспар (а) бұл пакетті қайта жіберу үшін жеткілікті бос уақыт интервалдарын қамтиды, ал нақты уақыттағы жүйелерде қолданылатын тапсырмаларды жоспарлау (ә) дегідей мүмкіндік бермейді. Сонымен қатар, тұрақты жоспар оқиғаға негізделген трафикті де кідіріссізирек өңдей алады. Мысалы, егер оқиға негізінде бір сенсор 0.2 мс-тік пакет жіберсе, тұрақты жоспар бұл пакетті 0.60 мс кешігумен, ал нақты уақыттағы жүйелерде қолданылатын тапсырмаларды жоспарлау 1.15 мс кешігумен ғана жібере алады [21].



1.6-сурет – Екі жоспарлау әдісінің түсіндірмелі мысалы

Нақты уақыттағы басқару жүйелерінде деректерді беру үшін қолданылатын екі түрлі жоспарлау әдісі бейнеленген. (а) Тұрақты жоспар – сенсор түйіндерінен (SN1, SN2, SN3, SN4) деректерді жіберуге арналған уақыт слоттары тең аралықпен бөлінген. Бұл құрылым әр сенсорға өз уақытында дерек жіберуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, бос уақыт аралықтары қалдырылған, олар деректер жоғалған жағдайда қайта жіберуге қолайлы

жағдай жасайды. Мысалы, SN1 дерегі бірінші циклде жіберілмесе, кейінгі бос интервалда қайта жіберілуі мүмкін. Мұндай жоспар жоғары сенімділікке ие және оқиғаға негізделген трафикке икемді болып келеді. (ә) ең ерте мерзімді бірінші орындайтын жоспары әрбір сенсор дерегін оның ең ерте орындалу мерзіміне қарай орналастырады. Бұл әдіс тиімді ресурстық пайдалануды қамтамасыз етеді, бірақ қайта жіберуге бос интервалдар болмағандықтан, сенімділігі төмен болуы мүмкін. Сонымен қатар, кенеттен пайда болатын оқиғалық пакеттерді енгізу кезінде үлкен кідірістер туындауы ықтимал[22].

Сондай-ақ СЖБЖ архитектурасы мен негізгі мәселелері талданды. Контроллер, сенсорлар, атқарушы құрылғылар және сымсыз арналардан тұратын типтік құрылымда кідіріс, пакеттердің жоғалуы, дискреттеу периоды және желі топологиясы басқару жүйесінің орнықтылығы мен өнімділігіне тікелей әсер ететіні анықталды. Осыған байланысты басқару мен байланыс жүйелерін бірлесіп жобалау, оқиғаға негізделген дискреттеу, бейімделгіш жоспарлау және мерзімге сезімтал қайта жіберу механизмдері сияқты тәсілдер ұсынылып, олардың артықшылықтары түсіндірілді. Тұрақты жоспарлау мен «ең ерте дедлайн» тәсілдерін салыстыру арқылы нақты уақыттағы басқаруда сенімділік пен ресурстарды тиімді пайдаланудың арасындағы балансты табу қажеттілігі көрсетілді.

Бөлімнің тағы бір маңызды нәтижесі – сымсыз байланыс протоколдары мен стандарттарын салыстырмалы талдау болды. IEEE 802.15.4, WirelessHART, ISA100.11a, IEEE 802.11/802.11e, сондай-ақ 6LoWPAN, RPL, 6TiSCH сияқты технологиялардың физикалық деңгей, ортаға қол жеткізу әдісі, маршрутизация және қызмет көрсету сапасы тұрғысынан ерекшеліктері қарастырылды. Сонымен бірге ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT, BLE, Wi-Fi секілді протоколдардың жиілік диапазоны, байланыс қашықтығы, мәлімет жылдамдығы, қуат тұтынуы және қолдану салалары бойынша айырмашылықтары көрсетіліп, протокол таңдаудың негізгі критерийлері – қашықтық, энергия тиімділігі, деректер ағынының сипаты, қауіпсіздік талаптары және желі масштабтылығы екені айқындалды. Қорытындылай келе, өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді қолдану үшін тек жеке стандарттарды емес, басқару алгоритмдері мен желілік протоколдардың өзара үйлесімді әрекетін кешенді түрде ескеру қажет екені дәлелденді.

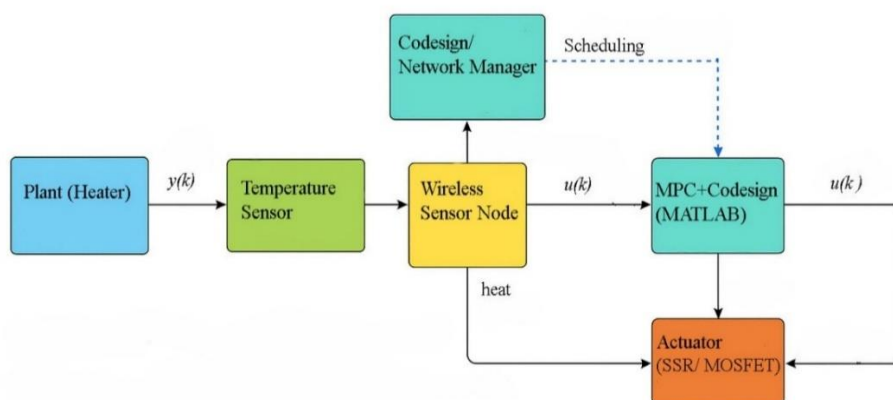
2 Сымсыз желілік басқарудағы протоколдардың жоспарлау және тұрақтылықты қамтамасыз ету әдістері

2.1 Сымсыз желілік басқару жүйелері үшін модельдік-болжамды басқару

Өнеркәсіптік процестерді сымсыз басқаруда жүйенің жұмысы тек басқарылатын нысанның динамикасы ғана емес, сонымен қатар желі параметрлерінен туындайтын кідіріс (τ_{net}) және пакеттердің жоғалу (p_{loss}) да әсер етеді. Сондықтан мұндай басқару жүйелерін болжамды басқару алгоритмін және желілік ресурстарды бөлуді бір мезгілде ескеретін интеграцияланған тәсілді талап етеді.

Модельдік-болжамды басқару стратегиясы жүйенің болашақ динамикасын математикалық модель негізінде болжауға мүмкіндік береді және басқару сигналының траекториясын анықтауға бағытталған. Оның мақсаттық функциясы қадағалау қатесін, басқару сигналының өзгерісін және желі параметрлері τ_{net} пен p_{loss} қамтиды. Алайда нақты уақыт режимінде жүйенің дискреттеу жиілігі желіні жоспарлау процесіне тікелей әсер етеді. Осыған байланысты co-design тәсілі қолданылады. Бұл тәсіл басқару алгоритмдерінің дискреттеу жиілігін ($\phi_i=1/T_i$) және желілік ресурстарды бөлуді динамикалық түрде анықтап, қадағалау қатесін азайтуға мүмкіндік береді.

2.1-суретте сымсыз басқаруда қолданылатын Модельдік-болжамды басқару мен бірлескен жобалау тәсілінің біріктірілген архитектурасы көрсетілген. Бұл құрылымда сенсорлық деректер сымсыз желі арқылы МББ контроллеріне беріледі, ал Co-Design менеджері ретінде жоспарлау мен ресурс бөлуді жүзеге асырады. Мұндай тәсіл радио байланыстан туындайтын кідіріс пен пакеттердің жоғалудың алдын алады.



2.1-сурет – МББ негізіндегі сымсыз желілік басқару жүйесінің біріктірілген архитектурасы

Бұл суретте температура сенсорын басқаруға арналға сымсыз сенсор түйініді МББ – Co-design интеграциясымен басқару принципі көрсетілген.

Мұнда жоспарлау және бейімделу процестері желілік кідірістер жағдайында да сенімді әрі энергия тиімді басқаруды қамтамасыз етеді. $y(k)$ - температураның кері байланыс бойынша өлшенген мәні; $p(k)$ - желі арқылы қабылданған өлшеу; $u(k)$ - МББ (МББ) есептеген басқару сигналы (актуаторға желі арқылы жеткізіледі); $\bar{u}(k)$ - актуатор желі арқылы қабылдаған нақты сигнал; Scheduling дискреттеу слотын/басымдықты бейімдеу (таңдау, өзгерту), Adaptation МББ-ның салмақ коэффициенттері мен шектеулерін жаңарту.

2.2 Болжамды басқару алгоритмінің математикалық тұжырымдалуы

Модельдік-болжамды басқару негізгі ерекшелігі жүйенің болашақ күйлерін болжау және соған сәйкес оңтайлы басқару әрекеттерін анықтау үшін математикалық модельді пайдалануында. Сымсыз желілер арқылы басқаруда туындайтын кідіріс және пакеттердің жоғалу жалпы басқару өнімділігіне тікелей әсер етеді. Бұл факторлар тұйықталған жүйенің тұрақтылығы мен әрекет ету жылдамдығына ықпал етеді және олардың әсері келесідей сипатталады [23]:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k, \quad y_k = Cx_k, \quad (2.1)$$

Болжам көкжиегі N_p 30 немесе 20 сияқты мәндерге тең болғанда, ал басқару көкжиегі N_c 8 немесе 5 болып таңдалса (мұнда $N_c \leq N_p$), сәйкес болжам векторлары келесі түрде өрнектеледі.

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \quad \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} r(k+1) \\ \vdots \\ r(k+N_p) \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Мұнда $\Delta u(k+j) = u(k+j) - u(k+j-1)$ мүшесі $k+j$ қадамындағы басқару кірісінің өсімдік (инкременттік) өзгерісін білдіреді, ал $u(k-1)$ алдыңғы дискреттеу сәтінде қолданылған соңғы басқару сигналын көрсетеді. Осы анықтамаларға сүйене отырып, МББ (МББ) тұжырымында қолданылатын классикалық Тоеплиц матрицаларын келесі түрде құруға болады [24].

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Болжам көкжиегі бойындағы басқару өсімдерінің жинақталған әсерін сипаттайтын жинақтаушы үшбұрышты матрица келесідей анықталады:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N_c \times N_c}, \quad \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Инкременттік басқару түріндегі жазылуы келесідей өрнектеледі:

$$U = \mathbf{1}u_{k-1} + T\Delta U, \quad Y = f(x_k, u_{k-1}) + \tilde{G}\Delta U, \quad (2.5)$$

Матрица түрінде былай жазылады

$$U = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N_c-1) \end{bmatrix} = \mathbf{1}u_{k-1} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

Күйді жанарту функциясы келесідей өрнектеледі:

$$f(x_k, u_{k-1}) = Fx_k + G\mathbf{1}u_{k-1}, \quad \tilde{G} = GT \quad (2.7)$$

Сәйкесінше болжанған шығыс шамаларының тізбегін келесі түрде сипаттауға болады:

$$Y = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+N_p|k) \end{bmatrix} = Fx_k + G\mathbf{1}u_{k-1} + GT \begin{bmatrix} \Delta u(k) \\ \Delta u(k+1) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1) \end{bmatrix}, \quad (2.8)$$

Желі кідірісі $\tau_{\text{net}} \approx dT_s$ ескерілген кезде, басқару командасы алғашқы d дискреттеу интервалында басқарылатын нысанға жете алмайды. Осы кідірістің әсерін өтеу үшін жүйенің реакциясын тиісінше түзететін, кідірісті компенсациялайтын матрицаларды енгізу арқылы түрлендірілген болжамдық модель құрастырылады [25].

Негізгі инкременттік МББ тұжырымы

$$Y = Fx_k + GT\Delta U + G_1u_{k-1}, \quad (2.9)$$

Желі кідірісі $\tau_{\text{net}} \approx dTs$, яғни дискреттеу интервалына сәйкес келетін кідіріс орын алған жағдайда, алғашқы дискреттеу басқару әрекеті басқарылатын нысанға (объектке) уақытында жете алмайды [26].

Бұл әсерді дұрыс ескеру үшін екі қосымша матрица енгізіледі. Соның біріншісі – ығыстыру матрицасы $D_d \in \mathbb{R}^{N_p \times N_p}$. Ол басқару командасын дискреттеу қадамына төмен қарай ығыстырады және келесідей анықталады:

$$D_d = \begin{bmatrix} 0 & I_{N-d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Соңғы қолданылған басқару әрекеттерін сақтайтын вектор келесідей өрнектеледі:

$$S_d \in \mathbb{R}^{N_p} \quad S_d = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad g_1 = CA^{d-1}B, \quad (2.11)$$

гі параметрлері жартылай өтпелі (step-response) Марков параметрлеріне сәйкес келеді. $N_c \leq N_p$ болған жағдайда, басқару және болжам көкжиектері арасындағы айырмашылықты дұрыс ескеру үшін кеңейтілген жинақтаушы матрица енгізіледі [27].

Жинақтаушы матрица келесідей анықталады:

$$T \in \mathbb{R}^{N_p \times N_p}, \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.12)$$

Алайда, тек алғашқы N_c басқару өсімдері ғана оңтайландыруға қатысатындықтан, таңдау матрицасы енгізіліп, ол келесідей анықталады:

$$P = \begin{bmatrix} I_{N_c} \\ 0_{(N_p - N_c) \times N_c} \end{bmatrix}, \quad \text{мұнда } T_c := TP \in \mathbb{R}^{N_p \times N_c}. \quad (2.13)$$

Кідірістің бар болуы ескерілген кезде, түрлендірілген матрицалар мен болжам функциясын келесідей түрінде жазуға болады:

$$\hat{G} = G D_d T_c, \quad \hat{f} = F x_k + S_d u_{k-1}. \quad (2.14)$$

Сәйкесінше, алынған болжам теңдеуін келесідей түрде жазуға болады:

$$Y = \hat{f}(x_k, u_{k-1}, d) + \hat{G} \Delta U_c, \quad (2.15)$$

$\Delta U_c \in \mathbb{R}^{N_c}$ векторы болжамды басқару алгоритмі арқылы есептелетін, оңтайландырылған басқару өсімдерін қамтиды. G және T матрицалары сәйкесінше классикалық Тоеплиц матрицасына және жинақтаушы (кумулятивті) құрылымға сәйкес келеді және мынадай түрде анықталады:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ g_{N_p} & g_{N_p-1} & \cdots & g_2 & g_1 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Оңтайландыру есебі келесі түрде тұжырымдалады. Бұл есептің негізгі мақсаты болжам көкжиегі ішінде жүйе шығысының берілген эталондық траекториядан ауытқуын барынша азайту және басқару сигналдарының өзгерісін шектеу арқылы энергия тиімділігін қамтамасыз ету. Осы мақсатқа жету үшін басқару өсімдері ΔU_c векторы айнымалы ретінде қарастырылады, ал мақсаттық функция қадағалау қатесін және басқару әрекеттерінің шамадан тыс өзгеруін бір уақытта есепке алатын квадратиктік функционал түрінде беріледі. Q матрицасы шығыс қатесін жазалаушы салмақ, жүйенің бақылау дәлдігін анықтайды, R матрицасы басқару энергиясын немесе басқару сигналдарының жылдам өзгеруін шектейтін салмақ, G , T Тоеплиц және жинақтаушы матрицалар, олар жүйенің болашақ динамикасын моделдеуге негіз береді, Δu_c оңтайландыру айнымалысы, МББ есептейтін басқару өсімдері, M , b жүйеге қойылған барлық шектеулерді жинақтап көрсететін матрица-векторлық құрылым[28].

$$\min \| R - (\hat{f} + \hat{G} \Delta U_c) \|_Q^2 + \| \Delta U_c \|_R^2. \quad (2.17)$$

Мұндағы эталондық траектория векторы (мысалы $R = [r(k+1), \dots, r(k+N_p)]^T$) Оңтайландыру есебіне қойылатын шектеулерді келесі стандарт түрде жазуға болады: $\Delta u_{\min} \leq \Delta U_c \leq \Delta u_{\max}$, ал басқару сигналының шектері үшін: $u_{\min} \leq 1u_{k-1} + T_c \Delta U_c \leq u_{\max}$. Бұдан басқа, жүйенің қажетті жұмыс өнімділігін қамтамасыз ету және актуатордың қанығуын болдырмау мақсатында шығысқа қойылатын шектеулер де осыған ұқсас түрде тұжырымдалуы мүмкін. Бұл шектеулерді төменде көрсетілгендей неғұрлым ықшам әрі жалпы түрде қайта

жазуға болады: $y_{\min} \leq \hat{f} + \hat{G}\Delta U_c \leq y_{\max}$. Бұл шектеулерді төменде көрсетілгендей, неғұрлым ықшам әрі жалпы түрде $M\Delta U_c \leq b$, қайта жазуға болады[29].

Матрица M мен b векторы оңтайландыру процесіне қатысатын барлық белсенді теңсіздік түріндегі шектеулерді қамтиды. Желіде dTs шамасындағы кідіріс пайда болған жағдайда, басқару өсімі басқарылатын нысанның шығысына шамамен d дискреттеу интервалынан кейін ғана әсер ете бастайды. Осы контексте $Suk-1$ матрицасы алдыңғы басқару тізбегінің соңғы қадамында қолданылған ең соңғы басқару сигналының әсерін сипаттайды. Бұл тек соңғы $uk-1$ басқару өсімінің ғана нысан реакциясына үлес қосуын қамтамасыз етеді. Көкжиектердің айырмасы $T-N$ болжам көкжиегі Np ішінде қанша басқару өсімі жинақталатынын анықтайды. Осыған сәйкес, әрбір дискреттеу сәтіндегі басқару сигналының өсімін келесі түрде жазуға болады:

$$\Delta u(k+j) = u(k+j) - u(k+j-1), \quad (2.18)$$

Бұл өрнек $k+j$ -қадамдағы басқару сигналындағы өзгерісті сипаттайды және сәйкес басқару әрекетінің шамасын анықтайды. Жүйенің әрбір дискреттеу сәтіндегі болжанған шығысы $y(k+j | k)$ түрінде белгіленеді.

Бұл тұжырым модельдік-болжамды басқаруда кеңінен қолданылатын классикалық құрылымды білдіреді. Осы шеңберде $y(k+j | k)$ болжамдалған шығысы k -сәтінде қолжетімді ақпаратқа сүйене отырып, $k+j$ -қадамдағы жүйенің күтілетін әрекетін сипаттайды. Ал $r(k+j)$ эталондық сигнал жүйенің қажет етілетін шығыс траекториясын анықтайды; оңтайландыру процесі болжам көкжиегі Np бойында $y(k+j | k)$ пен $r(k+j)$ арасындағы ауытқуды барынша азайтуға бағытталған.

Мұнда Np - болжам көкжиегі, ал Nc - басқару көкжиегі, және $Nc \leq Np$ шарты орындалады. $Q(j)$ және $R(j)$ салмақтау матрицалары жүйе өнімділігі мен басқару күші арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді: $Q(j)$ шығысты қадағалау қатесін жазаласа, $R(j)$ басқару әрекеттерінің шамадан тыс өзгерісін немесе энергия шығынын жазалайды.

Қосымша түрде, $\xi_i(\phi_i, N)$ функциясы дискреттеу сапасының көрсеткіші болып табылады және дискреттеу аралығы мен желі жағдайына тәуелді түрде дискреттік-уақыттық жуықтаудың дәлдігін сипаттайды. Мұндағы x_k - күй векторы, u_k - басқару кірісі, ал y_k - жүйе шығысы. A , B және C матрицалары жүйенің кеңістіктік-күйлік моделінің параметрлеріне сәйкес келеді, ал K жабық контурлы басқаруды тұрақтандыруға жауапты кері байланыс күшейту матрицасы болып табылады.

2.3 Сымсыз байланыс жүйесінің тұрақтылығы мен жинақталу шарттары

(2.15)-теңдеуде көрсетілген мақсаттық функцияны минимизациялау кезінде басқару әрекеттерінің (control actions) жинақталуын қамтамасыз ету

және тұтас басқару жүйесінің асимптоталық тұрақтылығын сақтау — модельдік-болжамды басқару үшін негізгі талаптардың бірі болып табылады. Егер бұл талаптар орындалмаса, желілік кідірістер мен пакет жоғалулары бар ССБЖ жағдайында жүйе жауаптары тербелмелі сипатқа ие болуы, басқару сигналының тұрақсыздануы немесе шығыс траекториясының эталоннан айтарлықтай ауытқуы мүмкін..

Осы талаптарды орындау үшін келесі түрдегі квадраттық Ляпунов функциясы енгізіледі:

$$V(x_k) = x_k^T P x_k. \quad (2.19)$$

$P=P^T>0$ матрицасы симметриялы және оң анық, Ляпуновтың тұрақтылықты талдауындағы салмақтау матрицасы ретінде қызмет атқарады.

Қолданылып отырған МРС басқару заңы үшін келесі тұрақтылық шарты орындалуы керек [30]:

$$V(x_{k+1}) - V(x_k) \leq -x_k^T Q x_k - u_k^T R u_k, \quad (2.20)$$

$Q = Q^T > 0$ және $R=R^T>0$ екеуі де симметриялы, оң анық салмақтау матрицалары. Осы теңсіздік жүйенің Ляпунов мағынасында тұрақты екенін және басқару әрекетіне байланысты энергияның шектелгенін растайды. Егер P матрицасы келесі дискретті Ляпунов теңдеуін қанағаттандырса, онда тұйық жүйенің тұрақтылық шарты қамтамасыз етіледі:

$$A^T P A - P = -(Q + K^T R K), \quad (2.21)$$

Бұл жағдайда жүйе асимптоталық тұрақты болып табылады. Сәйкесінше, мақсаттық функцияны минималдау $k \rightarrow \infty$ кезінде x_k күйлік векторының нөлге ұмтылуын қамтамасыз етеді. Бұл нәтиже басқару үдерісінің жинақталатындығын және оның бүкіл жұмыс істеу барысында энергетикалық тұрақтылықты сақтайтынын көрсетеді.

2.4 Жоспарланған басқарудың сипаттамалары

Онлайн жоспарлауды бейімдеуді қолдау үшін басқару мен жоспарлау механизмдерін біріктіретін бірлескен жобалау (co-design) стратегиясы ұсынылады. Бұл стратегия желіні басқарушы модульдің (network manager) ішінде жұмыс істейді және белсенді басқару алгоритмдерінің жұмыс тиімділігін үздіксіз бағалап отырады. Ол үлгілеу жиіліктерін де, жоспарлау басымдықтарын да нақты уақыт режимінде динамикалық түрде реттейтін итерациялық оңтайландыру рәсімін қолданады.

Ағымдағы басқару тиімділігін көрсету үшін алдын ала келесідей анықталған болжамды қадағалау қатесін (predicted tracking error) минималдау

ескеріледі. Ұзындығы H болатын шекті болжамалау горизонты ағымдағы уақыт мезетінен бастап анықталады. Үлгілеу периоды T_i (оған сәйкес үлгілеу жиілігі $\varphi_i = 1/T_i$) бар әрбір F_i басқару алгоритмі үшін бұл период берілген жоғарғы шекті мәннен асып түседі деп есептеледі.

$$\eta_i = \left\lfloor \frac{H}{T_i} \right\rfloor, \quad (2.22)$$

Әрбір j -ші үлгілеу мезеті үшін сәйкес шығу мәні анықталады. Шектеу функциясы алдымен $F_i F_{i-1} F_i$ басқару алгоритмінен алынған ең соңғы қолжетімді үлгіні ескереді, ал j -ші үлгілеу мезетіндегі болжанған шығыс $1 \leq j \leq \eta_i$ болғанда $y(k+j|k)$ түрінде өрнектеледі.

F_i басқару алгоритмінің болжам дәлдігін бағалау үшін ξ_i айнымалысы енгізіледі, ол болжамды қадағалау қатесін сипаттайды. Бұл шама ұзындығы H болатын болжамалау горизонты ішіндегі барлық дискретті үлгілеу мезеттері бойынша есептеледі және болжам қателерінің орташа квадраттық мәні (RMS) ретінде анықталады

$$\xi_i(\varphi_i, H) = \sqrt{\frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^{\eta_i} (y(k+j|k) - r(k+j))^2}, \quad (2.23)$$

Мұнда $r(k+j)$ анықтамалық немесе номиналды траекторияны (мысалы, қажетті температура профилін) білдіреді. Үлгілеу жиілігін φ_i арттыру болжамның дәлдігін жақсартады, бұл өз кезегінде ξ_i мәнінің кемуіне алып келеді. Алайда бірнеше басқару алгоритмдері ортақ желілік ресурстарда жұмыс істеген кезде, бір алгоритмнің дискреттеу жиілігі сөзсіз басқа алгоритмдердің жиілігіне әсер етеді, соның салдарынан олардың арасында ықтимал байланысу әсерлері пайда болады..

2.5 Модельдік болжамды басқару және бірлескен жобалау тәсілі негізіндегі біріктірілген мақсаттық функцияны әзірлеу

Осы екі әдістемені біріктірген кезде сымсыз өнеркәсіптік ортадағы басқару өнімділігін арттыру үшін әрі объект динамикасын, әрі желі сипаттамаларын ескеру қажет болады [31]. МББ тұғыры қадағалау қателігін де, басқару әрекетінің шығынын да минималдауға бағытталған, ал жоспарлау мен басқарудың бірлескен жобалау тәсілі үлгілеу жиіліктерін және желілік ресурстарды бөлуін нақты уақытта бейімдеудің тетігін ұсынады. Сәйкесінше, осы екі стратегия біріктірілген кезде алынатын біріктірілген мақсаттық функция келесідей түрде жазылуы мүмкін:

$$J(\varphi) = \underbrace{\sum_{i=1}^N \left[\sum_{j=1}^{N_p} Q(j) (y(k+j|k) - r(k+j))^2 \right]}_{\text{tracking accuracy}} + \underbrace{\sum_{j=0}^{N_c-1} R(j) (\Delta u(k+j))^2}_{\text{control effort}} + \left[\underbrace{\xi_i(\varphi_i, H)}_{\text{discretization quality}} + \underbrace{\lambda_{\text{net}} P_{\text{loss},i}(k)}_{\text{packet loss probability}} + \underbrace{\lambda_{\text{elay}} \tau_{\text{net},i}}_{\text{network delay time}} \right]. \quad (2.24)$$

$Q(j)$ және $R(j)$ коэффициенттері тиісінше шығу шамасын қадағалау қателігі мен басқару сигналындағы $\Delta u(k+j)$ өзгерісіне арналған салмақтау коэффициенттері ретінде қызмет етеді. $\xi_i(\varphi_i, H)$ мүшесі үлгілеу жиілігіне тәуелді болжамды қадағалау қатесін білдіреді, ал $P_{\text{loss}}(k)$ пакеттердің жоғалу ықтималдығын $\tau_{\text{net},i}$ желілік кідірісті сипаттайды.

Осы біріктірілген мақсаттық функцияны минималдау траекторияны қадағалау нақтылығын арттыруға және басқару әрекеттерінің жалпы тиімділігін жақсартуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар ол сымсыз желі ішінде деректерді беру сенімділігі мен орнықтылығын жоғары деңгейде сақтайды. Нәтижесінде IEEE 802.15.4e TSCH, WirelessHART және ISA100.11a сияқты сымсыз басқару стандарттарының жұмысы айтарлықтай жақсарып, өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелері әртүрлі желілік жағдайларда да тұрақты әрі сенімді жұмыс істеуге қол жеткізеді.

2.6 Параметрлерді баптау және сезімталдықты талдау

Мақсаттық функциядағы λ_1 , λ_2 және λ_3 салмақтау коэффициенттері жүйе жұмысының бірнеше аспектісіне әсер етеді, соның ішінде қадағалау дәлдігіне, басқару энергиясына және кідіріс сипаттамаларына [31-33]. Эмпирикалық жүзеге асырылу мен аналитикалық орнықтылық арасында тепе-теңдікке қол жеткізу үшін екі кезеңнен тұратын параметрлерді баптау рәсімі қолданылады. Бұл тәсіл таңдалған салмақ мәндерінің оңтайландыру тұғырында тиімді әрі тұрақты болып қалуын қамтамасыз етеді.

Эмпирикалық баптау: Бастапқы кезеңде әрбір салмақтау параметрінің әсері MATLAB/Simulink модельдеулері арқылы эмпирикалық түрде анықталды. Осы фазада λ_1 негізінен қадағалау дәлдігімен, λ_2 басқару энергиясымен, ал λ_3 желілік кідіріс пен пакеттердің жоғалу ықтималдығымен байланыстырылды. Әр параметрдің басқару контурының динамикалық сипаттамасына әсерін бақылау үшін олар бейсызық объект моделін пайдалана отырып, алдын ала берілген шектерде өзгертілді.

Аналитикалық оңтайландыру: Сезімталдықты талдау кезеңінде мақсаттық функцияның әрбір салмақтау параметрі бойынша градиенті келесідей түрде есептелді:

$$\frac{\partial J}{\partial \lambda_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.25)$$

$$\left| \frac{\partial J}{\partial \lambda_i} \right| < \varepsilon, \text{ Төмендегі шарт орындалса, Мұнда } \varepsilon \text{ шағын рұқсат етілген қате}$$

мәнін білдіреді (мысалы, 10^{-3}). Егер бұл шарт орындалса, сәйкес параметрдің әсері елеусіз деп қарастырылады және ол тұрақты шама ретінде алынуы мүмкін. Аналитикалық сезімталдық талдауы мақсаттық функция градиенттерінің шамаларын бағалау арқылы ең ықпалды параметрлерді анықтайды, бұл онлайн жұмыс кезінде салмақтау коэффициенттерін бейімдеп түзетуге мүмкіндік береді. Осы тетік басқару жүйесінің параметрлерін итерациялық оңтайландыру арқылы автоматты түрде нақтылауға жағдай жасайды, соның нәтижесінде модельдің тұрақтылығы да, жалпы басқару үдерісінің энергия тиімділігі де артады.

Осы бөлімде сымсыз желілік басқару жүйелерінде модельдік-болжамды басқару мен бірлескен жобалау тәсілін интеграциялау арқылы тұрақтылық пен энергия тиімділігін қамтамасыз ету мәселесі жан-жақты қарастырылды. Ең алдымен, желіде пайда болатын кідіріс τ_{net} және пакеттердің жоғалу ықтималдығы p_{loss} басқару сапасына тікелей әсер ететіні, сондықтан оларды МББ тұжырымдамасына енгізу қажеттілігі көрсетілді. Желі әсерін ескеретін инкременттік МББ моделі, Тоеплиц және жинақтаушы матрицалар, сондай-ақ кідірісті өтемдеуге арналған қосымша матрицалық құрылымдар арқылы болжам теңдеулері қатаң математикалық түрде тұжырымдалды.

Тұйықталған жүйенің асимптоталық тұрақтылығын дәлелдеу үшін Ляпунов функциясы енгізіліп, P , Q , R оң анық матрицаларына негізделген дискретті Ляпунов теңдеуі пайдаланылды. Бұл талаптар орындалған жағдайда, $k \rightarrow \infty$ кезінде x_k күйлік векторының нөлге ұмтылатындығы және басқару әрекеттерінің энергиясы шектелетіндігі көрсетілді. Сонымен қатар, жоспарланған басқару тұжырымдамасы арқылы үлгілеу жиіліктерін ϕ_i және жоспарлау басымдықтарын нақты уақыт режимінде бейімдеу механизмі ұсынылды; $\xi_i(\phi_i, H)$ арқылы сипатталатын болжамды қадағалау қатесі желі ресурстарын үлестірумен тікелей байланыстырылды.

МББ мен co-design стратегияларын біріктіру нәтижесінде қадағалау қатесін, басқару энергиясын, желілік кідіріс пен пакеттердің жоғалу ықтималдығын бір уақытта ескеретін біріктірілген мақсаттық функция жасалды. Бұл функция IEEE 802.15.4e TSCH, WirelessHART, ISA100.11a сияқты сымсыз стандарттар аясында да басқару сапасын арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Соңында, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ салмақтау коэффициенттерін баптаудың екі кезенді эмпирикалық және аналитикалық рәсімі ұсынылып, сезімталдық талдауы арқылы ең ықпалды параметрлерді анықтау және олардың әсері аз параметрлерді тұрақты деп қарастыру тәсілі негізделді. Осылайша, бөлімде ұсынылған тәсілдер сымсыз желілік басқару жүйелерінің тұрақтылығын, жинақталуын және энергия тиімділігін арттыруға бағытталған кешенді теориялық және практикалық негіз қалыптастырады.

3 Сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын технологиялық тұрғыдан талдау жасау

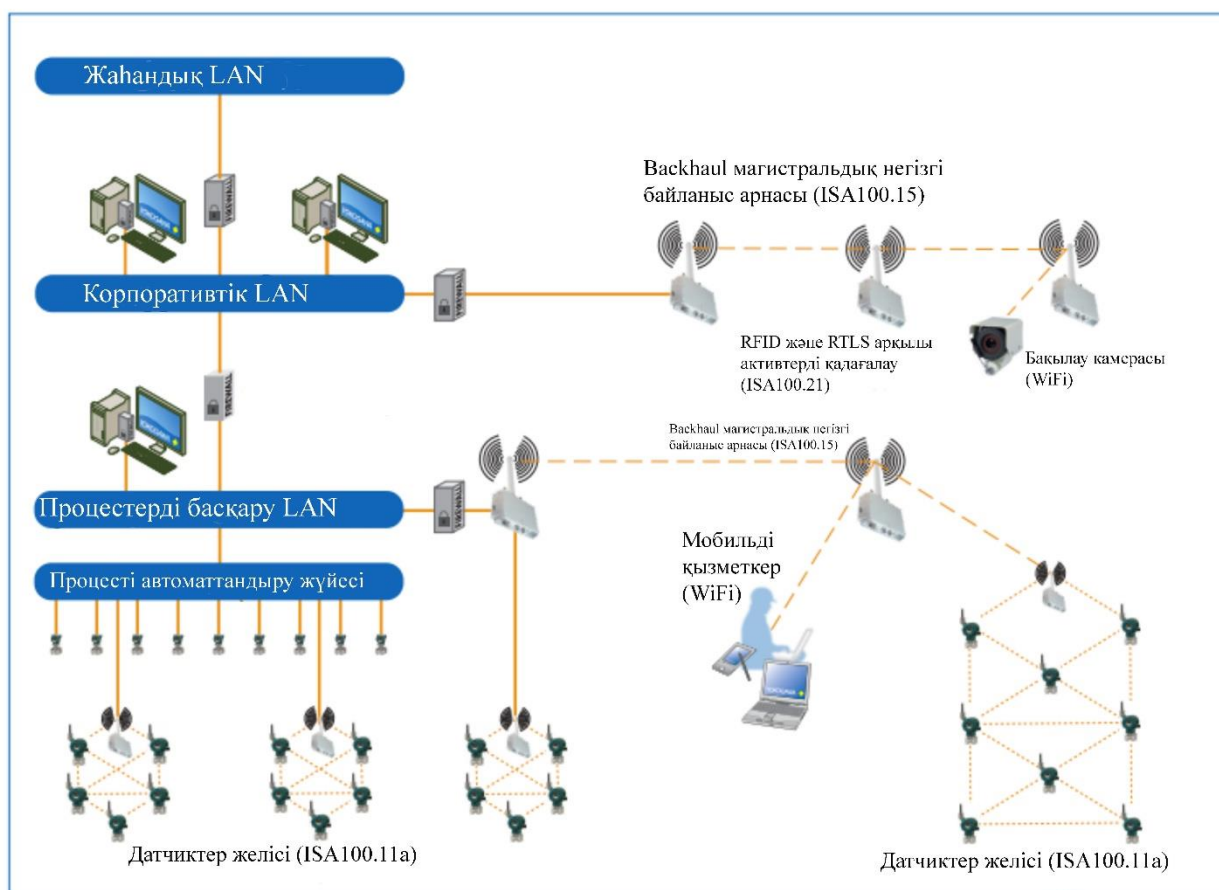
3.1 Автоматты басқару жүйесіндегі сымсыз байланыс архитектурасы

Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз байланыс архитектурасы көпдеңгейлі құрылымға негізделеді. Жоғарғы деңгейде Global LAN және Corporate LAN желілері орналасып, кәсіпорынның ақпараттық жүйелері мен серверлерін біріктіреді. Бұл деңгейлер, негізінен, сымды Ethernet технологиясына сүйеніп, өндіріс туралы жиналған мәліметтерді корпоративтік деңгейде өндеуге және талдауға мүмкіндік береді. Процестерді тікелей басқару үшін Process Control LAN және PAS (Process Automation System) деңгейлері қолданылады, оларда контроллерлер, операторлық станциялар және басқару серверлері шоғырланған.

Сымсыз бөліктің негізгі элементтері өндірістік алаңға жақын орналасады. Сенсорлар мен атқарушы механизмдерден тұратын сымсыз сенсорлық желі ISA100.11a стандартына негізделеді. Бұл желі технологиялық параметрлерді (қысым, температура, шығын және т.б.) үздіксіз өлшеп, мәліметті PAS жүйесіне сымсыз түрде жеткізеді. Өртүрлі сымсыз сегменттерден жиналған ақпарат backhaul арналар арқылы (ISA100.15 стандарты) негізгі желілерге беріледі. Активтерді қадағалау жүйелері (Asset Tracking) RFID және RTLS технологияларымен бірге ISA100.21 стандарты арқылы жүзеге асырылады.

Жүйеде қызметкерлердің мобильді қолжетімділігі мен бейнабақылау үшін Wi-Fi (IEEE 802.11) желісі қолданылады: мобильді операторлар планшет, ноутбук арқылы жүйеге қосылып, нақты уақыт режимінде деректерді ала алады, ал бақылау камералары бейнені сымсыз арнамен жібереді. Осылайша, автоматты басқару жүйесіндегі сымсыз байланыс архитектурасы ISA100.xx отбасындағы стандарттар мен Wi-Fi технологиясын үйлестіре отырып, өндірістік процестер туралы ақпаратты жинау, беру және өндеуді икемді әрі сенімді түрде қамтамасыз етеді [31].

Сымсыз СБЖ желілері, соның ішінде қалааралық кең жолақты кері тасымалдау және өткізу қабілеті жоғары бейне қолданбалары. 3.1-суретте көрсетілген типтік конфигурацияда көрсетілгендей, типтік зауыт ішінде іске асырылған кезде, осы аймақтардың әрқайсысы жаңа мүмкіндіктермен қатар пайда әкелуі мүмкін. Мысалы, сымсыз сенсорлық желілер арқылы зауыт пен технологиялық ақпараттың кез келген жерде қол жетімді болуы фактісі барлық зауытта таратылған таратылған бақылау және зауыт активтерін басқару артықшылықтарымен көбірек және жақсырақ ақпаратқа әкеледі.



3.1-сурет – Автоматты басқару жүйесіндегі сымсыз байланыс архитектурасы

Өнеркәсіптік автоматтандыру жүйесінде сымсыз байланыс бірнеше деңгейде әртүрлі стандарттарға сүйенеді. Жоғарғы деңгейлер Global LAN, Corporate LAN, Process Control LAN және PAS негізінен сымды Ethernet желілері арқылы жұмыс істейді, ал сымсыз технологиялар өндірістік алаңның шеткері тораптарында қолданылады. Backhaul тораптарында зауыт аумағындағы түрлі сымсыз сегменттерді негізгі желімен байланыстыру үшін ISA100.15 стандарты пайдаланылады. Активтерді қадағалау жүйелерінде (Asset Tracking) RFID және RTLS технологияларымен қатар, осы мақсатқа бейімделген ISA100.21 стандарты қолданылады. Бейнабақылау камералары мен мобильді қызметкерлерді (ноутбук, планшет, т.б.) қосу үшін Wi-Fi сымсыз желісі (IEEE 802.11) пайдаланылады. Ал өндірістік датчиктер мен атқарушы құрылғылардан тұратын сымсыз сенсорлық желілер Sensor network (ISA100.11a) стандартына негізделген. Осылайша, суретте ISA100.xx отбасындағы стандарттар мен Wi-Fi технологиясының өндірістік автоматтандыруда әр деңгейде қолданылу принципі көрсетілген.

Жоғарыда сипатталған барлық элементтердің ішінде сымсыз сенсорлық желілер қазіргі уақытта ең көп назар аударады, өйткені артықшылықтардың көпшілігі осы салаға тікелей қатысты. Сигнал мен қуат сымдарын жоюдың

артықшылықтарынан басқа, сымсыз сенсорлық желілер қол жеткізу қиын немесе сым құнын ақтауға болмайтын жерлерде өлшеу қолданбаларын ашады.

Жоғарыда сипатталған барлық элементтердің ішінде сымсыз сенсорлық желілер қазіргі уақытта ең көп назар аударады, өйткені артықшылықтардың көпшілігі осы салаға тікелей қатысты. Сигнал мен қуат сымдарын жоюдың артықшылықтарынан басқа, сымсыз сенсорлық желілер қол жеткізу қиын немесе сым құнын ақтауға болмайтын жерлерде өлшеу қолданбаларын ашады.



In open terrain, no obstacles; a range of >200m can be expected



In pipe lines, higher antenna position improves communication quality; a range of >50-100m can be expected



Nearby plant steelwork, no obstacles; a range of >50m can be expected



Inside infrastructure, inside plant steelwork; a range of <<50m can be expected

3.2-сурет – Өнеркәсіптік ортадағы сымсыз байланыстың әрекет ету қашықтығы

Бұл суретте сымсыз байланыстың жұмыс қашықтығы қоршаған ортаға қарай қалай өзгередіні көрсетілген. Ашық, кедергісіз жерлерде (шөлді немесе жазық аймақ) радиобайланыс 200 метрден артық қашықтықта сенімді жұмыс істей алады. Құбыр желілерінің маңында антеннаны биікке орналастыру арқылы байланыс сапасын жақсартуға болады, мұндай жағдайда шамамен 50–100 метр аралығында қашықтық күтіледі. Зауыт маңындағы металл конструкциялар көп аймақта, тікелей кедергілер болмаса да, тиімді қашықтық 50 метр шамасында ғана болады. Ал ғимарат ішіндегі күрделі инфрақұрылым мен болат құрылымдар арасында сымсыз сигналдың таралуы одан әрі қиындап, байланыс қашықтығы 50 метрден де азайып кетеді. Осылайша, сурет сымсыз жүйелерді жобалауда орта факторларын ескеру қаншалықты маңызды екенін бейнелейді.

Өнеркәсіптік автоматтандырудың сымсыз желілері үшін әмбебап стандартты әзірлеу кезінде бірқатар қиындықтар туындайды, себебі лицензиясыз сымсыз желілердің көпшілігі бірдей 2,4 ГГц өткізу қабілеттілігін пайдаланады және көптеген сенсорлық желілер IEEE 802.15.4 стандартына негізделген. Сенімділік пен кідіріс мәселелеріне әкелетін барлық байланыс

және кедергілер бірдей өткізу қабілеттілігін бөлісетін бірнеше протоколдар туралы алаңдаушылық бар екені анық. Пайдаланушылар кептеліс, саботаж және желі құпиялылығына қауіп төндіретін қауіпсіздікке қатысты алаңдаушылық тудырады. Сондай-ақ олар ашық және кері үйлесімді, өзара әрекеттесетін және іске асырылу үшін үнемді жүйелерді қалайды.

Өнеркәсіп сенсордан кеңес бөлмесіне дейінгі байланысты қамтитын, қауіпсіздікті ескере отырып жасалған және түпкілікті пайдаланушы басқаратын бір жаһандық стандартты құруға ұмтылуы керек. Өкінішке орай, бұл тамаша сценарийдің жақын болашақта орын алуы екіталай, өйткені қазіргі уақытта әртүрлі сала ойыншылары екі стандартты пайдаланады: WirelessHART және ISA100.11a. Екеуінің кейбір ортақ белгілері болғанымен, шын мәнінде олар мүлдем басқа. Атап айтқанда, ISA100.11a ауқымы әлдеқайда кең, өйткені WirelessHART HART қолдайтын далалық құралдардан бақылауға бағытталған болса, ISA100.11a далалық құралдардан басқару бөлмесінің интеграциясына дейін барлығын қамту мүмкіндігін ұсынады. Сонымен қатар, ол сымсыз технология FOUNDATION Fieldbus, Profibus, Modbus және басқалары, сондай-ақ HART сияқты әртүрлі протоколдармен үйлесімді және WirelessHART-пен шамамен 250-ге қарағанда желіде 1000-нан астам құрылғыға мүмкіндік береді.



3.2-сурет – Өндірістегі сымсыз өрістік желілердің өзара үйлесімді жұмысы

Қазіргі уақытта сымсыз сенсорлық желілерге арналған бірқатар өнімдерді әзірлеу және бағалау процесінде өзін-өзі қалпына келтіретін торлы желі конфигурацияларына, далалық жұмыс үшін ұзақ батареяның қызмет ету мерзіміне және қауіпсіздіктің жоғары дәрежесіне баса назар аударуда. Мұнай өңдеу зауыттары немесе химиялық зауыттар сияқты типтік орталарда 2,4 ГГц сымсыз таратудың сипаттамаларын анықтау үшін дала сынақтары жүргізілді. 2,4 ГГц радио кедергілердің болуына сезімтал (мысалы, құбырлар және басқа металл құрылымдар). Сымсыз желіге жергілікті климат немесе басқа сымсыз желілердің болуы көп әсер етпейді. Тор желі конфигурациясы (екіден көп

жолды қамтитын) желінің сенімділігі үшін маңызды. Жауап беру уақыты – радиотарату жағдайларының пайдалы көрсеткіші.

Осы тәжірибенің нәтижесінде «жалпы шешімдер» тәсілінің бастапқы кезеңі ретінде сымсыз негізделген далалық құралдар мен кіру нүктелерін дамытуды алға жылжытуда және қосалқы сенсорларды, сондай-ақ мобильді жұмысшылар желілерін біріктіру, бақылау камералары жүйелерін біріктіру және ұзаққа созылатын жоспараралық байланыстар сияқты аспектілерді жеңілдету үшін басқа ұйымдармен серіктестік орнатуда.

Жүргізілген сымсыз сенсордың дала сынақтарынан және мобильді жұмысшы желілерінің нақты жобаларын іске асырудан алынған сабақ кедергілер желінің сенімділігіне, демек, қызмет көрсету сапасына (QoS) әсер етуі мүмкін. Атап айтқанда, кіру нүктелері мен басқа құрылғылардың дұрыс орналасуын және қайталағыштарды қосудың ықтимал қажеттілігін алдын ала бағалау керек. Бұл роуминг маңызды болып табылатын мобильді жұмыс желісінің сәтті жұмыс істеуі үшін өте маңызды.

Сымсыз сенсорлық желілерді технологиялық индустрия біртіндеп қабылдайды деп күтілуде. ISA100.11a басқару қолданбаларын орналастыру үшін жасалғанымен, бастапқыда қолданбалардың көпшілігі батареяның қызмет ету мерзімінің шектеулеріне байланысты бақылауға арналған. Қолданыстағы қондырғыларда артықшылықтар анық. Қолданыстағы инфрақұрылым оларды сыйдыра алмаса, процесті бақылау және жағдайды бақылау үшін өлшемдерді қосуға болады. Ең заманауи жасыл алаң алаңдары негізінен Foundation fieldbus сияқты сымды аспаптық жүйелер арқылы қосылған интеллектуалды құралдармен жабдықталады деп күтілуде, сонымен бірге процесс пен жағдайды бақылау үшін бірнеше сымсыз желілер бар.

DCS және зауыт активтерін басқаруды қамтамасыз етудің негізгі элементі ретінде сымсыз сенсорлық желілермен жалпы шешімдерді енгізудің алға тәсілі ретінде дамып келе жатқан сымсыз технологияларға ұмтылады. Қазіргі таңда ашықтық, өзара әрекеттесу және сенімділік мәндері ISA100 стандартына негізделген жүйелермен қамтамасыз ету мақсаты маңызды.

3.2 Сымсыз өлшеу техникасындағы қиындықтары

Датчиктерден алынға ақпаратты тасымалдау үшін сымсыз жұмыс істейтін арналармен түйіндер керек, әдетте олардың қуат көзі де сым арқылы жалғанбайды. Демек, мұндай түйіндер деректерді өңдеу мен байланыс үшін жергілікті қуат көздеріне энергия жинағыштарға немесе борттық аккумуляторларға сүйенуі тиіс. Сенсор түйіндері көбінесе шағын өлшемді және қызмет ету мерзімі бірнеше жылға созылуы керек, сондықтан өте төмен қуат режимінде жұмыс істеуі қажет. Сымсыз байланыс тораптың қуат жұмсауының ең үлкен бөлігін құрайтындықтан, торап өте төмен қуатты жіберу режимін және радио модулін мезгілілмен ұйықтату тәртібін қолдануға мәжбүр болады. Мұндай төменқуатты радиожиілік байланысы әртүрлі

бұрмалау мен кедергі механизмдеріне өте сезімтал. Көпсәулемді шағылысулар сигналды бұрмалап, деректер жылдамдығын шектейді және әсіресе ғарыш кемесі сияқты жабық кеңістіктерде түйіндердің арнаға айқын қолжетімділігін жоғалтып, сигналдың толық әлсіреуіне әкелуі мүмкін. Басқа RF көздер сымсыз интернет, дауыс және деректер жүйелері сенсор түйіндерімен өткізу жолағы үшін бәсекелесе алады. Ақырында, электр жүйелерінен шығатын RF шу мен экипаж мүшелері сияқты қозғалыстағы нысандардан шағылған толқындар уақыт бойынша күшті өзгеріп отыратын, алдын ала болжауы қиын байланыс ортасын қалыптастырады.

Сымсыз жүйелер сымды жүйелерді алмастырған кезде, байланыс сенімділігі шешуші мәнге ие болады, сондықтан мұндай күрделі RF ортада ССБ бірқатар түрлі механизмдерге сүйеніп, сенімді жұмыс істеуі тиіс. Мысалы, ол арна сапасы мен қолжетімділігін үздіксіз бақылап, уақыт бойынша тез өзгертін бұл параметрлерді тиімді пайдалану үшін интеллектуалды арнаға қатынау механизмдерін қолдануы керек. Сонымен қатар, деректерді бастапқы түйіннен орталық деректер менеджеріне сенімді жеткізе алатын, қажет болған жағдайда бірнеше аралық түйіндер арқылы өтетін бірнеше түрлі маршруттарды пайдаланатын интеллектуалды бағыттау механизмі қажет. Соңында, желіні үлкейту немесе кішірейту үшін, яғни түйіндердің желіге қосылуы мен шығуын жеңілдетіп, соған сәйкес маршрутизация құрылымын өзгерте алатын қарапайым әрі сенімді құралдар болуы тиіс. Бұған қоса, аталған қызметтердің барлығын қамтамасыз ете отырып, ССБ түйіндері радиомодульді әрі деректерді беру, әрі желілік үйлестіру үшін барынша аз уақыт қолданатындай етіп жобалануы керек, сонда ғана олардың қызмет ету мерзімі жылдар бойы сақталады.

Мұндай беріктік пен сенімділікті жүйені жобалаудың бастапқы кезеңінде-ақ қамтамасыз ету аса күрделі міндет болып табылады және ол желілік стектің барлық деңгейінде: физикалық радионың схемотехникалық жобасынан бастап, арнаға қатынау сұлбалары, бағыттау протоколдары және үлестірілген деректерді өңдеу алгоритмдеріне дейін терең біліктілікті талап етеді. Бақытымызға орай, соңғы бірнеше жыл ішінде сымсыз өлшеу саласының әртүрлі бағыттарында жинақталған елеулі зерттеу жұмыстары ССБ стандарттарын әзірлеуге алып келді. бұл стандарттарды ғарыштық қолданбалар үшін тиімді пайдалануға болады. Енді біз осы стандартталған протоколдарға қысқаша шолу жасаймыз.

3.3 Сымсыз сенсорлық желі стандарттарына талдау жасау

Берік әрі сенімді сымсыз сенсор/атқарушы (sensor/actuator) желілері көптеген өнеркәсіп салалары үшін елеулі пайда әкеледі, сондықтан соңғы жылдары жоғарыда аталған мәселелердің көбін шешуге бағытталған ССБдерге арналған жобалау стандарттарын әзірлеуге көп күш жұмсалды. Бұл жұмыстардың өзегінде IEEE 802.15.4 стандарты жатыр, ол өлшеу, талдау және

басқару құрылғылары арасындағы сымсыз өзара байланыстарды қажет ететін төмен деректер жылдамдықты қолданбаларға арналған; мұндай құрылғылар жиынтығын жеке аймақтық желілер қатарына жатқызуға болады. Осылайша, 802.15.4 стандарты Bluetooth стандартымен (IEEE 802.15.1) бір жалпы отбасына жатады, бірақ көзделген қолданбалардың төмен қуатты және төмен деректер жылдамдықты болуы оны Bluetooth-тан ерекшелендіреді. 802.15.4 негізіндегі PAN желісін ашық жүйелердің өзара байланысу үлгісінің жеңілдетілген протокол стегі арқылы қарастыруға болады, ол (төменнен жоғары қарай) келесі қабаттардан тұрады: физикалық қабат (PHY), ортаға қолжетімділікті басқару қабаты, желілік қабат және қолданбалық қабат. IEEE 802.15.4 стандарты тек физикалық байланыс және MAC қабаттарын ғана анықтайды, ал қалған қабаттар ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a сияқты кейінгі протоколдар арқылы қамтамасыз етіледі.

802.15.4 стандартының физикалық қабат сипаттамасы радиоқұрылғылардың үш жиілік диапазонының бірінде жұмыс істеуін талап етеді: 868–868.8 МГц (Еуропа, бір арна), 902–928 МГц (Солтүстік Америка, 30 арна) және 2400–2483.5 МГц (дүниежүзілік, 16 арна). 2003 жылғы бастапқы стандартта және 2006 мен 2007 жылдардағы жаңартуларда модуляцияның бірнеше түріне рұқсат етіледі, бірақ олардың ішінде ең көп қолданылатындары – тура тізбекті кең жолақты модуляцияның (direct sequence spread spectrum) әртүрлі нұсқалары.

Арнаға қолжетімділікті реттеу үшін 802.15.4 MAC деңгейі тасушы-сигналды сезіну және қақтығыстардан қашу негізіндегі көпқолданушы қолжетімділік сұлбасын (carrier sense multiple access with collision avoidance, CSMA-CA) сипаттайды. Яғни, деректер кадрын жібергісі келген құрылғы алдымен арнаны «тыңдайды», егер онда белсенділік байқалмаса, өз деректерін жібере бастайды. Егер құрылғы арнаның қазірдің өзінде пайдаланылып жатқанын анықтаса, ол кездейсоқ уақыт аралығына кідіріп, содан кейін арнаны қайта тексереді; байқағанына қарай не деректерді жібереді, не тағы да кездейсоқ уақытқа кідіреді. Әдетте бір кадрды шексіз күтіп қалмас үшін, әрекет жасауға рұқсат етілетін талпыныстар санына белгілі бір шектеу қойылады [32].

Стандартталған СБЖ желілік стектері 802.15.4 ұсынатын РНУ және MAC қабаттарының үстіне құрылады, бұл екі қабатты өзгеріссіз немесе белгілі бір модификациялармен қабылдайды. Енді біз осы негізде құрылған ең танымал үш нұсқаны, ZigBee-ден бастап, қарастырамыз.

ZigBee туралы бөлік.

ZigBee 802.15.4 стандартының физикалық деңгейі мен ортаға қол жеткізуді басқару деңгейінің дәл үстінде жұмыс істейтіндей етіп жобаланған протокол, яғни ол толық протокол стегін алу үшін желілік деңгей мен қолданбалық деңгейді қамтамасыз етеді. Барлық 802.15.4 стандартына негізделген жүйелердегідей, ZigBee де аз қуат тұтынатын, деректер жылдамдығы төмен қолданбаларға арналған. ZigBee протоколы бүгінгі күнге

дейін бірнеше нұсқадан өтті, олардың ең жаңасы ZigBee 2007 спецификациясы. ZigBee 2007 екі түрлі протокол стегін анықтайды.

Біріншісі жай ғана «ZigBee» деп аталады және бұрынғы біртекті ZigBee нұсқаларына өте ұқсас. Ол үй және кеңсе жағдайында жеңіл жүктемелі қолданбаларға (мысалы, үйдегі жарықты басқару) арналған. Екіншісі «ZigBee PRO» деп аталады, бұл өнеркәсіптік басқару қолданбалары үшін жасалған, неғұрлым берік протокол. Ол сенімдірек жұмыс істеуді қамтамасыз етеді, бірақ сонымен бірге көлемдірек әрі күрделірек протокол стегін жүзеге асыруды талап етеді [33].

ZigBee құрылғылардың үш класын анықтайды: ZigBee координаторлары, ZigBee маршрутизаторлары және ZigBee соңғы құрылғылары. Әрбір желіде бір координатор болады, ол желіні құруға жауап береді және хабарларды бағыттауға (маршрутизациялауға) да көмектесе алады. Маршрутизаторлар да хабарларды бағыттауға қатысады және сонымен қатар өлшеу мен атқару функцияларын орындайтын қолданбаларды іске қоса алады. Соңғы құрылғылар тек қолданбаларды іске қосады және хабар маршрутизациясына қатыса алмайды әрбір соңғы құрылғы өз деректерін не маршрутизаторға, не координаторға жіберуі тиіс [34].

ZigBee 802.15.4 стандартының физикалық деңгейі мен ортаға қол жеткізуді басқару деңгейін тікелей пайдаланады, дегенмен 2007 жылғы нұсқада физикалық деңгейде жиілікті шектеулі түрде өзгертуге мүмкіндік қарастырылған. Бұл мүмкіндік арқылы байланыс арнасының өткізу қабілеті нашарлаған кезде радиоқұрылғыны «мәселелі» арналардан автоматты түрде басқа арналарға ауыстыруға болады. Желілік деңгейге қатысты алғанда, ZigBee координаторлары да, ZigBee маршрутизаторлары да хабарларды бірнеше түйін арқылы жеткізетін көпсекциялы маршрутизацияға қатысады; ZigBee соңғы құрылғылары хабарларды тек өздерінің радио қамту аймағында орналасқан, өздеріне тиесілі ата-ана маршрутизатор құрылғысына ғана жібереді.

Осы құрылғы рөлдерінің арқасында ZigBee желісі үш түрлі топологияның біріне ие бола алады:

1 Жұлдызша (star) – мұнда координатор емес барлық құрылғылар деректерді тікелей координаторға жібереді;

2 Ағаш (tree) – мұнда барлық соңғы құрылғылар бір маршрутизаторға бағынады, ал маршрутизаторлар жақсы анықталған иерархия бойынша координаторға дейін жоғары және төмен бағытта бір-бірімен байланысады;

3 Тор (mesh) – мұнда соңғы құрылғылар да, маршрутизаторлар да радио қамту аймағында тұрған кез келген басқа маршрутизатормен еркін түрде байланыса алады.

802.15.4 стандарты берген шектеулі кезекші режим (duty cycling) мүмкіндігін пайдаланатын желілерде соңғы құрылғыларға мезгіл-мезгіл төмен қуатты ұйқы режиміне ауысуға рұқсат етілгенімен, жалпы жағдайда маршрутизатор құрылғылар үнемі «оянған» күйде болуы тиіс.

Маршрутизаторлар үшін кезекші режимді шектеулі қолдану мүмкіндігі 802.15.4 стандартының «маяқтық режим» механизмі арқылы іске асады, ол түйіндер арасында шамамен синхрондауды орнатуға тырысады. Алайда арзан ZigBee аппараттық құралдарының дәл уақытты ұстап тұра алмауына байланысты ұйқы және ояну циклдерінің периоды қатты шектеледі. Жалпы алғанда, маяқтық режим соңғы құрылғылардың да ұйқыдан жиірек оянып тұруын талап етеді [4–6].

ZigBee үй және кеңсе сегменттерінде өз нарығын тапқанымен, бұл протокол өнеркәсіптік процестерді өлшеу және басқару саласында, тіпті ZigBee PRO-ның берік нұсқасы түрінде де, кең қолданысқа толық ие бола қойған жоқ. Зерттеулер көрсеткендей, тек бәсекелестікке негізделген арнаға қол жеткізу механизмі критикалық өнеркәсіптік қолданбалар талап ететін сенімді хабар жеткізуді қамтамасыз ете алмайды.

802.15.4 стандартына негізделген сенсорлық түйіндер ортақ «өнеркәсіптік, ғылыми және медициналық мақсаттағы» радиожиілік диапазонын пайдаланады, сондықтан олар сәуле шығару қуаты жоғарырақ болатын IEEE 802.11 (Wi-Fi) және Bluetooth сияқты түрлі протоколдардың берілімдерін байқауы мүмкін. Осындай трафик жағдайында 802.15.4 негізіндегі арнаға қол жеткізу механизмі үнемі «шегініп», жол береді, соның салдарынан түйіндерге уақыт бойынша аса маңызды хабарларды жіберу үшін арнаға дер кезінде қол жеткізу мүмкіндігі жетіспеуі ықтимал. Бұл жағдай сигналдың көпсәулелі шағылысуы айқын байқалатын ортада одан әрі күшейеді [35].

Нәтижесінде өте қиын радиожиілік жағдайларында сенсорларды жоғары сенімді сымсыз желіге біріктіруге арналған екі стандарт пайда болды.

WirelessHART туралы бөлік.

Біріншісі WirelessHART, ол өнеркәсіптік автоматтандыруда көп жылдан бері қолданылып келе жатқан далалық құрылғылармен өзара байланысқа арналған HART байланыс протоколы спецификациясында анықталған. Бұл протоколдың 7-нұсқасы бұрын тек сымды байланыспен шектелген HART жүйесіне 802.15.4 стандартының физикалық деңгейіне негізделген сымсыз деректерді жеткізу механизмін қосады.

WirelessHART ең басынан бастап өте қатал өнеркәсіптік ортада сымсыз өлшеу мен атқаруды қамтамасыз ету үшін жобаланған, мұнда сымсыз желі арқылы байланыс сенімділігі сымды байланысқа барынша жақын болуы тиіс. Сонымен қатар сымсыз құрылғылар сымды құрылғыларды орналастыру қиын болатын жерлерге орнатылады деп есептеледі, сондықтан WirelessHART құрылғылары бір батарея жинағымен ұзақ уақыт жұмыс істей алуы қажет.

WirelessHART 802.15.4 стандартының физикалық деңгейін өзгертусіз қолданады. Ол 2,4 ГГц жиілік диапазонында жұмыс істейді және тура тізбекті кең жолақты спектрлік кодтауды пайдаланады. Алайда 802.15.4 стандартының ортаға қол жеткізуді басқару деңгейімен салыстырғанда WirelessHART спецификациясында елеулі айырмашылық бар. WirelessHART жүйесіндегі

арнаға қол жеткізуді басқару деңгейі бастапқыда Dust фирмасы әзірлеген «уақыт бойынша синхрондалған торлы протоколға» негізделген.

Dust Networks компаниясы жасаған бұл жүйе 802.15.4 стандартының ортаға қол жеткізуді басқару деңгейінде қолданылатын тасушы-сигналды сезіну мен кездейсоқ кідіріс арқылы шегінуге негізделген тәсілдің орнына, арнаны уақыт бойынша бөлуге негізделген мультиплекстеу әдісін қолданады. Ортаға қол жеткізуді басқарудың мұндай балама сұлбасын қолдануға өнеркәсіптік жағдайларда сымсыз сенсорлық желілерге тән болатын аса қолайсыз радиожиілік ортасы түрткі болды.

Өнеркәсіптік нысандарда сымсыз желілер басқа сымсыз жүйелерден (мысалы, Wi-Fi желілері мен сымсыз телефондардан) келетін радиожиілік кедергілерінен, механизмдерден шығатын радиожиілік шуынан, құрылғылар арасындағы радиобағыттардың физикалық бөгуінен, таратқыштар мен қабылдағыштар арасындағы көпсәулелі шағылысу құбылыстарынан, сондай-ақ батареяның түгел босап қалуы мен агрессивті қоршаған орта жағдайлары салдарынан түйіндердің істен шығуынан зардап шегуі әбден мүмкін. Бұған қоса, мұндай әсерлер уақыт бойынша қатты өзгеріп тұрады, сондықтан желіні тек орнату сәтіндегі жағдайларға қарап мұқият калибрлеу арқылы ғана «реттеп қоюға» негізделген тәсілді қолдануға мүмкіндік бермейді. Осындай өзгермелі сыртқы жағдайларға бейімделіп жұмыс істей алатын, берік те икемді жүйе жобалануы тиіс [35].

WirelessHART желісіндегі ортаға қол жеткізу деңгейінің (MAC) негізінде 802.15.4 жүйесіндегі «тасушы-сигналды сезіну және қақтығыстардан қашу» тәсілінің орнына, арнаны уақыт бойынша бөлуге негізделген көпқолданушылық әдісі (time division multiple access, TDMA) жатады. Бұл ең алдымен түйіндер арасында уақыт бойынша синхрондауды талап етеді, ол хабарды сәтті қабылдауды растау үшін жіберілетін растау пакеттерінің ішіне уақыттық ығысу туралы ақпаратты енгізу арқылы ұсталып тұрады. Осы қызметті растау пакеттерімен «қоса жіберу» уақыт бойынша синхрондауды 802.15.4 жүйесіндегі сияқты қымбат «маяқтық режимге» сүйенбей-ақ жүзеге асыруға мүмкіндік береді, яғни уақыт бойынша синхрондалған торлы протокол (TSMP) қосымша маяктарды қажет етпейді.

Екі түйін синхрондалғаннан кейін олар үшін байланыс кестесін жасауға болады. Уақыт ұяшықтарға бөлінеді, ал дұрыс синхрондау түйін жұбына әр ұяшықтың басталу сәті жөнінде келісуге мүмкіндік береді [9]. Одан кейін түйіндер 2,4 ГГц жиілік диапазонында қолжетімді 16 жиілік ішкіжолағының қайсысын пайдаланатынын шешуі керек. Ол үшін олар арналар тізбегіндегі бастапқы арнаны келісіп алады. Осы келісілген арнадан бастап, әрбір жаңа уақыт ұяшығында түйін жұбы тізбектегі келесі арнаға ауысып отырады. Егер екі түйін белгілі бір уақыт ұяшығында сапасы өте нашар арнада байланыс орната алмайтын болса, олар жай ғана бір ұяшықтық уақыт күтіп, келесі ұяшықта басқа арнада байланысуға тағы бір мүмкіндік алады. Қайталап нашар нәтижелер көрсететін арналарды «қара тізімге» енгізу қарастырылған, сонда

бұл арналар арналар тізбегін кезең-кезеңімен ауыстыру кезінде өткізіліп жіберіледі [37].

Уақыт бойынша синхрондалған торлы протоколда әрбір қабылдаушы түйін хабарды сәтті қабылдағаннан кейін жіберушіге растау хабарын (ACK) қайта жібереді. Егер жіберуші түйін растау хабарын ала алмаса, ол өз «ата-ана» тізіміндегі көрші балама түйінге ауысып, жіберуді қайтадан орындап көруі мүмкін. Бұл «ата-ана тізімі» берілген мақсатты түйінге қарай келесі секцияда тұрған қолайлы көршілерді тіркейді және жіберуші түйін алғаш рет желіге қосылған кезде қалыптастырылады. Жіберуші түйіннің «ата-ана тізіміндегі» әрбір ата-ананың жазбасына осы ата-ананың «бала тізімінде» жіберуші түйіннің сәйкес жазбасы жауап береді. Альтернативті ата-анатүйіндер кеңістікте әртүрлі нүктелерде орналасқандықтан, бұл кеңістіктік әртүрлілікті қамтамасыз етеді. Бұдан басқа, балама ата-анаға қайталап жіберу әрекеті кейінгі уақыт ұяшығында және басқа жиілікте орындалатындықтан, сұлба уақыт бойынша және жиілік бойынша әртүрлілікті де қамтиды. Ақырында, физикалық деңгейдегі тура тізбекті кең жолақты спектрлік кодтау (direct sequence spread spectrum) арналық кодтардың әртүрлілігін қосады, соның нәтижесінде жүйе қиын сымсыз ортада жұмыс істеуге бейімделгіштігі жоғары, әртүрлілігі мол жүйеге айналады [38].

Шын мәнінде, жақсы жобаланған WirelessHART желісінде деректерді жеткізу сенімділігі әдетте үш сигма деңгейінен (шамамен 99,7300204%) жоғары, ал қалыпты жағдайларда алты сигма деңгейінен (шамамен 99,9999998%) де жоғары болады [8]. WirelessHART желісіндегі барлық түйіндер бірнеше секция арқылы өтетін трафикті бағыттай алатын толық функционалды құрылғылар болып табылады. Сондықтан кез келген WirelessHART желісі толық тор типті желі топологиясын түзейді. Сонымен бірге, әрбір түйін маршрутизатор болып саналса да, уақыт бойынша жұмыс үлесін өте аз етуге мүмкіндік беретін (уақыттың 1%-дан да аз бөлігінде ғана толық қуатта жұмыс істейтін) агрессивті кезекші режимнің арқасында олардың барлығын да батарея арқылы тиімді қоректендіруге болады. Уақыт бойынша синхрондау түйіндер «оянып», радиомодульдерін іске қосқан кезде олардың бәрі мұны бір мезетте орындайтынын қамтамасыз ететіндіктен, тіпті маршрутизатор-түйіндердің өзін де мезгіл-мезгіл төмен қуатты «ұйқы» күйіне ауыстырып, радиосын сөндіріп қоюға болады.

Маршрутизацияға арналған граф құрылымындағы кестелер орталық желі менеджері арқылы есептеледі және маршрутизация жолында тұрған түйіндерге таратылады, осылайша әр түйін қажетті мақсатты түйінге апаратын жолда қай көршілерінің «келесі секциядағы ата-ана» рөлін атқаратынын біледі. Әрбір түйінде қолжетімді ата-анатүйіндер саны маршруттың қаншалықты маңызды екеніне қарай өзгертілуі мүмкін.

Соңында, WirelessHART өнеркәсіптік далалық құрылғыларға арналған HART байланыс протоколына сәйкес келетін қолданбалық деңгейдегі хабарларды қолдайды. Алайда WirelessHART-ты ғарыштық ұшу (spaceflight) қолданбаларына бейімдеген жағдайда бұл қабатты елемеуге де болады, яғни

WirelessHART пакеттерінің пайдалы жүгін (payload) қолданба деректері үшін арналған жай ғана буфер ретінде қарастыруға мүмкіндік бар.

WirelessHART өнеркәсіптік автоматтандыру саласындағы нарыққа шыққан алғашқы стандарт болды, бірақ ол енгізілгеннен кейін ISA ұйымында тек HART құрылғыларынан тұратын желілермен ғана шектелмейтін, зауыттық басқару желілерінің кеңірек класына жарайтын стандарт әзірлеу жұмысы басталды. ISA100 сымсыз жұмыс тобы шығарған алғашқы стандарт – ISA100.11a, ол қолданбалық деңгейде әртүрлі «ескі» (legacy) құрылғылардың байланыс протоколдарымен бірге қолдануға болатын сымсыз «арқаулық» (backend) инфрақұрылымды ұсынады. ISA100.11a стандарты ISA100 шеңберінде бекітудің соңғы сатысында тұр және оны 2009 жылдың соңында немесе 2010 жылдың басында шығару жоспарланған.

ISA100.11a стандарты WirelessHART-пен көптеген ортақ қырларға ие, соның ішінде Dust Networks компаниясының уақыт бойынша синхрондалған торлы протоколына (Time-Synchronized Mesh Protocol, TSMP) негізделген TDMA-типті (арнаны уақыт бойынша бөлуге негізделген) ортаға қол жеткізу сұлбасын пайдаланады; шын мәнінде WirelessHART-та бар көптеген мүмкіндіктер ISA100.11a стандартына да енгізілген. Дегенмен ISA протоколы өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер үшін баптау мен тандаудың мүмкіндік ауқымын кеңейтуге бағытталған. Ол 802.15.4/ZigBee бастапқы спецификациясына ұқсас, тасушы-сигналды сезіну және қақтығыстардан қашу принципіне (CSMA-CA) негізделген ортаға қол жеткізу нұсқасын да, WirelessHART-тағыдай TDMA-типті ортаға қол жеткізу нұсқасын да қарастырады, бұл қажет болған жағдайда жоғарырақ өткізу қабілетіне қол жеткізуге мүмкіндік береді. CSMA-CA негізіндегі бұл нұсқа күрделі радиожіілік жағдайларында ZigBee сияқты қиындықтарға тап болатын болса да, «достық» ортада сенсорлық түйіндер үшін үлкенірек өткізу жолағын қамтамасыз ете алады. Осылайша, сенімділік пен өткізу қабілетінің арасында теңгерім жасау мүмкін болады: қатаң жағдайларда сенімділікті арттыру үшін өткізу қабілетін азайтуға немесе қолайлырақ ортада төмен қуатты сымсыз желі үшін жоғары өткізу қабілетіне қол жеткізуге болады.

Сонымен қатар, ISA100.11a маршрутизация жасамайтын, қарапайымрақ классқа жататын құрылғыларды да қолдайды, ал WirelessHART желісінде барлық құрылғылар желілік трафикті бағыттай алатын болуы тиіс. Мұндай шектеу желідегі балама маршруттар санын азайтатынына қарамастан, жобалаушыларға құрылғы құнын маршрутизациядағы артық қорғаныс деңгейіне (redundancy) айырбастауға мүмкіндік береді. Екі протокол арасында қауіпсіздік мәселелері, сымды зауыттық магистральдық желілерді қолдану, пакеттерді фрагментациялау және қайта құрастыру (бұл мүмкіндік ISA100.11a стандартына енгізілген, бірақ WirelessHART-та жоқ) сияқты бірқатар өзге де айырмашылықтар бар.

Осы екі дамыған өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желі протоколдарының қатар өмір сүруі (co-existence) ықтимал сценарий ретінде қарастырылуда. ISA100 аясындағы жұмыс тобы стандарттарды біріктіру

мүмкіндігін зерттеп келеді және бұл ұзақ мерзімді перспективада әлі де ықтимал. Жақын уақыт ішінде олардың қатар өмір сүруінің аралық шешімі ретінде екі түрлі стекті жүктей алатын құрылғылар пайдаланылуы мүмкін: түйіндер пайдалануға беру кезінде оларға берілген баптауға сәйкес не ISA100.11a стекін, не WirelessHART стекін жүктей алатын болады, ал екі протоколға ортақ код блоктары олардың іске асырылуында бірге қолданылуы мүмкін.

3.4 Сымсыз байланыс протокалдына тәжірибелік зерттеу

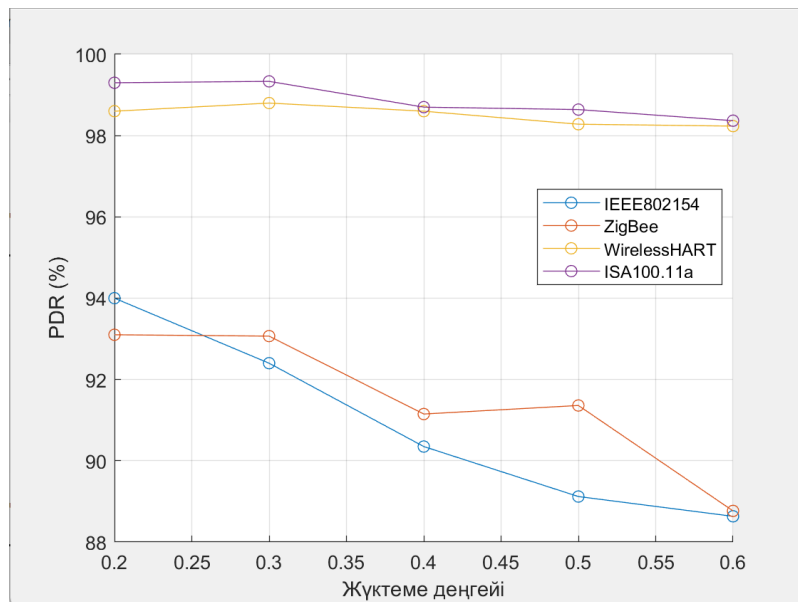
Сымсыз сенсорлық желілердің өнімділігін бағалау үшін тек теориялық талдау жеткіліксіз, себебі нақты арналық орта мен деректер алмасу динамикасы күрделі және стохастикалық сипатта болады. Сондықтан бұл зерттеу жұмысы модельдеу ортасын MATLAB платформаларын біріктіріп пайдалануға негізделген.

Зерттеу барысында әр желі 50 сенсор түйінінен тұрды, деректер жіберу периоды 1 секунд, ал байланыс радиусы 50 метр деп алынды. Желідегі жүктеме деңгейі мен арна кедергілері 20 %-дан 60 %-ға дейін өзгертіліп, әрбір сценарий үшін жеке есептеу жүргізілді. Бұл тәсіл әртүрлі жүктеме мен арналық жағдайларда әр хаттаманың сенімділігін, кідірісін және энергия тиімділігін салыстырмалы түрде бағалауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, WirelessHART және ISA100.11a хаттамалары үшін уақыт бойынша көптік қатынау және арналық секіру технологияларының әсері ескерілді. Ал IEEE 802.15.4 және ZigBee хаттамалары үшін сигнал арнасын тыңдау арқылы блоктанудан сақтану әдісі механизмі негізінде арнаға қатынау үлгісі пайдаланылды. Осылайша, модельдеу нәтижелері әр хаттаманың нақты қолдану аймағына (өнеркәсіптік, тұрмыстық немесе энергия тиімді) сәйкестігін анықтауға мүмкіндік береді.

Сымсыз сенсорлық байланыс хаттамаларының сенімділігін бағалаудың негізгі көрсеткіштерінің бірі пакеттердің жеткізілу коэффициенті, яғни жіберілген пакеттердің сәтті қабылданғандарына пайыздық қатынасы.

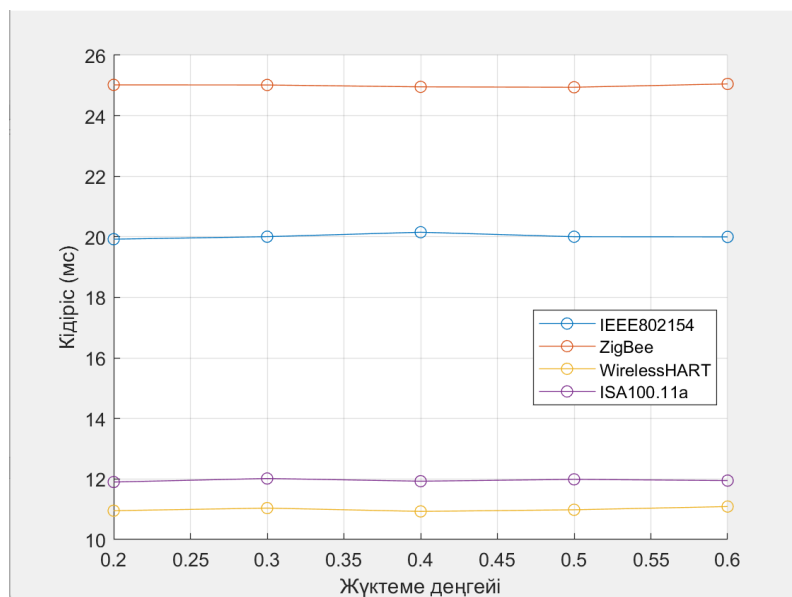
Бұл көрсеткіш желіде деректердің жоғалусыз жеткізілу дәрежесін сипаттайды және арналық соқтығыстарға, интерференция деңгейіне, сондай-ақ қолданылатын қатынау әдісіне уақыттық интервал технологиясын тікелей тәуелді.



3.3-сурет – Өртүрлі жүктеме деңгейінде пакеттердің жеткізілу коэффициенті көрсеткішінің өзгеруі

Модельдеу нәтижелері бойынша әрбір протокол үшін пакеттердің жеткізілу коэффициенті мәні желідегі жүктеме деңгейі артқан сайын төмендейтіні байқалды. Бұл құбылыс әсіресе сигнал арнасын тыңдау арқылы болоктанудан сақтану принципі бойынша жұмыс істейтін IEEE 802.15.4 және ZigBee хаттамаларында айқын көрінді, себебі жоғары жүктемеде арнаға бір мезгілде қатынауға тырысқан түйіндер саны көбейіп, соқтығыстар мен қайта жіберулер жиілейді. Ал WirelessHART және ISA100.11a хаттамаларында TDMA және Channel Hopping технологияларының арқасында пакеттердің жоғалуы айтарлықтай азайды, сондықтан пакеттердің жеткізілу коэффициенті шамасы жоғары деңгейде сақталды.

Сымсыз сенсорлық желілердегі маңызды өнімділік көрсеткіштерінің бірі орташа кідіріс. Бұл параметр деректер пакеттерінің сенсор түйінінен орталық қабылдағышқа дейінгі орташа өту уақытымен анықталады және желідегі арналық жүктемеге, қатынау әдісіне (уақыттық интервал технологиясын немесе сигнал арнасын тыңдау арқылы болоктанудан сақтану әдісі), сондай-ақ қайта жіберу механизмдеріне тікелей тәуелді.



3.4-сурет – Өртүрлі сымсыз байланыс сенсорлар хаттамалары бойынша орташа кідіріс көрсеткіштері

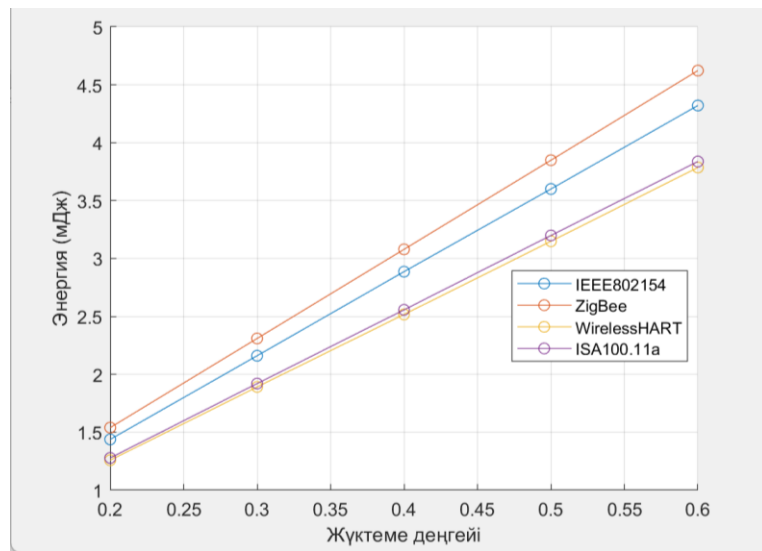
3.4 - суретте көрсетілгендей, жүктеме деңгейі артқан сайын кідіріс көрсеткіштері айтарлықтай өзгеріске ұшырамағанымен, әр хаттама арасында айқын айырмашылық байқалады.

IEEE 802.15.4 және ZigBee хаттамалары сигнал арнасын тыңдау арқылы болоктанудан сақтану әдісі қатынау алгоритмдерін қолданғандықтан, арнаны босатуды күту және соқтығыстан кейінгі қайта жіберу уақыттары кідірістің жоғарылауына себеп болды. Орташа алғанда, ZigBee протоколында кідіріс 25 мс, ал IEEE 802.15.4 хаттамасында шамамен 20 мс деңгейінде тұрақтады.

Керісінше, WirelessHART және ISA100.11a хаттамалары уақыттық интервал технологиясын және арна секіру технологияларын қолданғандықтан, уақыттық синхронизация арқылы кідіріс мәнін тұрақты түрде төмен деңгейде ұстай алды. WirelessHART протоколында кідіріс шамамен 11 мс, ал ISA100.11a хаттамасында 10-11 мс аралығында сақталды.

Бұл нәтижелер уақыттық интервал технологиясын негізіндегі хаттамалардың нақты уақыттағы өнеркәсіптік процестерге әлдеқайда қолайлы екенін дәлелдейді, себебі олар жүктеме артқан жағдайда да кідірісті тұрақты және төмен деңгейде сақтайды.

Сымсыз сенсорлық желілердің тиімділігін бағалаудағы маңызды көрсеткіштердің бірі энергия тұтыну. Сенсор түйіндерінің көпшілігі аккумуляторлық немесе энергиямен шектеулі көздермен жұмыс істейтіндіктен, желі өміршеңдігі мен ұзақмерзімді тұрақтылығы осы параметрге тікелей тәуелді. Жүктеме деңгейі артқан сайын деректерді жіберу жиілігі мен арна белсенділігі көбейіп, нәтижесінде энергия тұтыну шамасы да артады. Модельдеу нәтижелері әр түрлі хаттамалардағы энергия тиімділігінің айырмашылығын айқын көрсетеді.



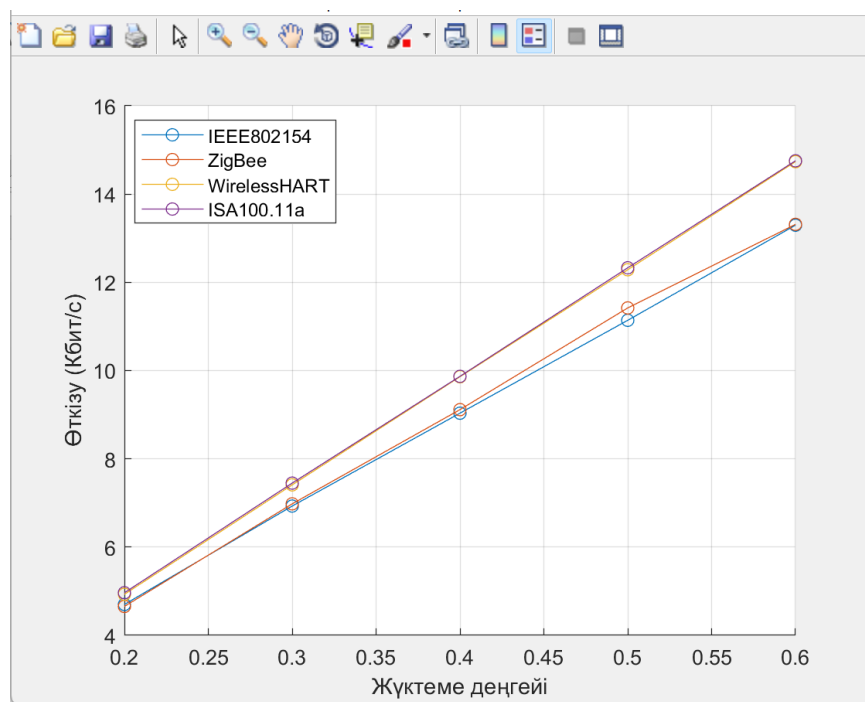
3.5-сурет – Әртүрлі сымсыз сенсорлық хаттамалар бойынша энергия тұтыну көрсеткіштері

3.5-суретте көрсетілгендей, барлық хаттамалар үшін энергия тұтыну жүктеме деңгейі өскен сайын біртіндеп артады. Бұл үрдіс түйіндердің жиі хабарлама жіберуінен және арна ресурстарын ұзақ уақыт пайдалануынан туындайды.

WirelessHART және ISA100.11a хаттамалары энергияны үнемдірек пайдаланды. Бұл олардың уақыттық интервал технологиясын кестелеу әдісі арқылы уақыттық синхронизацияны қамтамасыз етуі және арналық секіру кезінде қажетсіз тыңдау кезеңдерін азайтуымен түсіндіріледі. Жүктеме 0.6 болған жағдайда олардың энергия тұтынуы шамамен 4.0 мДж деңгейінде қалып, басқа хаттамаларға қарағанда 10-15% үнемді нәтиже көрсетті. Осылайша, уақыттық интервал технологиясын негізіндегі WirelessHART және ISA100.11a хаттамалары өнеркәсіптік жүйелерде сенімділікті сақтай отырып, энергия ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Ал ZigBee және IEEE 802.15.4 протоколдары төмен қуатты тұрмыстық және экологиялық мониторинг жүйелеріне көбірек бейім.

Сымсыз сенсорлық желілердің өнімділігін бағалауда тағы бір маңызды көрсеткіш өткізу қабілеті. Бұл параметр уақыт бірлігінде желі арқылы табысты жеткізілген деректер көлемін көрсетеді және жүйенің жалпы өткізу мүмкіндігін сипаттайды.

Жүктеме деңгейі артқан сайын желіге келіп түсетін пакеттер саны да көбейеді, нәтижесінде арна толығырақ пайдаланылады. Алайда арнаның тиімді пайдаланылуы қолданылатын қатынау әдісіне (уақыттық интервал технологиясын немесе сигнал арнасын тыңдау арқылы болоктанудан сақтану әдісі) және арналық соқтығыстардың жиілігіне байланысты өзгереді.



3.6-сурет – Өртүрлі сымсыз сенсорлық хаттамалар бойынша өткізу қабілетінің салыстырмалы нәтижелері

3.6-суреттен көрініп тұрғандай, барлық хаттамалар үшін жүктеме деңгейі артқан сайын өткізу қабілеті біртіндеп өседі. Бұл үрдіс түйіндердің көбірек деректер жіберуінен және желіде тасымалданатын ақпарат көлемінің артуынан туындайды.

Осы тәжірибелік зерттеу жұмысында MATLAB модельдеу ортасында 50 сенсор түйінінен тұратын сымсыз сенсорлық желі қарастырылып, деректер жіберу периоды 1 с және байланыс радиусы 50 м шарттарында IEEE 802.15.4, ZigBee, WirelessHART және ISA100.11a хаттамаларының өнімділігі салыстырмалы түрде бағаланды. Жүктеме деңгейі мен арна кедергілері 20%-дан 60%-ға дейін өзгертіліп, әр сценарий бойынша сенімділік, кідіріс, энергия тұтыну және өткізу қабілеті көрсеткіштері есептелді.

Нәтижелер бойынша жүктеме артқан сайын барлық хаттамаларда пакеттердің жеткізілу коэффициенті төмендейтіні анықталды. Бұл әсіресе CSMA/CA принципіне негізделген IEEE 802.15.4 және ZigBee үшін айқын байқалды, себебі жоғары жүктемеде соқтығыстар мен қайта жіберулер жиілеп, пакет жоғалту өседі. Ал WirelessHART және ISA100.11a хаттамалары TDMA және Channel Hopping технологиялары арқылы арнаны жоспарлы бөліп, интерференция әсерін азайтатындықтан, жеткізілу коэффициентін жоғары деңгейде сақтай алды.

Орташа кідіріс тұрғысынан WirelessHART (~11 мс) және ISA100.11a (10–11 мс) тұрақты және төмен нәтиже көрсетті, яғни нақты уақыт талап етілетін өнеркәсіптік процестерге тиімді екені дәлелденді. Керісінше, ZigBee (~25 мс) және IEEE 802.15.4 (~20 мс) хаттамаларында арнаны күту мен қайта жіберу әсерінен кідіріс жоғарырақ болды.

Энергия тұтыну көрсеткіші бойынша да WirelessHART және ISA100.11a үнемдірек екенін көрсетті: жүктеме 0.6 кезінде энергия тұтынуы шамамен 4.0 мДж болып, басқа хаттамалардан 10–15% төмен нәтиже берді. Бұл уақыттық жоспарлау арқылы қажетсіз тыңдау кезеңдерінің қысқаруымен түсіндіріледі. Ал ZigBee және IEEE 802.15.4 төмен қуатты тұрмыстық және экологиялық мониторинг жүйелерінде қолдануға қолайлырақ.

Өткізу қабілеті нәтижелері барлық хаттамаларда жүктеме өскен сайын артатынын көрсетті, алайда ең жоғары көрсеткіш ISA100.11a (0.6 жүктемеде ~15 Кбит/с) хаттамасында байқалды. ZigBee (~14 Кбит/с) және IEEE 802.15.4 (~13 Кбит/с) көрсеткіштері өзара жақын болғанымен, CSMA/CA-дағы соқтығыстар олардың тиімділігін шектеді.

Жалпы алғанда, зерттеу қорытындысы бойынша ISA100.11a және WirelessHART хаттамалары сенімділігі жоғары, кідірісі төмен, энергияны үнемді және өткізу қабілеті жақсы болғандықтан, өнеркәсіптік автоматтандыру мен нақты уақыттағы басқару жүйелері үшін ең тиімді шешім болып табылады. Ал ZigBee және IEEE 802.15.4 хаттамалары төмен қуатты, тұрмыстық және мониторингтік жүйелерде

4 2.4 ГГц жиілікте жұмыс жасайтын протоколдарға сәйкес MATLAB ортасында сымсызбасқару сенсорларын моделдеу

4.1 Сымсыз байланыс сенсорларын зерттеу

IEEE 802.15.4 2.4ГГц радио сигналдың физикалық деңгейде таратылған спектрдің стандартына сәйкес СЖБЖ жүйесінде пакеттік жоғалту мен кідірісті азайту үшін арна моделін құру, бір орталықтан басқарылатын маршрутизацияны модельдік-болжамдық басқарумен бірлесіп жобалау тәсілін әзірлеу және оны Matlab ортасында модельдеу арқылы бағалау.

1 IEEE 802.15.4 2.4 МГц DSSS PHY үшін жол жоғалту, лог-нормаль көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу және қабылдағыш шуын ескеретін арна моделін құрып әрбір түйін үшін SINR және L биттік пакетке арналған пакеттік қате ықтималдығы Монте Карло әдісімен анықтау

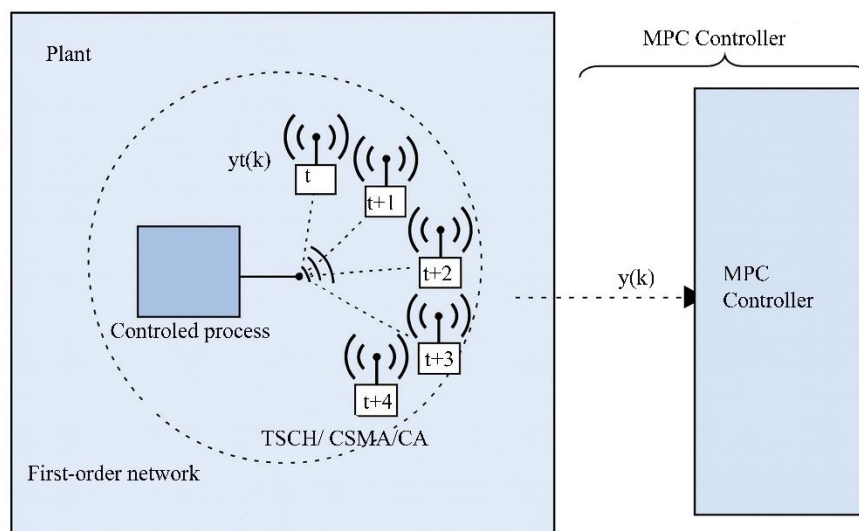
2 10×10 м аумақта байланыс радиусы 10 м, 5 түйіні бар желі үшін әр түйіннің sink-пен бірсекірісті (single-hop) байланысын қарастырып, $T_{pkt} = 5$ с мәнінде TDMA және CSMA/CA MAC сұлбалары үшін пакетті сәтті жеткізу ықтималдығын $p_{s,i}$ бойынша анықтау; пакеттік жоғалтуды Бернуллі және Марковтық FSMC типті модельдермен сипаттап, олардың математикалық күтімін, дисперсиясын және қатарынан жоғалатын пакеттер саны $E[N_{loss}]$ бойынша TDMA мен CSMA/CA схемаларының сенімділік және кідіріс тұрғысынан артықшылықтарын салыстыру.

3 Желі топологиясы көпсекірісті маршрутизацияны қолдаған жағдайда, single-hop пакеттік жоғалту ықтималдықтарына сүйене отырып Бернуллі үлестірімі үшін және FSMC моделі үшін end-to-end жоғалтуды $P_{loss,e}^{2eP}$ бағалау. A hop саны аз маршруты мен hop саны көп SINR жоғары B маршрутын салыстыру. co-design маршрутизация протоколы тұрғысынан трафикті A және B маршруттары арасында α , $(1-\alpha)$ үлестерімен бөлу арқылы орташа $P_{loss,e}^{2e(\alpha)}$ СЖБЖ сенімділік талабы 1–5% шегінде ұстап тұру мүмкіндігін модельдеу.

4 СЖБЖ талаптарына сай МББ негізіндегі бірлескен параметр таңдау схемасын әзірлеу. Пакеттік қате және end-to-end жоғалту модельдерін СЖБЖ сенімділік ($P_{loss,e}^{2e} \leq 1 \sim 5\%$) және кідіріс ($D \leq 100 \sim 200$ мс) талаптарымен байланыстыра отырып, Модельдік-болжамдық басқару (МББ) тәсілін қолдану; күй векторына $x_r(k)$ технологиялық объект күйін, $q_i(k)$ түйіндердегі кезек ұзындықтарын және $\chi_s(k)$ арна күйін енгізу, басқару векторына $P_{tx,i}(k)$, $T_s(k)$, $N_{retx}(k)$, $\theta_{MAC}(k)$, $\theta_{route}(k)$ сияқты желілік параметрлерді қосу; $x(k+1) = f(x(k), u(k))$ дискреттік моделін шектеулер және салмақ коэффициенттері w_r, w_q, w_e функциясын құрып, сол негізде Matlab-та МББ алгоритмінің көмегімен СЖБЖ параметрлерінің динамикасын және басқарылатын объектінің өтпелі процесін модельдеу, нәтижесінде пакеттік жоғалту, кідіріс және энергия тиімділігі арасындағы компромисті автоматты түрде реттейтін параметр аймағын анықтау.

Бұл бөлімде таратқыш сипаттамалары негізінде, әрі сымсыз желі қолдайтын кідіріс сезімтал басқару қолданбаларында. Бастапқы жағдайда бір антенналы таратқыш-қабылдағыштарды, TSCH MAC протоколын және қайталап жіберу түріндегі уақыттық әртараптандырудың болмауын қарастырады. Осы зерттеу жағдайында жіберілетін IEEE 802.15.4 стандарты талап ететін жартылай синусоидалы импульстік 2450 МГц DSSS PHY диапазонында таратылады, әрі бұл барлық қарастырылған индустриялық сымсыз коммуникация стандарттарына ортақ [36].

Алдыңғы бөлімдерде IEEE 802.15.4 стандартына сәйкес жартылай синусоидалы импульстік 2450 МГц DSSS PHY арналық бұзылыстар жол жоғалту, лог-нормаль көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу және қабылдағыш моделдері қарастырылды. Осы нәтижелерді пайдалана отырып, сымсыз сенсорлық желілер арқылы қашықтықтан басқаруда пакеттік жоғалту мен кідірісті азайтатын бірлескен жобалау және МББ-ге негізделген басқару схемасын құру әрі Matlab ортасында сиуляция жасау.



4.1-сурет – SCH/CSMA/CA негізіндегі бірінші реттік желі мен МББ контроллердің өзара әрекеттесу схемасы

10×10 м аумақта орналасқан, 5 түйіннен тұратын сымсыз сенсорлық желі қарастырылады (түйіндер арақашықтығының радиусы 10 м, periodic sensing әр 5 с). Әр түйін объектінің шығу шамасын өлшеп, алынған $y_t(k)$ мәндерін TSCH/CSMA/CA немесе TDMA MAC протоколдарын қолданатын first-order network арқылы контроллерге жібереді. Уақыт слоттары бойынша берілетін өлшеулер сәйкесінше t , $t+1$, $t+2$, $t+3$, $t+4$ сәттерінде қабылданады. Осы кешіктірілген өлшеулер мен бірлескен жобалау маршрутизация протоколы, сондай-ақ IEEE 802.15.4-based first-order radio model негізінде объектінің Controlled process блогының моделі құрылады және сол модель бойынша болжаушы модельдік басқару контроллері синтезделеді.

4.2 Сигналдың таралу арнасы, арналық бұзылыстар және қабылдағыш модельдеріне талдау

Бұл бөлімде таратқыш сипаттамалары негізінде, әрі сымсыз желі қолдайтын кідіріс сезімтал басқару қолданбаларында. Бастапқы жағдайда бір антенналы таратқыш-қабылдағыштарды, TSCH MAC протоколын және қайталап жіберу түріндегі уақыттық әртараптандырудың болмауын қарастырады. Осы зерттеу жағдайында жіберілетін IEEE 802.15.4 стандарты талап ететін жартылай синусоидалы импульстік 2450 МГц DSSS PHY диапазонында таратылады, әрі бұл барлық қарастырылған индустриялық сымсыз коммуникация стандарттарына ортақ [37].

Физикалық деңгейдегі протокол деректерді кодтайтын өтпелі жолақты сигналды былайша жазамыз.

$$f(t) = b_I(t)\varphi_I(t) - b_Q(t)\varphi_Q(t), \quad (4.1)$$

$b_j(t)$ $j = I$ болса, сигналдың фазасы i мен беріледі, ал $j=Q$ болса, quadrature (Q) компонентіндегі жолақты сигнал болып табылады. Ал $\varphi_I(t)$ және $\varphi_Q(t)$ минималды жиілік ығысуы модуляциясы үшін қолданылатын сигналдық кеңістіктегі функциялары.

$$\varphi_I(t) = \sqrt{\frac{2}{T_c}} \cos(\omega_c t) \cos(\omega_p t), \quad \varphi_Q(t) = \sqrt{\frac{2}{T_c}} \sin(\omega_c t) \sin(\omega_p t). \quad (4.2)$$

4.2-формуладағы ω_c тасушының орталық бұрыштық жиілігі, $\omega_p \ll \frac{\pi}{2T_c}$ импульстерінің бұрыштық жиілігі, T_c микропроцессор жылдамдықтың кері шамасы.

Минималды жиілік ығысуы көрсетілімі квадратуралық фазалық манипуляция модуляциясындағы жартылай-синус тәрізді импульстік-пішіндеу фильтрі қолданылған жағдайға эквивалентті екенін ескеріңіз [18, р. 127]. Екі өлшемді констелляциялық кеңістік 4 биттік символға сәйкес келетін чиптер тізбегі [19, р. 468] бойынша екі 16-чиптік тізбекке бөлінетінін білдіреді: жұп индексі бар чиптер I фаза тасушысына, ал тақ индексі бар чиптер Q фаза тасушысына модуляцияланады. Бұл сипаттама импульстік пішіндеу алдында кез келген чиптік деңгейдегі негізгі жолақты деректер сигналы жүзеге асуын келесі түрде өрнектеуге болатынын білдіреді.

$$b_I(t) = \sum_{l=0}^{n_s-1} \sum_{n=0}^{15} b_{l,m}^I h\left(\frac{t - 2(m+16l)T_c}{2T_c}\right), \quad b_Q(t) = \sum_{l=0}^{n_s-1} \sum_{m=0}^{15} b_{l,m}^Q h\left(\frac{t - (2(m+16l)+1)T_c}{2T_c}\right). \quad (4.3)$$

3-формуладағы n_s хаттамалық деректер блогы құрамындағы 16-лық деректер символдарының саны, $b_{j,l,m}$ символды кодтайтын жалған кездейсоқ

тізбегінің I немесе Q компонентіндегі m-ші микропроцессор *үздіксіз кодтау* әдісімен кодталған мәні $(b_{j,l,m} \ m \in \{\pm 1\} \ \forall j, L, m)$, ал $h(t)$ тікбұрышты импульс. Алдағы талдауда біз S_i символының сигналдық пішінінің i-фазалық және Q-фазалық компоненттерін сәйкесінше S_i^I және S_i^Q деп белгілейміз. Мұндағы I он алтылық цифрлау. I компонентіне жартылай-синустық импульстік-пішіндеу фильтрін қолдану нәтижесінде $S_i^I = S_i^I \cos(\omega_p t)$ түріндегі сигнал алынады. I және Q компоненттері арасындағы уақыттық ығысудың әсерінен Q компонентінің пішінделген сигналы $S_i^Q = S_i^Q \sin(\omega_p t)$ ns ұзындықтағы тізбек ұрастыру үшін $\{S_i^I\}$ жиынынан таңдалған ns сигналдың бірізділігі $b_I(t)$ негізгі жолақтағы деректер сигналын береді. Сол сияқты, $\{S_i^Q\}$ жиынынан алынған ns сигналдар тізбегі $b_Q(t)$ негізгі жолақтағы Q компоненттің Негізгі жолақтағы деректер сигналын құрайды.

L-ші жолақы деректер сигналы сегменті 4.3-формулла бойынша символ s мәнін кодтайды деп алайық, ол $S_\ell \in \{S_i\}_{i=0}^F$ ол соы жиынындағы сигналдардың бірі болып табылады.

Осы сегментке сәйкес келетін жоғарғы жиілікті $S_0 I$ сигналының бөлігі төмендегідей өрнектеледі:

$$X_L = S_L^I \varphi_I(t) - S_L^Q \varphi_Q(t). \quad (4.4)$$

IEEE 802.15.4 стандарты бойынша 2450 МГц жиіліктегі DSSS PHY үшін символ–чип сәйкестігін анықтайтын PN тізбектеріне сәйкес келетін он алтылық (hex) мәндер 4.1-кестеде берілген. Мұнда әр PN тізбегі 0-чиптің бинарлық мәнінен басталып, 31-чиптің мәнімен аяқталады.

Кесте 4.1 – 2450 МГц жиілігіндегі кең спектрлі тікелей секіру физикалық деңгейі үшін символдарды чиптерге сәйкестендіру

Symbol	Chip values	Symbol	Chip values
0	D9C3522E	8	8C96077B
1	EDDC3522	9	B8C96077
2	2ED9C352	A	7B8C9607
3	22ED9C35	B	77B8C960
4	522ED9C3	C	077B8C96
5	3522ED9C	D	6077B8C9
6	C3522ED9	E	96077B8C
7	9C3522ED	F	C96077B8

i-фазалық тасушы жұп индексі бар чиптерді тасиды, ал Q-фазалық тасушы тақ индексі бар чиптерді тасиды [19, р. 470]. Келесі нөлге қайтпайтын кодтау кодтау кезеңінде бинарлық нөлдер теріс бірлікке (−1) түрлендіріледі.

4.3 Сигналдың арналық бұзылыстар

Бұл бөлімде таратылған сигналдарды өзгертетін радиотолқын таралу ортасы аналитикалық түрде сипатталады. Біз таралған қажетті сигналға жол жоғалтуын, көлеңкелік әлсіреу және қуатты басқарудан кейінгі қалдық қуат тербелістері әсер етеді деп есептейміз. Ал кедергі тудыратын сигналдар үшін еркін кеңістіктегі жол жоғалтуы, оған қоса таралу жолында кездесетін кедергілерді ескеретін қосымша әлсірету коэффициентімен арттырылады.

Басқару қуатының тетігі міндетті түрде қарастырылмағанымен, модельдің жалпыға жарамдылығын сақтау үшін біз бұл функцияны енгіземіз. Көпсәулелі өшу [20] қолжетімді жерде қуат басқару арқылы өтелуі тиіс немесе еленбеуі мүмкін. Соңғы бұл болжам өнеркәсіптік ортадағы өте сіңіргіш материалдардың көпсәулелі таралуды басып тастай алатындығымен негізделеді [22].

Сонымен қатар, тиісті орташа мән мен дисперсия параметрлеріне ие лог-нормальды кездейсоқ шама, көпсәулелі өшу мен лог-нормальды көлеңкелік әлсіреудің біріккен әсерін сипаттайтын құрама Накагами–лог-нормаль үлестірімін дәл жуықтай алады [23, 113–114-беттер].

4.4 Еркін кеңістіктегі жол жоғалтуды сипаттау

IEEE 802.15.4 стандартына [19, 49-бет] сәйкес 2450 МГц жолағында еркін кеңістіктегі жол жоғалтуы екі-көлбеулі модельмен төмендегідей беріледі:

$$F_s(d_i) = \begin{cases} 40.2 + 20 \log_{10}(d_i), & d_i \leq 8, \\ [6pt] 58.3 + 33 \log_{10}\left(\frac{d_i}{8}\right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Мұндағы d_i i ші таратқыш пен қабылдағыш арасындағы қашықтық. Индекс $i=s$ қажетті сигнал таратқышын, ал $i \geq 0$ немесе $0 \leq i < s$ кедергі тудырушы таратқыштарды білдіреді. Жол жоғалтудың басқа параметрлеріне [28]–[31] еңбектеріне жүгінуге болады.

$$\alpha_i = 10^{\frac{s_f(d_i)}{10}} \quad (4.6)$$

4.5 Көлеңкелік әлсіреуді модельдеу

Таратылған сигналға әсер ететін көлеңкелік өшу процесі лог-нормальды модельмен сипатталады [20], ол ішкі үй-жайларда таралу жағдайында [32], [33] зерттелген. Осы модельге сәйкес, dB түріндегі көлеңкелік әлсіреу $\beta_i(t)$

нормаль үлестірімге ие, орташа мәні μ_{β_i} , дисперсиясы $\sigma_{\beta_i}^2$, ал автокорреляциясы:

$$\rho_{\beta_i}(\tau) = \sigma_{\beta_i}^2 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{v_i \tau}{\Delta_i} \right)^2} \quad (4.7)$$

формуладағы Δ_i декорреляция қашықтығы, ал v_i егер құрылғы қозғалмалы болса, құрылғының жылдамдығы, ал қозғалмайтын құрылғыда ортадағы шағылдырғыш нысандардың қозғалыс жылдамдығы [34]. Орташа мән μ_{β_i} қабырғалар мен қабаттар сияқты ішкі ортадағы кедергілер әсерінен туындайтын қосымша әлсірету коэффициенті.

Мәтіннің күрделілігін арттырмас үшін және моменттерді сәйкестендіру (moment-matching) жуықтауын [23, 147–155-беттер], [35] талқыламау мақсатында, кедергі сигналдары үшін $\sigma_{\beta_i}^2=0$ деп аламыз. $i \geq 0$ Осылайша μ_{β_i} кедергілерге тән толық әлсіреуді сипаттайды.

$$\rho_{\xi}(\tau) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{\tau_{\xi}} \right)^2}, \quad (4.8)$$

мұндағы τ_{ξ} қуатты басқару блогы мәні маңызды болып саналатын декорреляция уақыты [36], $\sigma_{\xi} = \frac{\ln 10}{10} \sigma_e$.

4.6 Қабылдағыш (Receiver) моделі

Жоғарыда сипатталған арналық бұзылыстар, AWGN және кеңжолақты кедергілер қабылдағыш кірісіндегі қажетті сигналға (SoI) әсер етеді. Кедергі тудырушы сигналдардың өздері де таралудағы бұзылыстарға ұшырайды. Осыған байланысты, қабылдағыш кірісіндегі (яғни байланыс арнасы шығысындағы) сигналды төмендегідей жазамыз:

$$Y(t) = c(t)X(t) + W(t) + \sum_{i=0}^{n_Y+1} (V_i^u(t) + V_i^d(t)) \quad (4.9)$$

4.9-формуладағы $V_i^u(t)$ және $V_i^d(t)$ сымсыз байланыстан беретін ақпарат және алатын ақпарат сигналдарының қабаттасып соқтығысуынан туындайтын кедергі, $W(t)$ біржақты қуат спектрлік тығыздығы N_0 болатын ақшуды, ал $c(t)$ сигналдардың арналық бұзылыстар, $\sqrt{E_c}$ таратқыштан берілген сигналдың күшейтілуін мұндағы E_c чип энергиясы [18, 403-бет]) есепке алатын оң нақты мәнді коэффициент. Біз $c(t)$ ді бір 2.4ГГц тасымалдайтын сигналдың ұзақтығы бойында тұрақты болатын корреляцияланған кездейсоқ процесс ретінде модельдейміз:

$$c(t) = \sqrt{E_c} \alpha_s e^{j\chi_s(t)/2} \quad (10)$$

Мұндағы $\chi_s(t) = \xi s(t) + \beta s(t)$ корреляцияланған көлеңкелік әлсіреу мен қуатты басқару қатесінің жиынтық әсері, ол сигнал берілген уақыты ішінде тұрақты болып қалады $c^t c(t)$ -тің белгілі бір t мезетіндегі мәні. Егер T_s шамасы символдық жылдамдықтың кері шамасы деп белгіленсе (яғни 62.5 ksymbol/s), онда ақпарат сигналының ұзақтығы $n_s T_s$ болады. IEEE 802.15.4 стандартының 2.4 Гц физикалық деңгейіндегі деректерді тасымалдау құрылымы мен физикалық хаттамалық деректер бірлігінің максималды өлшемі 133 октет екенін ескерсек [19, 10-17 бет], ақпарат беретін сигнал ұзақтығы ең көп дегенде 4.256 мс болады.

Y_L шамасы X_L сигналын тасымалдайтын $Y(t)$ қабылданған сигнал сегментіне сәйкес келетін коррелятор кірісін білдірсін. Сонда Y_{Li} және Y_{Lq} векторының сәйкесінше I-фазалық және Q-фазалық компоненттері. Формалды түрде, (4.1), (4.4) және (4.9) формулаларынан, сондай-ақ ішкі көбейтіндінің анықтамасынан [18, 2.2-1-бөлім, 28-бет], әрі біз нақты мәнді сигналдармен жұмыс істейтінімізді ескере отырып, келесі өрнектерді аламыз:

$$Y_l \cdot S_i = Y_l^I S_i^I + Y_l^Q S_i^Q, \quad Y_l \cdot S_i = \int_{T_s}^{(l+1)T_s} Y(t) \varphi_l(t) S_i^I dt, \quad Y_l \cdot S_i = \int_{T_s+T_c}^{(l+1)T_s+T_c} Y(t) \varphi_Q(t) S_i^Q dt \quad (4.13)$$

Декодтағыштың шығысы корреляция метрикаларының ішінен ең үлкен мәнді беретін символ.

$$s = \arg \max_{0 \leq i \leq F} (Y_l \cdot S_i) \quad (4.14)$$

Егер бұл символ анықтамалық пайдаланушы жіберген символдан өзгеше болса, яғни $s^{\wedge} \neq s$ шарты орындалса, онда символдық қате орын алды деп есептеледі. Интегралдың сызықтылығы мен (4.9)-өрнекті пайдалана отырып, (4.12) және (4.13) формулаларын қажетті сигналға, кедергіге және гаусстық ақ шу әсеріне сәйкес құрамдас бөліктерге жіктейміз.

$$Y_l^I S_i^I = Y_{li}^I + W_{li}^I + \sum_{t=0}^{n_s+1} (V_{t,li}^{Iu} + V_{t,li}^{Id}) \quad (4.15)$$

$$Y_{li}^I = c^t \int_{T_s}^{(l+1)T_s} X_t \varphi_l(t) S_i^I dt \quad (4.16)$$

$$W_{li}^I = \int_{T_s}^{(l+1)T_s} W(t) \varphi_l(t) S_i^I dt \quad (4.17)$$

$$V_{t,li}^{Ij} = \int_{T_s}^{(l+1)T_s} V_t^j(t) \varphi_l(t) S_i^I dt \quad \text{where } j \in \{u, d\} \quad (4.18)$$

Мұндағы $j \in \{u, d\}$ квадратуралық фаза компоненттеріне арналған өрнектер де осыған ұқсас түрде жазылады. Бұл мүшелер SINR және пакеттік қате ықтималдығын шығару үшін негізгі рөл атқарады. (4.16) және (4.17)-өрнектерді есептеу барысында интегралдау аралығы әрбір анықтамалық

пайдаланушы чипіне сәйкес келетін 16 бөлікке бөлінеді. Бұл есептеуде интегралдың сызықтылығы және тригонометриялық функциялардың белгілі қасиеттері пайдаланылады. Сонымен қатар (4.16) және (4.17)-өрнектердегі S_i мүшесі 4.1-кестеде берілген символ-чип сәйкестендіру кестесін мұқият талдауды қажет етеді.

4.7 Арна моделінен SINR және пакеттік қате ықтималдығын талдау

Алдыңғы бөлімде (4.9) және (4.10) формулалары негізінде қабылдағыш кірісіндегі сигнал былай жазылды;

$$Y(t) = c(t)SoI(t) + Vu(t) + Vd(t) + W(t), \quad (4.19)$$

мұнда $c(t)$ жол жоғалту, көлеңкелік әлсіреу және қуат басқару қатесін ескеретін, берілген 2.4 ГГц IEEE 802.15.4 PHY символы бойында тұрақты деп алынған кездейсоқ коэффициент [24]; Vu , $Vd(t)$ кедергі тудырушы сигналдар, $W(t)$ – AWGN. Әрбір пакет үшін арна параметрлері (10) арқылы $\chi_s(t) = \xi_s(t) + \beta_s(t)$ сипатталатындықтан, берілген түйін i үшін L биттік пакеттің орташа SINR төмендегідей жазылады.

$$\gamma_i = \frac{E_{s,i}}{N_0 + I_i}, \quad (4.20)$$

мұндағы $E_{s,i} = c_i^2 E_s$ пайдалы сигналдың чип энергиясы мен арналық күшейту есебінен effective символ энергиясы, I_i (16) мен (17) формулаларында сипатталған SoI ға қатысты интерференция қуатының эквивалентті мәні, N_0 біржақты шу спектрлік тығыздығы.

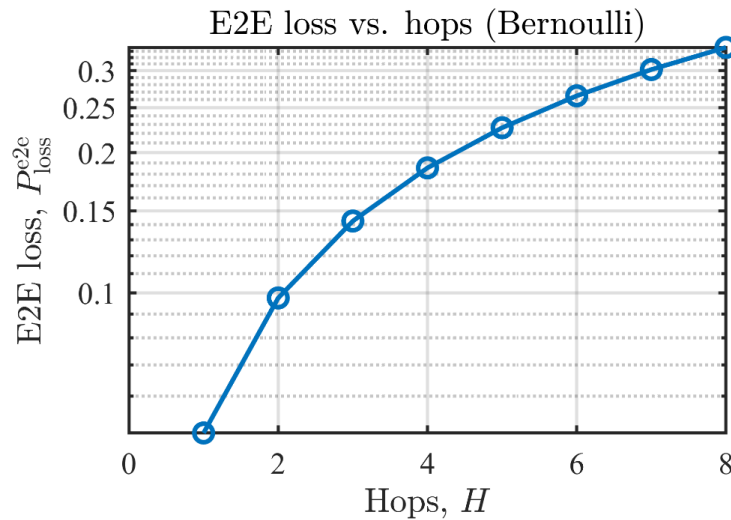
IEEE 802.15.4 2450 МГц DSSS PHY үшін O-QPSK және жартылай синусоидалы импульстік пішіндеу фильтрі қолданылған жағдайда, символдық қате ықтималдығы $P_s(\gamma_i)$ арнадағы γ_i -ға сәйкес аналитикалық / аппроксимациялық өрнектермен беріледі [38]. Пакеттік қате ықтималдығы (L биттен тұратын PHY пакеті үшін):

$$P_{pkt,i}(\gamma_i) \approx 1 - (1 - P_b(\gamma_i))^L, \quad (4.21)$$

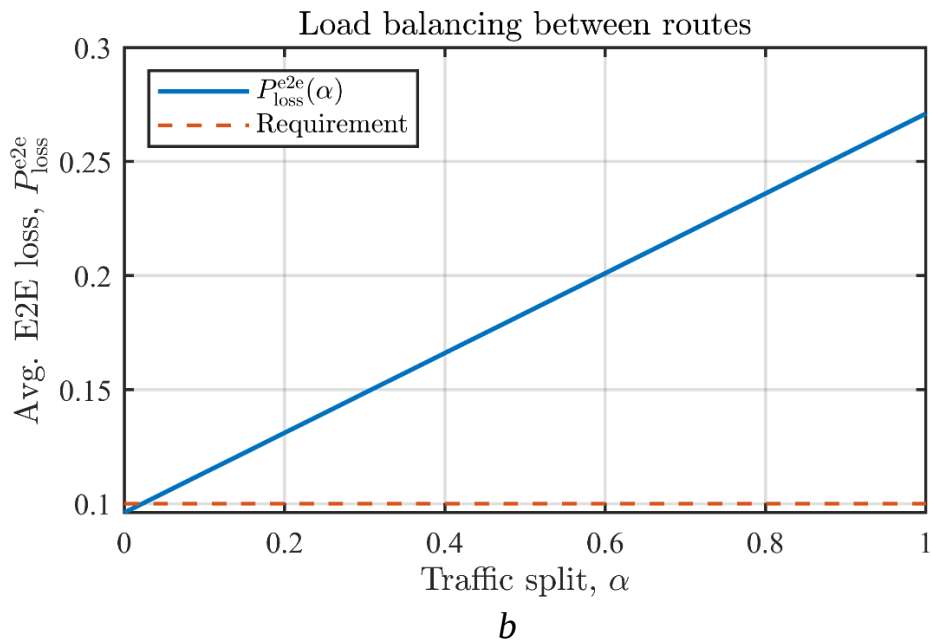
Мұндағы $P_b(\gamma_i)$ синусоидалы импульстік-пішіндеу және PN тізбектері (1-кесте) ескерілген биттік қате ықтималдығы. Желі деңгейінде бізге керегі тек $P_{pkt,i}$, ал оның γ_i -ға тәуелділігі жоғарыда қарастырылған PHY және арна модельдерінен шығады.

Сигналдың таралу арнасының параметрлері берілген теңдеулер бойынша Монте–Карло әдісімен модельденді. Есептеулерде таратқыш пен қабылдағыш арақашықтығы $d = 1 \dots 100$ м аралығында өзгертілді, ал әрбір қашықтық үшін

SINR және пакеттік қате ықтималдығының орташа мәндері есептелді. Аталған арна моделіне сәйкес алынған сандық нәтижелер 4.2-суретте келтірілген.



4.2-сурет – Бернулли моделі бойынша хоп санына (H) тәуелді end-to-end пакеттік жоғалту ықтималдығы ($E2E\ loss$).



4.3-сурет – Трафикті бөлу кезіндегі орташа E2E пакеттік жоғалту

Single-hop жағдайда пакеттік жоғалтуды талдау. 10×10 м аумақта, байланыс радиусы 10м болғандықтан, барлық 5 түйіннің sink-пен бірсекірісті (single-hop) байланысы бар деп аламыз. Әр түйін әр 5с сайын бір пакет жібереді. Әрбір түйін үшін бір реткі жіберу сәтіндегі пакетті сәтті жеткізу ықтималдығы

$$p_{s,i} = 1 - P_{pkt,i}(\gamma_i), \quad (4.22)$$

Ортаға басқару деңгейі бойынша схемасына байланысты $p_{s,i}$ өзгереді, ол Уақыт бойынша бөлінетін көптік қолжетім жағдайында интерференция аз болады, сондықтан үі негізінен жол жоғалту мен көлеңкелік әлсіреуге тәуелді [26]. Сенсордан алынған ақпаратты тасымалдаушы негізіндегі қолжетім, қақтығыс болдырмау жағдайында желіде бірнеше түйіндер бір жолда ақпарат бергендігі себепті қосымша интерференция I_i артады үі төмендейді. Өндірістік ортада радиоарналар уақыты бойынша баяу өзгертін көлеңкелік әлсіреудің Δ, τ, ξ декорреляция қашықтығы/уақыты үлкен бір пакеттен екіншісіне дейінгі арналық күйлердің тәуелділігі байқалуы мүмкін. Сондықтан single-hop пакеттік жоғалтуды сипаттау үшін екі түрлі стохастикалық модель қарастырамыз.

Бернулли моделі. Егер пакеттер арасындағы интервал (5с) арна декорреляция уақытынан үлкен болса және арна күйі тәуелсіз деп есептелсе, онда:

$$X_k \in \{0,1\}, \quad P(X_k = 1) = p_{s,i}, \quad (4.23)$$

Мұндағы $X_k=1$ ол k пакеттің сәтті жеткізілуі, $X_k=0$ пакетің жоғалуы.

1 Марковтық FSMC моделі егер (7) және (8) формулаларынан алынған $\chi_s(t)$ корреляциясы үлкен болса, онда арнаны бірнеше күйге ($G_1, \dots, G_M$) бөлуге болады онда әр күй белгілі SINR диапазонына сәйкес келеді біз оны келесідей сипаттаймыз

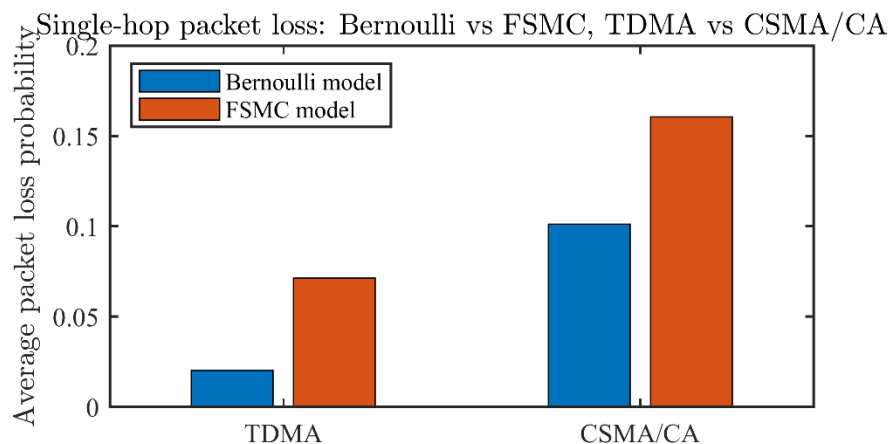
$$P\{S_{k+1} = j | S_k = i\} = p_{ij}, \quad (4.24)$$

Әр күй үшін өзінің пакеттік қате ықтималдығы $P_{pkt}^{(m)}$ беріледі. Бұл жағдайда пакеттік жоғалту тізбегі $\{X_k\}$ Марковқа тәуелді болады. Екі модель үшін де пакеттік жоғалтудың математикалық күтімі, дисперсиясы және қатарынан жоғалатын максималды пакеттер саны $E[N_{loss}]$ есептеліп, CSMA/CA және TDMA MAC схемаларында сенімділік пен кідірістің салыстырмалы артықшылығы талданады.

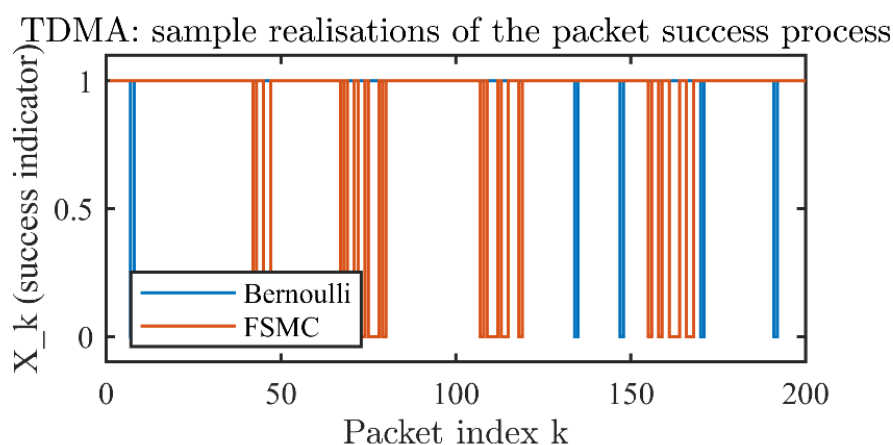
Жоғарыда сипатталған арналық модель негізінде 10×10 м аумақта орналасқан 5 сенсор түйіні мен sink арасындағы single-hop байланыс статистикасы модельденді. Байланыс радиусы 10м болғандықтан, барлық түйіндер sink-ке тікелей қосылған деп алынды. Әр түйін әрбір $T_{pkt}=5$ с сайын бір пакет жібереді, ал бір рет жібергендегі сәтті жеткізу ықтималдығы $p_{s,i}$ 4.1-бөлімде алынған SINR және пакеттік қате ықтималдығы модельдерімен анықталады.

TDMA сұлбасында интерференция аз болатындықтан, $p_{s,i}$ жоғары, ал CSMA/CA жағдайында бірнеше түйіннің бір мезгілде қол жеткізуі нәтижесінде қосымша интерференция I_i пайда болып, $p_{s,i}$ азаяды. Уақыт бойынша баяу өзгертін көлеңкелік әлсіреу салдарынан арнаның көршілес пакеттері үшін корреляциясы байқалуы мүмкін, сондықтан single-hop пакеттік жоғалтуды сипаттау үшін Бернулли және Марковтық FSMC типті екі түрлі

стохастикалық модель қарастырылды. Модельдеу нәтижелері 4.3-суретте (а) және (в) суретте келтірілген.



4.4-сурет – TDMA және CSMA/CA үшін бір секірістегі пакеттік жоғалту ықтималдығы: Бернулли және FSMC модельдері бойынша салыстыру



4.5-сурет – TDMA жағдайындағы пакеттің сәтті жеткізілу процесінің үлгілік жүзеге асулары (Бернулли және FSMC модельдері)

5 тораптан тұратын WSN желісіндегі бір секірісті десте жоғалуының модельдеу нәтижелері. В) Бернулли және FSMC модельдері үшін TDMA және CSMA/CA жағдайда орташа бір секірісті десте жоғалту ықтималдығы. А) TDMA: Бернулли және FSMC модельдері үшін дестенің сәтті жеткізілу процесінің үлгілік жүзеге асырылымдары.

4.4-суреттегі А графигі TDMA және CSMA/CA үшін орташа пакеттік жоғалту ықтималдығын салыстырды. Нәтижелерге сәйкес, CSMA/CA сұлбасында қосымша интерференция салдарынан пакеттік жоғалту ықтималдығы TDMA-ға қарағанда айтарлықтай жоғары. Сонымен қатар FSMC моделі Бернулли моделіне қарағанда жоғалтудың орташа мәнін және бәрсттік ұзындығын арттырады, бұл қатарынан жоғалатын пакеттер санының $E[N_{\text{loss}}]$ және $N_{\text{loss}}^{\text{max}}$ мәндерінің өсуімен сипатталады.

4.5-суреттегі В графигінен TDMA жағдайында Бернулли моделі үшін пакеттердің жоғалуы уақыт бойынша салыстырмалы түрде біркелкі таралатынын көруге болады, өйткені $\{X_k\}$ тізбегі тәуелсіз Бернулли шамаларынан тұрады. FSMC моделінде арнаның күйі уақыт бойынша корреляцияланғандықтан, жоғалтулар бёрст түрінде пайда болады, яғни қатарынан бірнеше пакет жоғалуы мүмкін. Бұл құбылыс көлеңкелік әлсіреудің үлкен декорреляция уақытымен түсіндіріледі. Осылайша, ұсынылған модельдеу нәтижелері CSMA/CA негізіндегі желілерде сенімділіктің төмендеп, кезектесу және кешігу сипаттамаларының нашарлайтынын көрсетеді, ал TDMA сұлбасы single-hop режимінде жоғарырақ сенімділік қамтамасыз етеді.

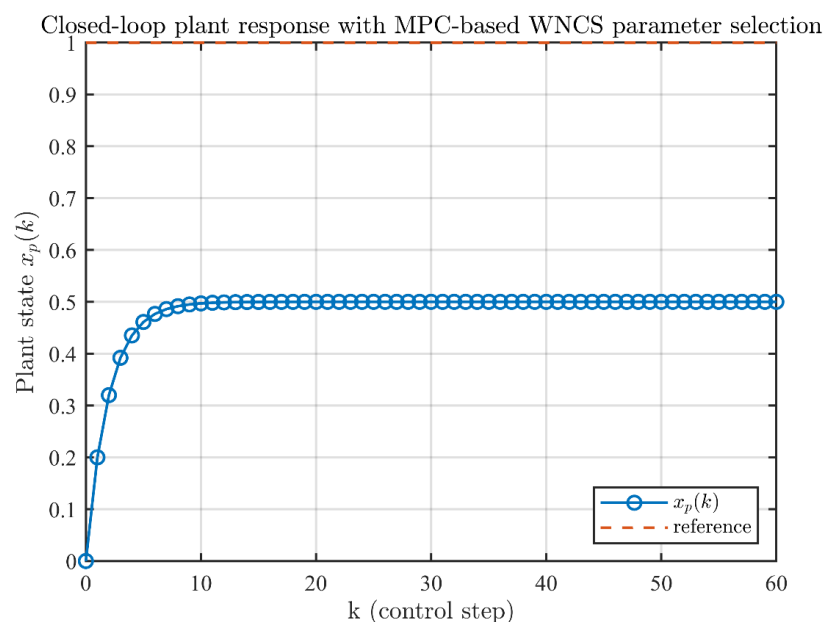
4.8 Multi-hop Co-design маршрутизациясы және end-to-end пакет жоғалту

Желі топологиясы көпсекірісті маршрутизацияны қолдаған жағдайда, (4.22)-дегі түйіндердегі пакеттік жоғалту ықтималдықтарын қолдану арқылы end-to-end жоғалтуды бағалаймыз. Мысалы, бір маршрут $P=\{n_0, n_1, \dots, n_H\}$ арқылы (H hop) жіберілген пакет үшін hop-тар тәуелсіз Бернулли үлестіріміне бағынса,

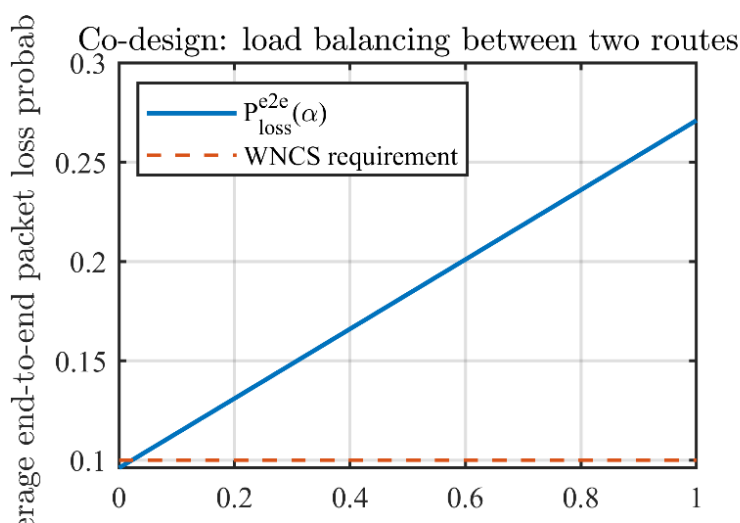
$$P_{succ}^{e2e} = \prod_{h=0}^{H-1} p_{s, n_h, n_{h+1}}, \quad P_{loss}^{e2e} = 1 - P_{succ}^{e2e}, \quad (4.25)$$

мұндағы $p_{s, n}$ — hop тағы сәтті жеткізу ықтималдығы. FSMC моделі қолданылса, end-to-end жоғалту ықтималдығы арналық күйлердің бірлескен Марков тізбектерімен анықталады [27]. Co-design маршрутизация протоколы желі топологиясын, трафиктің өзгерісін және әр hop үшін (4.21)-(4.22) формулаларымен берілген РНУ-деңгейіндегі пакеттік қате ықтималдығын ескере отырып, нақты уақытта келесі міндеттерді шешеді:

(4.22) және (4.25) теңдеулеріне негізделген көпсекірісті маршрутизацияның end-to-end пакеттік жоғалуын сандық түрде бағалаймыз. Алдымен барлық hop тары бірдей single-hop маршрут үшін $H=1 \dots 8$ диапазонында end-to-end жоғалтудың P_{loss}^{e2e} мәні (4.25) теңдеуі бойынша есептеледі. hop саны аз бірақ әр hop-тың арнасы нашар оны А маршрут деп және hop саны көп әр hop-та SINR жоғары оны В маршрут деп аламызда екі балама маршрут салыстырылады. Соңында Co-design маршрутизация протоколы тұрғысынан осы екі маршрут арасында трафикті бөлу жүзеге асырылады (α үлесі А маршрутымен, $1-\alpha$ мен В маршрутымен) end-to-end жоғалтуды СЖБЖ сенімділік талабы шегінде ұстап тұру мүмкіндігі қарастырылады. Алынған модельдеу нәтижелері 4.3-суретте көрсетілген.



4.4-сурет – Барлық хоптары бірдей Бернулли үлестері негізіндегі маршрут үшін хоптар саны N -ке байланысты болғандағы пакет жоғалтудың ықтималдығы



4.5-сурет – Бірлескен жобалау бойынша екі маршрут арасындағы трафикті бөлу коэффициенті α -ға байланысты орташа пакет жоғалтудың ықтималдығы және СЖБЖ жүйесінің сенімділік талабы

4.4-суреттегі А графигінен хоп саны артқан сайын end-to-end пакеттік жоғалту ықтималдығының экспоненциалды түрде өсетінін көруге болады. Мысалы, бір хоп үшін single-hop сәттілік ықтималдығы $p_s=0,95$ болғанда, $N=2$ кезінде P_{loss}^{2e} шамамен 0,097 болса, $N=8$ үшін бұл мән 0,34-тен жоғары болады. Бұл көпсекірісті маршрутизацияда хоп санын шектемеу желінің сенімділігіне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді. 4.3-суреттегі В графигі бірлескен жобалау маршрутизациясының трафикті бөлу мүмкіндігін көрсетеді. Мұнда α үлгісі А маршрут арқылы, ал $(1-\alpha)$ үлесі В маршрут

арқылы жіберіледі. Орташа end-to-end жоғалту $P_{\text{losse}}^{2e}(\alpha)$ сызықты түрде өзгеріп, белгілі бір α диапазонында СЖБЖ сенімділік шегі P_{reqe}^{2e} мәнінен аспайды. Осылайша Co-design протоколы желі топологиясын, һор бойынша РНУ деңгейіндегі пакеттік қате ықтималдықтарын және трафик динамикасын ескере отырып, маршрутты таңдау мен трафикті бөлуді бірлесіп оңтайландыруға мүмкіндік береді.

4.9 СЖБЖ талаптарына сай параметр аймағындағы МББ арқылы табу

Енді алынған SINR негізінде пайда болатын пакеттік қате end-to-end жоғалту модельдері СЖБЖ жақтан қойылатын талаптармен байланыстыру үшін МББ тәсілін қолданамыз [38].

СЖБЖ үшін жүктелген талаптар бойынша пакеттік жоғалту $P_{\text{loss}}^{e2e} \leq P_{\text{max}}$ (1-5 % шамасында) және кідіріс $D_{e2e} \leq D_{\text{max}}$ (100-200 мс) шамасынан аспау керек. МББ күй векторы желінің және басқару объектісінің күйін толық қамтиды. Желілік бөліктер үшін жазамыз

$$x(k) = [x_p(k), q_1(k), \dots, q_5(k), \chi_s(k)], \quad (4.26)$$

мұнда $x_p(k)$ басқарылатын технологиялық объектінің күйі, $q_i(k)$ i түйіндегі кезек ұзындығы, $\chi_s(k)$ арна күйінің жинақталған көрсеткіші (ағымдағы SINR немесе FSMC т.б күй индексі). Осыған негізделе отырып басқару веторын құрамыз;

$$u(k) = [P_{\text{tx},1}(k), \dots, P_{\text{tx},5}(k), T_s(k), N_{\text{retx}}(k), \theta_{\text{MAC}}(k), \theta_{\text{route}}(k)], \quad (4.27)$$

мұнда $P_{\text{tx},i}(k)$ i -түйіннің жіберу қуаты (IEEE 802.15.4 2450 МГц DSSS РНУ үшін қабылданған деңгейлер), $T_s(k)$ үлгі алу/жіберу периоды (sampling period, мысалы 5с айналасында), $N_{\text{retx}}(k)$ қайта жіберу санының рұқсат етілген максимум шамасы, $\theta_{\text{MAC}}(k)$ слот ұзақтығы, backoff терезесі және т.б., $\theta_{\text{route}}(k)$ Co-design маршрутизация параметрлері (маршрут таңдау, трафик бөлу коэффициенттері).

ББ үшін маршрутизация протоколдарының логикалық шектеулері

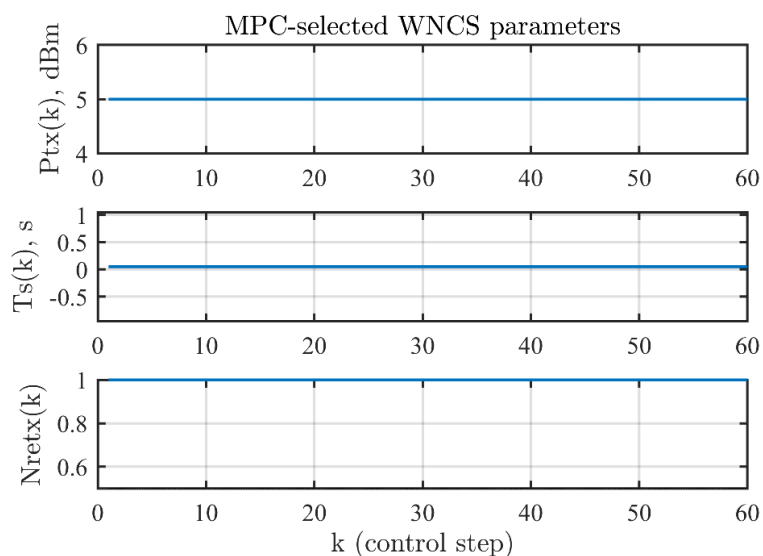
$$\begin{aligned} x(k+j+1) &= f(x(k+j), u(k+j)), \\ P_{\text{loss}}^{e2e}(k+j) &\leq P_{\text{max}}, \\ D_{e2e}(k+j) &\leq D_{\text{max}}, \\ u_{\text{min}} &\leq u(k+j) \leq u_{\text{max}}, \end{aligned} \quad (4.28)$$

МББ үшін әр дискреттік қадамда шектеулерді ескере отырып оптимизацияланған теңдеуін құрамыз

$$\min_{\{u(k), \dots, u(k+N_p-1)\}} \sum_{j=0}^{N_p-1} (w_p \|x_p(k+j+1)\|^2 + w_q \sum_i q_i^2(k+j+1) + w_e \sum_i P_{tx,i}^2(k+j)), \quad (4.29)$$

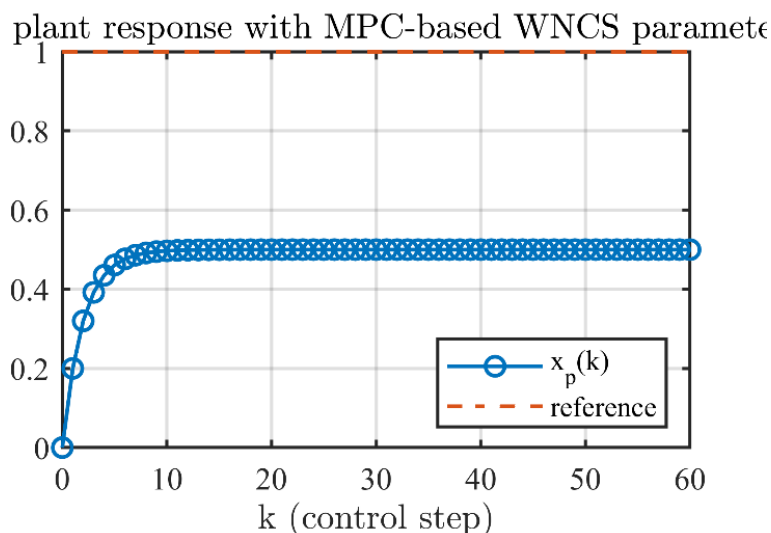
мұнда $x(k+1)=f(x(k),u(k))$ функциясы (4.5) және (4.8) формулаларымен берілген арна моделін, (4.21) мен (4.25) пакеттік қате ықтималдықтарын және басқару объектісінің динамикасын біріктіретін дискреттік модель, w_p, w_q, w_e басқару дәлдігі, сонмен бірге кезек ұзындығын және энергия/қуат шығынын баланса келтіретін салмақ коэффициенттері, N_p болжам горизонты бар.

4.1–4.3 бөлімдерде алынған SINR, пакеттік қате және end-to-end жоғалту модельдері енді СЖБЖ тарапына қойылатын сенімділік кідіріс талаптарымен біріктірілді. Ол үшін МББ тәсілі қолданылады. МББ күй векторына (4.26) теңдеуіндегі технологиялық $x_p(k)$ объектінің күйін, $q_i(k)$ түйіндердегі кезек ұзындықтарын және арнаның күйін сипаттайтын $\chi_s(k)$ көрсеткішін енгізеді. $u(k)$ басқару векторы (4.27) теңдеуіне сәйкес $P_{tx,i}(k)$, таратқыш қуаты, $T_s(k)$ алу/жіберу периоды, $N_{retx}(k)$ рұқсат етілген қайта жіберулер саны және $\theta_{MAC}(k)$, $\theta_{route}(k)$ MAC/маршрутизация параметрлері сияқты желілік шамаларды қамтиды. СЖБЖ үшін сенімділік талабы ретінде $P_{losse}^{2e} \leq 1 \sim 5\%$ end-to-end пакеттік жоғалту ықтималды, ал кідіріс талабы ретінде бір пакетке кететін жалпы кідіріс $D \leq 100 \sim 200$ мс диапазонынан аспауы қарастырылады. (4.29) мақсат функциясында w_p, w_q, w_e салмақ коэффициенттері объектіні басқару дәлдігін, кезек ұзындығын және энергия/қуат шығынын баланса келтіреді. МББ әр дискреттік қадамда осы шектеулерді ескере отырып, $x(k+1)=f(x(k),u(k))$ дискреттік модель үшін оптималды $u(k)$ параметрлерін таңдайды. Модельдеу нәтижелері 4.4 және 4.5-суреттерде көрсетілген.



4.6-сурет – МББ негізінде таңдалған СЖБЖ параметрлерінің динамикасы

4.6-суретте ұсынылған МББ алгоритмімен жабық контурдағы объектінің күйінің $z_p(k)$ берілген мәнге үздіксіз жақындауы көрсетілген. Желілік жүктемелер және пакеттік қателік ықтималдығына қарамастан, МББ негізіндегі бірлескен параметр таңдау тәсілі жүйенің орнықтылығын мен қажетті өтпелі процесті қамтамасыз етеді. Бұл жерде басқару әсері тек пакеттер сәтті жеткізілген қадамдарда ғана объектіге әсер ететінін ескерсек, СЖБЖ параметрлерін дұрыс таңдау маңызды роль атқарады.



4.7-сурет – МББ арқылы бейімделетін СЖБЖ параметрлері бар жүйенің динамикалық жауабы

4.6-суретте МББ әр дискреттік қадамда таңдалатын желілік параметрлердің динамикасы берілген. Бастапқыда қателік үлкен болған кезде алгоритмде $P_{tx}(k)$ таратқыш қуатын жоғарырақ, $T_s(k)$ қысқа үлгі алу периоды және рұқсат етілген қайта жіберулер $N_{max}(k)$ санын таңдап, СЖБЖ сенімділігін арттырады және пакеттік жоғалтуды азайтады. Жүйе орныққан сайын $z_p(k)$ күйі эталон мәнге жақындаған кезде қуат деңгейі мен қайта жіберулер саны біртіндеп азайтылады, бұл энергия шығынын төмендетуге және желілік ресурстарды үнемді пайдалануға мүмкіндік береді.

Осылайша МББ негізіндегі бірлескен жобалау тәсілі басқару сапасын, кідіріс және энергия тиімділігі арасындағы байланысты автоматты түрде реттеп, СЖБЖ талаптарына сай параметр аймағын табуға мүмкіндік береді.

4.2-суретте арақашықтыққа тәуелді орташа SINR және пакет қателігі ықтималдығының графиктері көрсетілген. Бұл нәтижелер IEEE 802.15.4 стандартына негізделген first-order radio model үшін күтілетін сипаттамаларды растайды. Қашықтық ұлғайған сайын жол жоғалтулардың артуына байланысты SINR монотонды түрде төмендейді, ал онымен қатар пакет қателігі ықтималдығы $Pe(d)$ экспоненциалды түрде өседі. Осыдан желі түйіндері арасындағы сенімді байланысты қамтамасыз ету үшін hop (секіріс) арақашықтығын шамамен 10-20 м шегінде шектеу және көп-hop маршрутизацияны қолдану қажеттігі көрінеді.

4.3-суретте single-hop жағдайындағы TDMA және CSMA/CA MAC протоколдары үшін пакет жоғалту ықтималдығы салыстырылған. Нәтижелер TDMA режимінде уақыттық слоттардың детерминистік бөлінуі мен соқтығыстардың болмауы есебінен пакет жоғалту ықтималдығының төмен болатынын көрсетеді. CSMA/CA режимінде арнаға бір мезгілде қол жеткізу талпыныстары салдарынан интерференция мен backoff кідірістері артып, Ploss мәні жоғарылайды. Демек, MAC деңгейінде TDMA-кестелеуді пайдалану СЖБЖ үшін сенімділік пен кідіріс талаптарын қанағаттандыруға неғұрлым тиімді.

Бернулли және FSMC арналары үшін алынған модельдеу нәтижелері (4-сурет) пакет сәтті жеткізілу процесіндегі уақыт бойынша корреляцияны ескерудің маңыздылығын көрсетеді. Бернулли моделі пакеттің жоғалуын тәуелсіз оқиғалар ретінде қарастыратындықтан, кедергі деңгейі өзгермелі ортада нақты жүйемен салыстырғанда оптимистік бағалар береді. FSMC моделі күй ауысулары арқылы fading-тің созылмалы интервалдарын сипаттап, end-to-end пакет жоғалту ықтималдығының жоғарғы шекарасын дәлірек бағалауға мүмкіндік береді. Сондықтан СЖБЖ сенімділігін талдауда FSMC-негізіндегі статистикалық сипаттаманы қолдану орынды. 4.4-суретте көрсетілген Co-design маршрутизация саясаты hop саны мен жүктемені теңгеру есебінен end-to-end пакет жоғалтуды азайта алатынын дәлелдейді. Hop саны артқан кезде бір маршруттың жүктемесін шектеу және балама маршрутты қоса пайдалану арқылы талап етілетін Ploss, end $\leq 5\%$ Ploss, end $\leq 5\%$ деңгейіне жетуге болады. Бұл нәтижелер желі деңгейіндегі Co-design протоколы мен MAC параметрлерін (TDMA кестесі, қуат деңгейі, дискреттеу периоды) бірлесіп оңтайландыру СЖБЖ өнімділігін айтарлықтай жақсартатынын көрсетеді.

Соңында, 4.5-суретте МББ негізінде таңдалған СЖБЖ параметрлері бар жабық контурлы жүйенің динамикалық жауабы көрсетілген. Объектінің күйі $x(k)$ берілген анықтама мәніне жылдам ілеседі, өтпелі процестің артық асуы аз, ал орнығу уақыты желілік кідірістер мен пакет жоғалтулар ескерілгеннің өзінде қанағаттанарлық деңгейде қалады. Бұл МББ-дің бір мезгілде желілік шектеулерді (тәжірибелік sampling period, hop саны, SINR диапазоны) және объектінің басқару сапасы көрсеткіштерін (дәлдік, энергия шығыны, өтпелі процестің ұзақтығы) қамтамасыз ете отырып, СЖБЖ параметрлерін тиімді таңдауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

ҚОРЫТЫНДЫ

Бұл магистрлік диссертациялық жұмыста өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелерінде сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді қолдану мәселесі кешенді түрде зерттелді. Зерттеудің негізгі мақсаты – өнеркәсіптік сымсыз желілік басқару жүйелеріндесенімділік, кідіріс және энергия тиімділігі арасындағы өзара тәуелділікті ескеріп, IEEE 802.15.4 негізіндегі арна моделін, MAC/маршрутизация деңгейлерін және модельдік-болжамды басқаруды (МББ) бірлесіп жобалау арқылы оңтайлы параметрлер аймағын анықтау болды.

Жұмыс барысында өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілерге арналған 2.4 Гц жиілікте жұмыс жасайтын стандартағы протоколдар (IEEE 802.15.4/802.11, ZigBee, WirelessHART, ISA100.11a, 6LoWPAN, RPL, 6TiSCH, LoRaWAN, NB-IoT) салыстырмалы әдебиеттік шолу жасалып, олардың архитектуралық ерекшеліктері, артықшылықтары және нақты уақыттағы басқару талаптары тұрғысынан шектеулері жүйеленді. Талдау нәтижесінде CSMA/CA негізіндегі шешімдер (IEEE 802.15.4, ZigBee) жоғары жүктеме кезінде соқтығысуларға байланысты сенімділік пен кідіріс көрсеткіштерін нашарлататыны, ал TDMA және жиілік бойынша секіру технологияларын қолданатын WirelessHART және ISA100.11a сияқты протоколдар өнеркәсіптік нақты уақыт жүйелері үшін анағұрлым қолайлы екені анықталды.

Зерттеудің маңызды нәтижелерінің бірі – IEEE 802.15.4 (2.4 ГГц DSSS PHY) үшін арна моделінің құрылуы. Бұл модельде жол жоғалту, лог-нормаль көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу және қабылдағыштағы шу әсері ескеріліп, Монте–Карло әдісі арқылы әр түйін үшін SINR және L биттік пакетке арналған пакеттік қате ықтималдығы бағаланды. Нәтижелер қашықтық артқан сайын SINR төмендеп, пакет қателігі ықтималдығының экспоненциалды түрде өсетінін көрсетті; бұл көп-hor маршрутизацияда hor ұзындығын шектеудің практикалық маңызын дәлелдейді.

Single-hor режимінде TDMA және CSMA/CA MAC-сұлбалары үшін пакетті сәтті жеткізу ықтималдығы $p_{s,i}$ есептеліп, пакеттік жоғалтулар Бернулли және Марковтық FSMC модельдері арқылы сипатталды. Салыстырмалы талдау CSMA/CA жағдайында қосымша интерференция мен арнаға бәсекелі қатынау салдарынан пакеттік жоғалтудың айтарлықтай өсетінін көрсетті. Сонымен бірге FSMC моделі арна күйінің уақыт бойынша корреляциясын ескергендіктен, бөрсттік (қатарынан) жоғалтуларды дәлірек бейнелеп, Бернулли моделіне қарағанда жоғалтудың неғұрлым шынайы бағасын беретіндігі анықталды. Бұл нәтиже өндірістік ортадағы көлеңкелік әлсіреу мен кедергілердің баяу өзгеруін есепке алудың қажеттілігін негіздейді.

Multi-hor желі үшін single-hor жоғалтуларға сүйене отырып end-to-end пакеттік жоғалу ықтималдығы $P_{loss,e2eP}$ бағаланды. Нор санының артуы жалпы жоғалтудың экспоненциалды түрде ұлғаюына әкелетіні көрсетілді, яғни «hor саны аз, бірақ SINR төмен» маршрут пен «hor саны көп, бірақ SINR жоғары» маршрут арасында компромисс бар екені дәлелденді. Осыған байланысты со-

design маршрутизация тұжырымдамасы аясында трафикті екі балама маршрут арасында α және $1-\alpha$ үлестерімен бөлу тәсілі ұсынылып, белгілі бір α диапазонында сенімділік талабы $P_{loss,e} \leq 1\% - 5\%$ деңгейінде орындалуы мүмкін екені модельдеу арқылы расталды.

Диссертацияның негізгі ғылыми-практикалық үлесі желілік параметрлерді басқару алгоритмімен бірлесіп оңтайландыруға мүмкіндік беретін МББ-co-design интеграциясы. Мұнда күй векторы ретінде технологиялық объект күйі $x(k)$, түйіндердегі кезек ұзындықтары $q_i(k)$ және арна күйін сипаттайтын $\chi_s(k)$ енгізіліп, басқару векторына таратқыш қуаты $P_{tx,i}(k)$ үлгілеу периоды $T_s(k)$, қайта жіберулер саны $N_{retx}(k)$, MAC және маршрутизация параметрлері $\theta_{MAC}(k), \theta_{route}(k)$ қосылды. Осы негізде сенімділік ($P_{loss,e} \leq 1\% - 5\%$) және кідіріс ($D \leq 100 - 200 D_{mc}$) шектеулерін ескеретін біріктірілген мақсаттық функция ұсынылып, MATLAB ортасында жүргізілген модельдеу нәтижелері МББ негізіндегі параметр бейімдеу жүйенің орнықтылығын сақтай отырып, қадағалау дәлдігін арттыратынын және энергия шығынын төмендетуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Бастапқы өтпелі кезеңде алгоритм сенімділікті арттыру үшін қуатты, қайта жіберуді және дискреттеу жиілігін ұлғайтса, жүйе орныққан сайын бұл параметрлерді төмендетіп, энергия тиімділігін жақсартатыны байқалды.

Жалпы алғанда, жүргізілген зерттеу нәтижелері өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық протоколдарды тиімді қолдану тек байланыс желісінің жеке сипаттамаларымен емес, басқару алгоритмдерімен өзара байланыста қарастырылғанда ғана нақты уақыттағы талаптарды (сенімділік, кідіріс, энергия) толық қанағаттандыра алатынын көрсетті. Ұсынылған IEEE 802.15.4 негізіндегі арна-желі-басқару интеграцияланған моделі және co-design + МББ тәсілі өнеркәсіптік СЖБЖ параметрлерін жобалау мен бейімдеудің тиімді әдістемелік негізін қалыптастырады.

Зерттеуді одан әрі дамыту бағыттары ретінде көпконтурлы (multi-loop) басқару жүйелерін, желі түйіндерінің үлкен масштабын, нақты өндірістік электромагниттік кедергілер картасын, қауіпсіздік және кибершабуылдарға төзімділік (resilience) факторларын, сондай-ақ аппараттық сынақ алаңында WirelessHART/ISA100.11a/TSCH негізіндегі эксперименттік валидация жүргізуді ұсынуға болады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

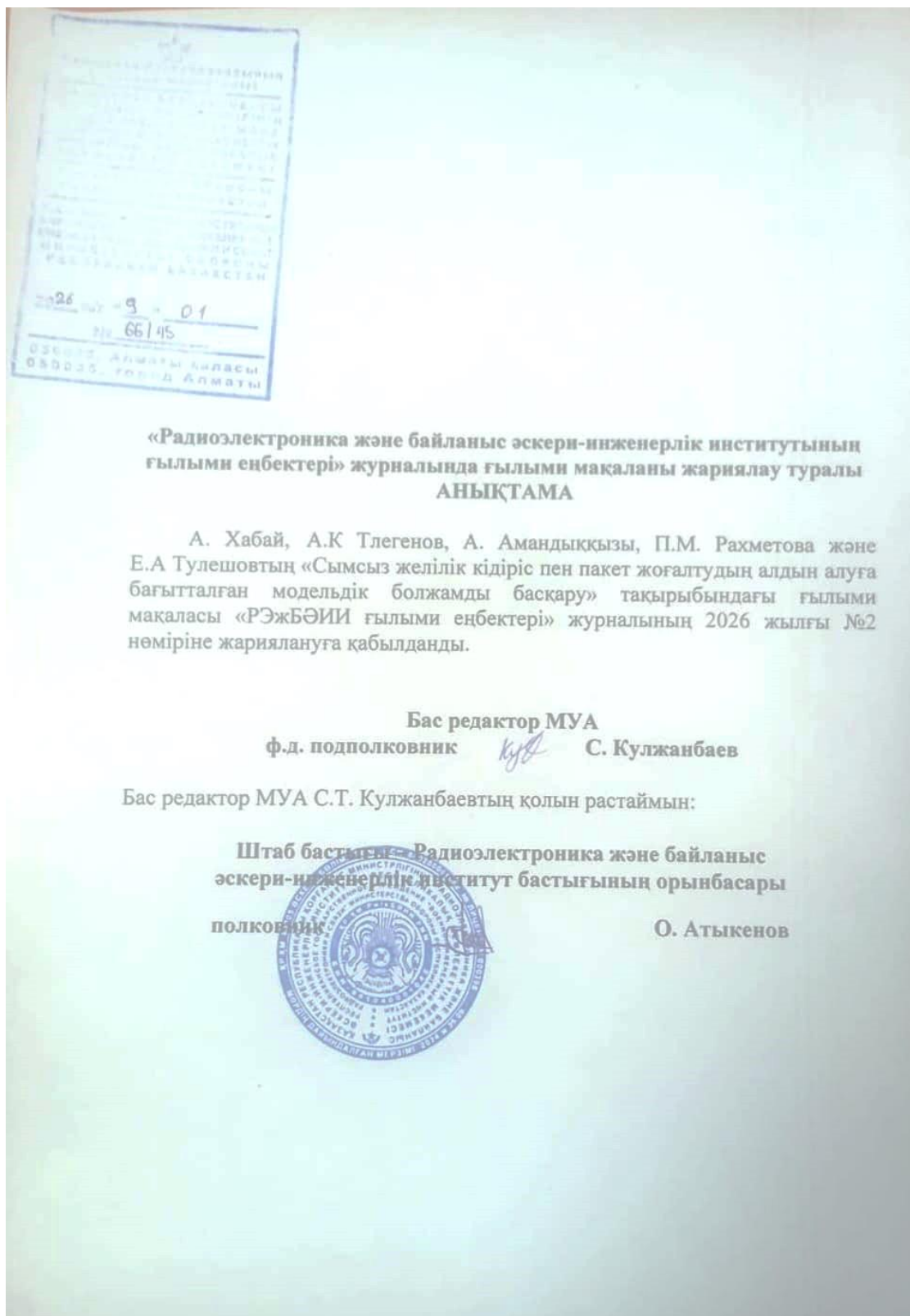
- 1 Kim, B.-S., Kim, S., Kim, K.H., Sung, T.-E., Shah, B., & Kim, K.-I. Adaptive Real-Time Routing Protocol for (m,k)-Firm in Industrial Wireless Multimedia Sensor Networks. *Sensors*, 2020, 20(6), 1633. <https://doi.org/10.3390/s20061633>
- 2 Peng, M., Li, B., Yan, Z., & Yang, M. A Spatial Group-Based Multi-User Full-Duplex OFDMA MAC Protocol for the Next-Generation WLAN. *Sensors*, 2020, 20(14), 3826. <https://doi.org/10.3390/s20143826>
- 3 Lee, W., Kim, T., & Kim, T. Distributed Node Scheduling with Adjustable Weight Factor for Ad-hoc Networks. *Sensors*, 2020, 20(18), 5093. <https://doi.org/10.3390/s20185093>
- 4 Elsharief, M., El-Gawad, M.A.A., Ko, H., & Pack, S. EERS: Energy-Efficient Reference Node Selection Algorithm for Synchronization in Industrial Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 2020, 20(15), 4095. <https://doi.org/10.3390/s20154095>
- 5 Lino, M., Leão, E., Soares, A., Montez, C., Vasques, F., & Moraes, R. Dynamic Reconfiguration of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks to Handle Communication Overloads in Disaster-Related Situations. *Sensors*, 2020, 20(17), 4707. <https://doi.org/10.3390/s20174707>
- 6 Florencio, H., Dória Neto, A., & Martins, D. ISA 100.11a Networked Control System Based on Link Stability. *Sensors*, 2020, 20(18), 5417. <https://doi.org/10.3390/s20185417>
- 7 Qiu, T.; Zhang, Y.; Qiao, D.; Zhang, X.; Wymore, M.L.; Sangaiah, A.K. A Robust Time Synchronization Scheme for Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(8), 3570–3580. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2738842>
- 8 ElSharief, M.; El-Gawad, M.A.A.; Kim, H. FADS: Fast Scheduling and Accurate Drift Compensation for Time Synchronization of Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 2018, 6, 65507–65520. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2878272>
- 9 ElSharief, M.; Abd El-Gawad, M.A.; Kim, H. Low-Power Scheduling for Time Synchronization Protocols in A Wireless Sensor Networks. *IEEE Sensors Letters*, 2019, 3(1), 1–4. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2018.2886339>
- 10 Lino, M.; Leão, E.; Soares, A.; Montez, C.; Vasques, F.; Moraes, R. Dynamic Reconfiguration of Cluster-Tree Wireless Sensor Networks to Handle Communication Overloads in Disaster-Related Situations. *Sensors*, 2020, 20(17), 4707. <https://doi.org/10.3390/s20174707>
- 11 Pezzutto, M.; Rossi, A.; Esposito, F. (2024) Wireless Control: Retrospective and Open Vistas. *Journal of Network and Computer Applications*, 237, 104819. <https://dx.doi.org/10.1016/j.arcontrol.2024.100972>
- 12 Hamdan, M., & Mahmoud, M. S. M. (2022). Analysis and Challenges in Wireless Networked Control System: A Survey. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(3). <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.731>

- 13 Huang, K.; Liu, W.; Li, Y.; Savkin, A.; Vucetic, B. (2020). Wireless Feedback Control with Variable Packet Length for Industrial IoT. arXiv preprint, arXiv:2005.13321. Doi: <https://arxiv.org/abs/2005.13321>
- 14 López-Vilos, J.; Rodríguez, C.; Peña, R.; Fuentes, A. (2021) Performance Analysis of the IEEE 802.15.4 Protocol for WSN under Jamming. Electronics, 10, 2783. <https://doi.org/10.3390/electronics10222783>
- 15 Shi, T.; Guan, Y.; Zheng, Y. (2022) Model predictive control of networked control systems with disturbances and deception attacks under communication constraints. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 35(7), 2717–2735. <https://doi.org/10.1002/rnc.6363>
- 16 Kumatova, M., Tuleshov, A., Baurzhan, A., Jomartov, A., Tuleshov, Y., & Sayakov, O. (2025). Development and validation of an automated crank press system integrating the Stephenson II six-bar linkage and model predictive control. ES Materials and Manufacturing, 30, 1799. <https://doi.org/10.30919/mm1799>
- 17 Lee, M.-F. R.; Chiu, F.-H. S.; Huang, H.-C.; Ivancsits, C. (2013) Generalized Predictive Control in a Wireless Networked Control System. International Journal of Distributed Sensor Networks, 9, 475730. <https://doi.org/10.1155/2013/475730>
- 18 Reyes, L. F. F., Smarra, F., Zacchia Lun, Y., & D’Innocenzo, A. (2021). Learning Markov models of fading channels in wireless control networks: A regression trees based approach. Proceedings of the 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 232–237. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.13280>
- 19 Zhu, Q., Zhang, T., Wang, Y., & Zhao, H. (2022). Enhancing channel contention efficiency in IEEE 802.15.4. Sensors, 22, 5129. <https://doi.org/10.3390/s22145129>
- 20 Silva, R.; Pereira, L.; Santos, D.; Costa, P.; Almeida, J. (2023) A Compensation Model for Packet Loss Using Kalman Filter in WNCS. Energies, 16, 3329. <https://doi.org/10.3390/en16083329>
- 21 Yue, X.; Liu, Y. (2022) Performance Analysis of Intelligent Reflecting Surface Assisted NOMA Networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 21(4), 2623–2636. <https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3114221>
- 22 Jia, Y.; Ye, C.; Cui, Y. (2020) Analysis and Optimization of an Intelligent Reflecting Surface-Assisted System with Interference. IEEE Transactions on Wireless Communications, 19(12), 8068–8082. DOI: [10.1109/TWC.2021.3114221](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3114221)
- 23 Orea-Flores, I. Y.; Rivero-Angeles, M. E.; Gonzalez-Ambriz, S.-J.; Anaya, E. A.; Saleem, S. (2024) Performance Analysis of Wireless Sensor Networks Using Damped Oscillation Functions for the Packet Transmission Probability. Computers, 13(11), 285. <https://doi.org/10.3390/computers13110285>
- 24 Zila, A.; Ouchatti, A.; Mouzouna, Y. (2025) Exploring Node Failure and Packet Loss in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Simulation Analysis. International Journal of Communication Systems, 38(13), e70174. <https://doi.org/10.1002/dac.70174>

- 25 Zacchia Lun, Y.; Rinaldi, C.; D’Innocenzo, A.; Santucci, F. (2024) Co-Designing Wireless Networked Control Systems on IEEE 802.15.4-Based Links Under Wi-Fi Interference. *IEEE Access*, 12, 71157–71183. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3402082>
- 26 T. Vayssade, F. Azais, L. Latorre, and F. Lefèvre. (2019) Low-cost digital test solution for symbol error detection of RF ZigBee transmitters. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 19(1), 16–24. <https://doi.org/10.1109/TDMR.2019.2891950>
- 27 Proakis, J. G., & Salehi, M. (2007). *Digital Communications* (5th ed.). New York, NY, USA: McGraw-Hill
- 28 Chen, D., Zhuang, Y., Huai, J., Sun, X., Yang, X., Javed, M. A., Brown, J., Sheng, Z., & Thompson, J. (2021). Coexistence and interference mitigation for WPANs and WLANs from traditional approaches to deep learning: A review. *IEEE Sensors Journal*, 21(22), 25561–25589. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3117399>
- 29 IEEE. (2020). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (IEEE Std 802.15.4-2020). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9144691>
- 30 A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- 31 F. Barac, M. Gidlund, and T. Zhang, “Scrutinizing bit- and symbol-errors of IEEE 802.15.4 communication in industrial environments,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 7, pp. 1783–1794, 2014. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2293235>
- 32 Barac, F., Gidlund, M., & Zhang, T. (2014). Scrutinizing bit- and symbol-errors of IEEE 802.15.4 communication in industrial environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(7), 1783–1794. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2293235>
- 33 Stüber, G. L. (2017). *Principles of mobile communication* (4th ed.). Springer.
- 34 Yang, D., Xu, Y., & Gidlund, M. (2011). Wireless coexistence between IEEE 802.11- and IEEE 802.15.4-based networks: A survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 7, 912152. <https://doi.org/10.1155/2011/912152>
- 35 Barac, F., Gidlund, M., & Zhang, T. (2014). Scrutinizing bit- and symbol-errors of IEEE 802.15.4 communication in industrial environments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(7), 1783–1794. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2293235>
- 36 1. Brown, J., Roedig, U., Boano, C. A., & Römer, K. U. (2014). Estimating packet reception rate in noisy environments. *2014 IEEE 39th Conference on Local Computer Networks Workshops (LCN Workshops)*, 583–591. <https://doi.org/10.1109/LCNW.2014.6927706>
- 37 Ayan, O., Gürsu, H. M., Papa, A., & Kellerer, W. (2020). Probability analysis of age of information in multi-hop networks. *IEEE Networking Letters*, 2(2), 76–80. <https://doi.org/10.1109/LNET.2020.2976991>

38 Satoh, D., Kobayashi, K., & Yamashita, Y. (2018). МББ-based co-design of control and routing for wireless sensor and actuator networks. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16(3), 953–960. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0170-7>

ҚОСЫМША А



Сурет А1 – Қабылданған мақаланың анықтамасы

**«7M06202 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының
магистранты**

Тлегенов Асхат Калдыбаевич

**магистрлік диссертациясына
СЫН-ПІКІР**

**Тақырыбы: «Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық
байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу»**

Тлегенов Асхат Қалдыбайұлы ұсынылған диссертациялық жұмыс өнеркәсіптік автоматтандыру жүйелеріндегі сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді қолдану мәселесіне арналған. Тақырып қазіргі таңда Industrial IoT, кибер-физикалық жүйелер және өндірістік процестерді цифрландыру бағыттарының қарқынды дамуына байланысты өзекті болып табылады. Жұмыста сымсыз сенсорлық желілерді басқару протоколдардың архитектуралық ерекшеліктері мен шектеулеріне шолу жасады. 2,4 ГГц диапазонында жұмыс істейтін стандарттарға негізделген физикалық арна әсерлері (жол жоғалту, көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу, қабылдағыш шу) кешенді түрде қарастырылған. Әрбір түйін үшін сигнал/кедергі+шу қатынасы (SINR) және L-биттік пакет қателігінің ықтималдығы Монте-Карло әдісі арқылы бағаланып, тиісті нәтижелер алынды.

Байланыс сенімділігін арттыру үшін модельдік-болжамды басқару әдісі мен желі параметрлерін бірлесіп оңтайландыруға негізделген мақсаттық функция құрып, онда қадағалау қатесі, энергиясыны басқару, пакеттік жоғалту және желілік кідіріс параметрлері толық ескерілді, осы негізде MATLAB ортасында модельдеу жүргізіп алынған нәтижелер ұсынылған тәсілдің сенімділін көрсетті. СЖБЖ параметрлерінің талапқа сай аймағын анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Болашақта бұл жұмыс 2,4 ГГц жиілік диапазонында жұмыс істейтін сымсыз байланыс протоколдарын практикалық сынақтан өткізу қажет.

Жалпы алғанда, диссертация жоғары ғылыми деңгейде орындалған, зерттеу нәтижелері нақты және дәйекті түрде баяндалған. Сондықтан бұл жұмысты жоғары бағалап, магистрлік диссертацияны "өте жақсы" (A+, 95%) деген бағаға лайық деп санаймын және қорғауға ұсынамын.

Пікір беруші:

**Ғылыми жетекшісі,
қауымд.профессор, PhD**

«20» _____ 2026 ж.



Хабай А

**«7M06202 – Телекоммуникация» білім беру бағдарламасының
магистранты**

Тлегенов Асхат Қалдыбаевич

**магистрлік диссертациясына
СЫН-ПІКІР**

**Тақырыбы: «Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық
байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу»**

Тлегенов Асхат Қалдыбаевичтің магистрлік диссертацияда 2,4 ГГц лицензиясыз диапазонында жұмыс істейтін өнеркәсіптік сымсыз сенсорлық желілер үшін негізгі протоколдар мен стандарттарға әдебиеттік шолу жасалынған. Жұмыстың маңызды бөлігі ретінде физикалық арна факторлары (жол жоғалту, көлеңкелік әлсіреу, қуат басқару қатесі, көпсәулелі өшу, қабылдағыш шуы) ескеріліп, әр түйін үшін SINR және L-биттік пакет қате ықтималдығы Монте–Карло әдісімен бағаланған. Сонымен қатар арнаның пакеттік жоғалтулары Бернуллі және Марковтық модельдерімен сипатталған. Бұл тәсіл жоғалтулардың уақыттық корреляциясын және оның желілік басқаруға ықпалын салыстырмалы бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеудің ғылыми жаңашылдығы мен қолданбалы мәні модельдік-болжамды басқаруды желілік параметрлермен бірлесіп жобалау идеясына негізделген. Магистрант қадағалау қатесін, басқару энергиясын, пакеттік жоғалтуды және желілік кідірісті бір мезетте ескеретін біріктірілген мақсаттық функция ұсынған, сол негізде MATLAB ортасында имитациялық модельдеу жүргізген. Алынған нәтижелер ұсынылған тәсілдің сенімділін кідіріс, энергия және пакеті жоғалтуды азайту тиімділігін дәлелдеп СЖБЖ параметрлерінің талапқа сай аймағын анықтауға мүмкіндік беретінін көрсетеді.

Жалпы алғанда, диссертация жоғары ғылыми деңгейде орындалған, зерттеу нәтижелері нақты және дәйекті түрде баяндалған. Сондықтан бұл жұмысты жоғары бағалап, магистрлік диссертацияны "өте жақсы" (А+, 95%) деген бағаға лайық деп санаймын және қорғауға ұсынамын.

Пікір беруші,
Energo university,
«Телекоммуникациялық
инженерия» кафедрасының
профессоры, PhD

 Ермекбаев М.М.
«20» 01 2026 ж.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлегенов Асхат Калдыбаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу

Научный руководитель: Анар Хабай

Коэффициент Подобия 1: 3.8

Коэффициент Подобия 2: 0.8

Микропробелы: 46

Знаки из здругих алфавитов: 84

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

19.01.2026

Дата: 



Заведующий кафедрой



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Тлегенов Асхат Калдыбаевич

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу

Научный руководитель: Анар Хабай

Коэффициент Подобия 1: 3.8

Коэффициент Подобия 2: 0.8

Микропробелы: 46

Знаки из других алфавитов: 84

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

19.01.2026
Дата



Маркұлы С.
проверяющий эксперт

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Тлегенов Асхат Калдыбаевич

Тақырыбы: Өнеркәсіптік автоматтандыруда сымсыз сенсорлық байланыс протоколдарын тиімді пайдалануды зерттеу

Жетекшісі: Анар Хабай

1-ұқсастық коэффициенті (30): 3.8

2-ұқсастық коэффициенті (5): 0.8

Дәйексөз (35): 0.6

Әріптерді ауыстыру: 84

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 46

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

☒ Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

☐ Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

☐ Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

19.01.2026
Күні



Кафедра меңгерушісі

