RELIABILITY AND POWER CONTROL IN INDUSTRIAL AND PUBLIC WIRELESS NETWORKS: STATE OF THE ART AND RESEARCH FRAMEWORK

VLADIMIR I. TODOROV

ABSTRACT: *The paper reviews the current state of reliability assurance and transmit-power control in industrial and public wireless networks. It compares deterministic low-power networks, industrial wireless standards, Wi-Fi 7, private 5G/5G-Advanced and emerging IMT-2030 concepts. The analysis identifies a persistent multi-objective trade-off among packet delivery reliability, latency, energy consumption, coverage and coexistence. A research framework is proposed that combines reproducible simulation, controlled experiments and adaptive power-control algorithms. The planned evaluation uses packet delivery ratio, outage probability, latency percentiles, energy per successfully delivered bit, network lifetime and fairness. The expected contribution is a context-aware method that maintains application-specific dependability while reducing unnecessary transmit power and interference.*

KEYWORDS: *industrial wireless networks, reliability, power control, energy efficiency, TSCH, 5G-Advanced, Wi-Fi 7, IMT-2030.*

DOI: https://doi.org/10.46687/JLFT4368

НАДЕЖДНОСТ И УПРАВЛЕНИЕ НА МОЩНОСТТА В БЕЗЖИЧНИ ИНДУСТРИАЛНИ И ОБЩЕСТВЕНИ МРЕЖИ: АКТУАЛНО СЪСТОЯНИЕ И ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА РАМКА

Владимир И. Тодоров

АБСТРАКТ: *Докладът представя обзор на актуалното състояние на методите за осигуряване на надеждност и управление на предавателната мощност в безжични индустриални и обществени мрежи. Съпоставени са детерминираните мрежи с ниска консумация, индустриалните стандарти, Wi-Fi 7, частните 5G/5G-Advanced мрежи и концепциите за IMT-2030. Изведен е многокритериалният компромис между надеждност, закъснение, енергопотребление, покритие и съвместно използване на спектъра. Предложена е рамка на планираното дисертационно изследване, включваща симулации, контролирани експерименти и адаптивни алгоритми за управление на мощността.*

Въведение

Безжичната свързаност постепенно се превръща от допълваща в основна комуникационна инфраструктура за индустриална автоматизация, логистика, интелигентни сгради, транспорт, здравеопазване и обществени услуги. Предимствата - мобилност, по-ниска цена за разгръщане и лесна реконфигурация - се съчетават с променлив радио канал, интерференция, ограничен енергиен ресурс и различни изисквания към качеството на услугата. Поради това надеждността не следва да се разглежда единствено като среден коефициент на доставени пакети, а като съвкупност от безотказност, наличност, предвидимо закъснение, устойчивост и възстановимост [1, 2].

Предавателната мощност е един от най-пряко управляемите ресурси. Повишаването ѝ обикновено подобрява отношението сигнал/шум и вероятността за успешно приемане, но увеличава консумацията, взаимната интерференция и риска от небалансирани връзки. Прекомерното намаляване спестява енергия само привидно, когато води до повторни предавания и загуба на пакети. Целта на настоящия доклад е:

1) да систематизира състоянието на основните технологични направления към 2026 г.;
2) да очертае нерешените проблеми;
3) да формулира проверима рамка за бъдещото дисертационно изследване.

Обзорът има аналитичен характер и обединява стандарти, архитектурни документи и изследвания, свързани с надеждна и енергийно ефективна комуникация. Под „обществени мрежи“ тук се разбират предимно безжичен достъп в кампуси и публични пространства и инфраструктура за градски сензорни услуги. Разглеждането им заедно с индустриалните мрежи позволява да се изследва общият механизъм на управление на мощността при различни критерии за качество. Докладът не представя завършени собствени експерименти; формулираните хипотези и сценарии определят програмата за последваща проверка.

1. Показатели и фактори за надеждност

За поток от N изпратени и N_s успешно доставени пакети базовият показател е (1) $PDR = N_s/N$. За критични приложения той трябва да се допълва с вероятност за прекъсване (2) $P_{out} = Pr\{\gamma < \gamma_{th}\}$, където γ е моментното SINR, с квантилите на закъснението L95 и L99, с джитър и с времева наличност (3) $A = MTBF/(MTBF + MTTR)$. Енергийната цена на полезната комуникация може да се определи като (4) $E_{bit} = E_{total}/B_{success}$, където $B_{success}$ е броят успешно доставени полезни битове. Тези показатели позволяват да се различи висока средна производителност от действително предвидимо поведение.

Надеждността се влияе от затихване и засенчване, многолъчево разпространение, движение на хора и машини, електромагнитен шум, натоварване на канала, скрити възли, маршрутизация, времева синхронизация, откази на оборудване и кибератаки. В индустриална среда металните повърхности създават силно времево и честотно селективен канал. В обществени мрежи доминират гъстотата на потребителите, хетерогенният трафик, мобилността и съвместното използване на нелицензиран спектър.

За целите на изследването ще се използва и показател за доставка в срок: (5) $R_D = N_D/N$, където N_D е броят уникални пакети, получени преди приложния краен срок D. Така пакет, доставен след срока, не се отчита като успешен за критичната услуга, дори да участва в общия PDR. Ще се измерват също най-дългата поредица от загуби и продължителността на прекъсванията. Два потока с еднакъв PDR могат да имат различно практическо поведение, ако при единия загубите са изолирани, а при другия са групирани във времето.

Енергийният модел ще включва предаване, приемане, изчакване, сън и обработка на управляващите съобщения. Намаляването на излъчваната радиочестотна мощност не е тъждествено на същото намаление на консумираната електрическа мощност. Поради това E_{total} ще се оценява чрез измерване на тока и напрежението или чрез предварително калибриран модел на състоянията. Границата на измерване ще бъде посочвана изрично: отделен възел, радиомодул или цялата наблюдавана мрежа. За потоци без успешно доставени битове E_{bit} няма крайна стойност и ще се отчита като отказ, а не като нулево потребление.

2. Актуално състояние на технологиите

IEEE 802.15.4 TSCH съчетава времеви слотове и прескачане на честотни канали. Така колизиите се ограничават чрез разписание, а честотното разнообразие намалява влиянието на устойчиви смущения. Архитектурата 6TiSCH интегрира TSCH с IPv6 и дефинира механизми за управление на клетки и маршрути [3, 4]. WirelessHART и ISA100.11a използват сходни принципи - синхронизация, канално прескачане, многопътна маршрутизация и централизирано планиране - и остават приложими при бавни процеси и захранвани с батерии датчици [5, 6]. Ограниченията са малката полезна скорост, цената на синхронизацията и трудната адаптация при бързо изменяща се топология.

Wi-Fi 6/6E и Wi-Fi 7 разширяват капацитета чрез OFDMA, пространствено повторно използване, 6 GHz спектър и многолинкова работа. IEEE 802.11be позволява едновременно или координирано използване на няколко връзки, което може да понижи закъснението и да осигури резервираност, но ефектът зависи от натоварването и начина на разпределяне на пакетите [7, 8]. Разработваният IEEE 802.11bn насочва фокуса към ultra-high reliability. За обществен достъп Wi-Fi остава икономичен, но конкуренцията в нелицензиран спектър затруднява строгите гаранции.

3GPP дефинира изисквания за киберфизично управление и вертикални приложения, включително периодичен детерминиран трафик, висока наличност и ограничено закъснение [9]. Частните 5G мрежи предлагат контролирано покритие, ресурсна изолация, URLLC механизми и интеграция с Time-Sensitive Networking. 5G-Advanced разширява позиционирането, sidelink, RedCap устройства, индустриалния IoT и енергийната ефективност. Цената, сложността и зависимостта от спектър и инфраструктура обаче ограничават приложимостта за малки обекти.

LoRaWAN и клетъчните LPWAN технологии обслужват разпръснати датчици с малък трафик. Те постигат голямо покритие и дълъг живот на батерията чрез ниска скорост, duty-cycle режими и адаптивна скорост на данните, но не са универсално решение за затворени контури с малко закъснение [10]. За обществени мрежи са подходящи при измерване, мониторинг и алармени съобщения, когато ограниченията на достъпа до канала и вероятността от колизии са отчетени.

Рамката IMT-2030 поставя наред с капацитета устойчивост, повсеместно покритие, изкуствен интелект и интегрирано наблюдение [11]. Към 2026 г. 6G е етап на изследвания и предварителна стандартизация, затова твърденията за конкретни гарантирани параметри следва да се разглеждат като цели, а не като налични експлоатационни характеристики. Перспективни средства са многосвързаността, edge intelligence, реконфигурируемите интелигентни повърхности, интегрирането на комуникация и сензинг и семантичното управление на ресурси.

Практическата полза от многолинковата работа изисква внимателно разпределяне на трафика. Изследването на Carrascosa и съавтори [8] показва, че при нееднаква заетост на връзките неподходящото предварително насочване на пакетите може да увеличи закъснението. Следователно броят налични връзки сам по себе си не е достатъчен критерий за надеждност. За настоящото изследване това мотивира съвместно наблюдение на натоварването, повторните предавания и срока за доставка, преди да се вземе решение за промяна на мощността.

3. Съпоставка и нерешени проблеми

Таблица 1. Съпоставка на основните технологични направления

Технология	Силна страна	Ограничение	Типичен обхват	Роля на мощността
TSCH / 6TiSCH	Детерминиран достъп и честотно разнообразие	Синхронизация и планиране	Индустриални датчици	Баланс между връзкова надеждност и живот на батерията
WirelessHART / ISA100.11a	Многопътност и зряла индустриална интеграция	Ограничена скорост и специфична инфраструктура	Процесна автоматизация	Контрол на връзката и повторните предавания
Wi-Fi 6/7	Висок капацитет и достъпна екосистема	Нелицензиран спектър и недетерминиран достъп	Обществени и кампусни мрежи	Намаляване на интерференцията и енергията
Частна 5G/5G-Advanced	Изолация, QoS и мобилност	Цена и сложност	Фабрики, логистика, кампуси	Съвместна оптимизация с график и beamforming
LoRaWAN / LPWAN	Голям обхват и ниска консумация	Малък капацитет и високо закъснение	Градски и отдалечени датчици	ADR, покритие и airtime

Нито една технология не оптимизира едновременно надеждност, крайно закъснение, енергия, цена и мащабируемост. За целите на настоящото изследване е необходим общ експериментален подход, който да позволява съпоставимо сравнение при еднакъв трафик, радиосреда и критерии за отказ. Значима празнина е управлението на мощността според контекста: критичност на потока, остатъчна енергия, качество на връзката, интерференция и налична резервна връзка. Методи, оптимизиращи само RSSI или среден PDR, могат да влошат опашката на разпределението на закъснението и надеждността на най-неблагоприятните възли.

3.1. Подходи за управление на предавателната мощност

За сравнителната оценка се разграничават три базови подхода. При фиксирана мощност настройката се избира предварително и не следва краткосрочните изменения на канала. Този режим е прост и възпроизводим, но може да изразходва излишна енергия при добри условия. При управление по праг мощността се променя според измерен RSSI, SINR или PDR. Предимството е малката изчислителна сложност, а основен риск е честото превключване около прага, особено когато оценките се основават на малък брой пакети.

Третият подход използва няколко показателя и ограничения, свързани с приложението. За предложената рамка се предвижда контролер с обратна връзка, който оценява състоянието за времеви прозорец и избира допустимо дискретно ниво на мощност. При достатъчен запас по надеждност той ще проверява възможността за намаление; при нарушение на сроковете ще възстановява последната устойчива настройка. Хистерезисът и минималното време между две промени ще ограничават колебанията. Параметрите на тази логика ще бъдат експериментално определени, а не приемани като универсални константи.

Локалното решение трябва да се оценява и спрямо съседите. Едновременното увеличаване на мощността от много възли може да задълбочи интерференцията, без да подобри общата доставка. Обратно, по-ниската мощност може да създаде асиметрия между данните и потвържденията. Затова ще се наблюдават двупосочната достижимост и

резултатите за най-неблагоприятния поток. Когато причината за загубите е претоварване, промяната на мощността може да е недостатъчна; такива случаи ще се разглеждат отделно от влошаването на радиоканала.

4. Формулиране на изследователския проблем

Основният изследователски въпрос е: може ли адаптивното управление на предавателната мощност, съобразено с критичността на трафика и състоянието на канала, да намали енергопотреблението и интерференцията, без да нарушава зададени ограничения за надеждност и закъснение? Работната хипотеза е, че комбиниран показател, използващ краткосрочна оценка на SINR/PDR, брой повторни предавания, натоварване на канала и остатъчна енергия, ще превъзхожда фиксирана мощност и еднопоказателно управление при динамична среда.

Задачата се формулира като многокритериална оптимизация: минимизиране на (6) $J = w_1(Ebit/Eref) + w_2(Pout/Pref) + w_3(L99/Lref) + w_4(I/Iref)$, при ограничения $PDR \geq PDRmin$, $R_D \geq Rmin$, $L99 \leq Lmax$ и $Ptx,min \leq Ptx \leq Ptx,max$. Тук I е оценка на причинената интерференция, а положителните референтни стойности правят компонентите безразмерни. Теглата w_i са неотрицателни със сума единица и се задават според приложението. Вместо една универсална стойност ще се търси Pareto-множество и правило за избор според профила: критичен контрол, мониторинг или обществен достъп.

Работната хипотеза ще се раздели на две проверими твърдения. H1: при еднакви ограничения за доставка в срок адаптивният контрол намалява енергията за успешно доставен бит спрямо предварително калибрирана фиксирана мощност. H2: при промяна на интерференцията комбинираният контролер ограничава продължителността на нарушенията по-добре от управление само по RSSI. Хипотезите ще се оценяват по сценарии; подобрение в един режим няма да се представя като доказателство за универсално превъзходство.

5. Планирана методика

Изследването се планира в три взаимно проверяващи се равнища. Първо ще бъде изграден възпроизводим симулационен модел с логване на пакетно ниво. Второ ще се проведат контролирани измервания с реални устройства в лабораторна и представителна вътрешна среда. Трето ще се реализира прототип на адаптивен контролер и ще се сравни с базови стратегии при идентични сценарии и начални условия.

Таблица 2. Етапи на планираното изследване

Етап	Дейности	Показатели	Резултат
1. Модел и базова линия	Фиксирана мощност; различни натоварвания, топологии и канали	PDR, Pout, L95/L99, Ebit	Проверен референтен модел
2. Чувствителност	Затихване, смущения, мобилност, честота на пакетите	Еластичност на показателите; доверителни интервали	Карта на доминиращите фактори
3. Адаптивен алгоритъм	Правила, оптимизация и лека ML алтернатива	Целева функция J; стабилност; overhead	Контролер с ограничена сложност
4. Експеримент	Повтаряеми лабораторни и реалистични сценарии	Същите KPI и енергийно измерване	Емпирична валидация
5. Обобщение	Сравнение по клас приложения	Pareto фронт; статистическа значимост	Практически препоръки

За всяка конфигурация ще се използват множество независими повторения и предварително определен период на загряване. Ще се публикуват параметрите, началните стойности на генераторите и скриптовете за обработка. Освен средни стойности ще се представят медиана, 95% доверителни интервали и високи квантили. При сравнение на алгоритми ще се прилагат подходящи параметрични или непараметрични тестове и размер на ефекта. Това ограничава риска случайни благоприятни реализации да бъдат интерпретирани като устойчиво подобрение.

5.1. Експериментални сценарии и базови стратегии

Планират се три сценария: стационарни индустриални датчици с периодични пакети; вътрешна среда с временно засенчване и включване на смущаващ източник; обществен достъп с променлив брой активни потребители и смесен трафик. Първо факторите ще се изменят поотделно, а след това ще се изследват избрани комбинации. За всяко изпълнение ще се фиксират топологията, размерът на полезния товар, интервалът на генериране, допустимите повторни предавания и началната настройка на мощността.

Базовите стратегии ще бъдат фиксирана максимална допустима мощност, фиксирана мощност след предварително калибриране и адаптация по един показател с хистерезис. Сравнението само с максимална мощност би могло да преувеличи ползата от новия алгоритъм. Всички стратегии ще работят при еднакви ограничения на достъпа до канала и еднакъв приложен трафик. При налична автоматична адаптация на скоростта тя ще бъде конфигурирана еднакво и документирана, за да не се приписва нейният ефект на управлението на мощността.

За контролера ще се регистрират моментът на решението, входните оценки, избраната мощност и причината за промяната. При недостатъчно наблюдения той ще запазва консервативна настройка, вместо да намалява мощността върху нестабилна оценка. Изпълнението ще използва действително поддържаните от устройствата нива. Границите на допустимата мощност ще се задават според конкретната платформа и условията на експеримента, а не чрез произволно непрекъснато управление.

5.2. Валидност и критерии за оценка

Подобрение ще се приема само когато енергийният ефект се запазва при изпълнени ограничения за надеждност и закъснение. Ще се отчитат както относителната промяна

спрямо базовата стратегия, така и абсолютните стойности и доверителните интервали. Резултатите ще се анализират по отделни възли и потоци, за да не се прикрива влошаване на периферните устройства чрез добра средна стойност за мрежата. Чувствителността към дължината на наблюдавания прозорец и честотата на решенията ще бъде част от оценката на устойчивостта.

При редки откази продължителността на изпитването е съществена. Например при независими изпитвания и нула наблюдавани откази едностранната 95% горна граница за вероятността за отказ е приблизително 3/N. За граница от порядък 10^{-5} са необходими около 300 000 независими наблюдения. Реалните пакети често са времево зависими, поради което броят им не може автоматично да се приема за брой независими изпитвания. Ще се използват независими серии и анализ на групираните загуби; липсата на отказ в кратък тест няма да се тълкува като доказана свръхвисока надеждност.

6. Очаквани научни и приложни резултати

Очакваните резултати са: унифицирана система от показатели за съпоставка на хетерогенни безжични мрежи; модел на зависимостите между мощност, надеждност, закъснение и енергия; адаптивен алгоритъм с явни ограничения за QoS; експериментално валидиран прототип; и препоръки за избор на стратегия според приложението. Научният принос се търси не в максимизиране на единичен показател, а в доказуемо управление на компромиса и устойчивост при промяна на условията.

Планираната работа е приложима както към индустриални мрежи с предвидим периодичен трафик, така и към обществени мрежи с променлива плътност. За да не се смесват несъпоставими режими, резултатите ще се групират по клас трафик и технологично семейство. Общият алгоритмичен принцип ще се оценява върху повече от една платформа, но параметрите и ограниченията ще бъдат калибрирани отделно.

Основните ограничения са достъпността на измервателна апаратура, точността на синхронизацията и различията между симулационните модели и реалната среда. Затова първоначалната валидация ще обхване ограничен брой платформи и ясно описани сценарии. Отрицателните резултати също ще бъдат съществени: те ще покажат кога разходът за наблюдение и управление надвишава спестяването, кога липсва запас за намаляване на мощността и кога е необходима промяна на друг мрежов ресурс.

Заключение

Към 2026 г. надеждността на безжичните индустриални и обществени мрежи се осигурява чрез комбинация от времево и честотно разнообразие, резервиране, контрол на достъпа, многосвързаност, QoS и адаптивно управление на ресурсите. Тенденцията е от локална оптимизация на радиовръзката към цялостна dependability рамка, включваща наличност, сигурност, устойчивост и енергийна ефективност [1, 11]. Управлението на мощността е ключов, но не самостоятелен механизъм: ефектът му зависи от графика, маршрута, трафика и съседните мрежи. Предложеното изследване ще провери при какви условия контекстно адаптивният контрол намалява енергията и интерференцията при запазени ограничения за надеждност и закъснение.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Mahmood, N. H., Lopez, O. L. A., Ruiz-Guirola, D., Burkhardt, F., Rasti, M., Latva-aho, M. Dependable Connectivity for Industrial Wireless Communication Networks. arXiv:2601.20580 (2026).

[2] Popovski, P., Trillingsgaard, K. F., Simeone, O., Durisi, G. 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. IEEE Access, 6 (2018), 55765-55779. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2872781.

[3] IEEE. IEEE Std 802.15.4-2020: Low-Rate Wireless Networks. IEEE, New York (2020). DOI: 10.1109/IEEESTD.2020.9144691.

[4] Thubert, P. (Ed.). Architecture for IPv6 over the TSCH Mode of IEEE 802.15.4. IETF RFC 9030 (2021). DOI: 10.17487/RFC9030.

[5] IEC. IEC 62591:2016. Industrial communication networks - Wireless communication network and communication profiles - WirelessHART. IEC, Geneva (2016).

[6] IEC. IEC 62734:2014. Industrial networks - Wireless communication network and communication profiles - ISA 100.11a. IEC, Geneva (2014).

[7] IEEE. IEEE Std 802.11be-2024: Enhancements for Extremely High Throughput (EHT). IEEE, New York (2025).

[8] Carrascosa, M., Geraci, G., Knightly, E., Bellalta, B. Wi-Fi Multi-Link Operation: An Experimental Study of Latency and Throughput. IEEE/ACM Transactions on Networking (2024).

[9] 3GPP. TS 22.104, Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains, Release 18. 3rd Generation Partnership Project (2024).

[10] LoRa Alliance. LoRaWAN L2 1.0.4 Specification. LoRa Alliance Technical Committee (2020).

[11] ITU-R. Recommendation M.2160-0: Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. International Telecommunication Union, Geneva (2023).

[12] Aijaz, A. High-Performance Industrial Wireless: Achieving Reliable and Deterministic Connectivity over IEEE 802.11 WLANs. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 1 (2020), 28-37. DOI: 10.1109/OJIES.2020.2984157.

[13] Shariatmadari, H., Ratasuk, R., Iraji, S., Laya, A., Taleb, T., Jantti, R., Ghosh, A. Machine-type communications: current status and future perspectives toward 5G systems. IEEE Communications Magazine, 53 (9) (2015), 10-17. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263367.

[14] López-Raventós, Á., Bellalta, B. Multi-link Operation in IEEE 802.11be WLANs. IEEE Wireless Communications, 29 (4) (2022), 94-100.

Владимир Иванов Тодоров
Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“, Факултет по математика и информатика
E-mail: v.todorov@shu.bg