

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

Нікольський В. В., д.т.н., професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: prof.nikolskyi@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8123-4233;

Слободянюк М. В., к.т.н., доцент, старший викладач кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: nikgavr1234@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2248-0255;

Левінський М. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: maxlevinskyi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6544-5110;

Нікольський М. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: markdezert@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3387-7402.

У роботі представлено результати дослідження ефективності впровадження бездротової системи моніторингу для суднових дизельних енергетичних установок у контексті оптимізації їхньої експлуатації та підвищення надійності. Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення безперервного контролю критичних параметрів дизелів, зокрема температури та тиску в системі охолодження, для запобігання аваріям і зменшення експлуатаційних витрат. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний методологічний підхід, що включає аналіз вимог, розробку апаратно-програмного комплексу, проведення експериментів та оцінку ефективності. Об'єктом дослідження обрано аварійний дизель-генератор Kohler 50EOZD, на базі якого реалізовано систему з датчиками, модулями передачі даних (Wi-Fi, PROFINET) і контролером PLCnext Control AXC F 2152. Отримано точні показники температури ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) та тиску ($\pm 0,1$ бара) у режимі реального часу. Аналіз експериментальних даних дозволив встановити оптимальний температурний діапазон $80\text{--}95^\circ\text{C}$ і тисковий режим $1,5\text{--}2,5$ бара, дотримання яких сприяє зниженню витрати палива на $5\text{--}7\%$ та викидів CO_2 на $4\text{--}6\%$. Впровадження предиктивного обслуговування скоротило простої на $10\text{--}15\%$ та збільшило ресурс обладнання на $20\text{--}25\%$. Розроблений веб-інтерфейс забезпечив зручний доступ до системи через мобільні пристрої. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження бездротових технологій у морській галузі та створюють основу для подальшого розвитку інтегрованих інформаційних систем управління судновими енергетичними установками. Такі системи також можуть бути адаптовані для використання в інших видах транспорту або на стаціонарних енергетичних об'єктах, що робить запропоновану концепцію універсальною.

Ключові слова: дизель-генератор; смарт-технології; дистанційне керування; бездротові системи моніторингу; автоматичне керування; інтегровані системи управління.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.080-091

Вступ. Сучасне судноплавство перебуває на етапі глибоких трансформацій, обумовлених необхідністю відповідати вимогам, що зростають до енергоефективності, екологічної стійкості та технічної надійності морських перевезень. Впровадження інноваційних технологій стало пріоритетним завданням галузі в умовах глобальних змін клімату, підвищеної уваги до охорони навколишнього середовища та посилення міжнародного нормативного регулювання.

Зокрема, посилення вимог Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зниження шкідливих викидів, включаючи парникові гази, та запровадження індексів енергоефективності (Energy Efficiency Design Index – EEDI, Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI) стимулюють судновласників і суднобудівні компанії до активного впровадження технологій моніторингу, управління та цифровізації енергетичних процесів на борту суден.

У цьому контексті особливого значення набуває підвищення ефективності функціонування суднових дизельних двигунів, які є основними силовими установками на

понад 90% комерційних суден світового флоту. Надійність, паливна економічність і екологічні характеристики цих агрегатів безпосередньо впливають на вартість експлуатації судна, рівень шкідливих викидів та загальну безпеку мореплавства.

Удосконалення систем керування та моніторингу технічного стану суднових енергетичних установок, зокрема з використанням бездротових сенсорних мереж, мобільних платформ і дистанційного доступу до експлуатаційних параметрів, відкриває нові можливості для їх оптимізації. Такі підходи дозволяють реалізувати концепції превентивного обслуговування, знижувати ризики відмов обладнання та забезпечувати адаптивне управління в реальному часі.

Ураховуючи зазначене, дослідження можливостей впровадження сучасних цифрових технологій у систему управління судновими дизельними установками є актуальним і своєчасним завданням, що має як наукову, так і практичну значущість для морської галузі.

Постановка проблеми в загальному вигляді. У сучасних умовах інтенсивного розвитку морського транспорту та вимог, що зростають до енергоефективності й безпеки експлуатації суден особливої актуальності набуває питання підвищення надійності та ефективності контролю технічного стану суднових дизельних енергетичних установок. Наявні підходи до моніторингу їх роботи, що здебільшого базуються на використанні традиційних стаціонарних вимірювальних засобів та проведенні періодичних технічних оглядів, мають низку суттєвих обмежень. Зокрема, ці системи характеризуються дискретністю збору даних та недостатньою оперативністю у виявленні змін параметрів, що унеможливорює своєчасне реагування на критичні відхилення в роботі двигуна.

Наслідком таких технічних обмежень є зниження загальної ефективності функціонування силових установок, зростання ризику позапланових ремонтів, підвищення експлуатаційних витрат, а також загроза виникнення аварійних ситуацій, які можуть спричинити шкоду як технічному стану судна, так і безпеці екіпажу. Брак інтеграції сучасних цифрових технологій у процеси моніторингу та управління обмежує можливості модернізації енергетичних систем суден у напрямі автоматизації та дистанційного керування.

У цьому контексті виникає нагальна потреба у впровадженні новітніх технічних рішень, здатних забезпечити безперервний моніторинг технічного стану суднових дизельних агрегатів у режимі реального часу, із можливістю дистанційного аналізу параметрів, прогнозування технічного ресурсу та оперативного управління. Такий підхід є ключовим елементом у переході до цифрових стандартів експлуатації суднових енергетичних систем, що відповідає загальним тенденціям розвитку судноплавства в умовах Четвертої промислової революції.

У зв'язку з цим доцільним є аналіз сучасного стану досліджень і технологічних розробок у сфері інтелектуалізації та цифровізації процесів моніторингу та управління судновими енергетичними установками, зокрема із застосуванням бездротових сенсорних мереж, мобільних платформ і систем дистанційного доступу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний розвиток морської індустрії характеризується інтенсивним впровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та безпеки експлуатації суднових енергетичних установок. Особливе місце в цьому процесі займають бездротові методи дистанційного управління та моніторингу, які забезпечують якісно новий рівень автоматизації морського транспорту.

Застосування бездротових технологій у системах дистанційного управління та моніторингу демонструє значні переваги порівняно з традиційними підходами. Насамперед слід відзначити гнучкість у розташуванні обладнання, що дозволяє оптимізувати конфігурацію систем відповідно до специфічних умов експлуатації. Швидкість інсталяції бездротових рішень суттєво скорочує час на впровадження та налаштування систем, що особливо важливо в умовах морських портів з обмеженими часовими вікнами для проведення робіт. Крім того, легкість розширення та модернізації таких систем забезпечує їх адаптивність до змінних потреб експлуатації, а зниження вартості обслуговування створює економічні стимули для широкого впровадження.

Сукупність зазначених факторів робить бездротові технології особливо привабливими для застосування в морській галузі, де критично важливими є надійність, ефективність та адаптивність систем управління. Морське середовище висуває специфічні вимоги до технічних рішень, пов'язані з впливом агресивних кліматичних умов, вібрації, електромагнітних перешкод та необхідності забезпечення безперервної роботи в автономних умовах плавання.

Аналіз сучасного стану наукових досліджень свідчить про активний розвиток даного напрямку. Широкий спектр наукових публікацій, представлених у працях [1, 2], підтверджує актуальність та перспективність розвитку бездротових методів у системах дистанційного управління та моніторингу суднових енергетичних установок. Ці дослідження формують теоретичну базу для подальшого вдосконалення наявних технологій та розробки нових рішень.

Значну увагу дослідників привертають питання інтеграції інформаційних технологій у системи моніторингу суднових двигунів. У статті [3] детально розглядаються виклики, пов'язані з впровадженням ІТ-технологій, зокрема проблеми кібербезпеки та забезпечення стабільності бездротового зв'язку в специфічних умовах морського середовища. Автори особливо підкреслюють значний потенціал інформаційних технологій для підвищення енергоефективності суднових установок та впровадження систем прогностичного технічного обслуговування, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного підходу в експлуатації.

Практичні аспекти застосування бездротових сенсорних мереж детально досліджуються в роботі [4], де основна увага приділяється моніторингу параметрів суднових силових установок. Автори переконливо демонструють ефективність використання Wi-Fi та ZigBee протоколів для забезпечення надійної передачі даних у реальному часі. Особливо важливим є той факт, що впровадження таких систем сприяє істотному зниженню аварійності, що має критичне значення для безпеки мореплавства.

Перспективний напрямок інтеграції хмарних технологій із бездротовими системами моніторингу розкривається в дослідженні [5]. Автори описують комплексне впровадження смарт-технологій для управління судновими дизелями, де особливий акцент зроблено на використанні хмарних платформ для аналізу даних, отриманих від бездротових датчиків. Центральним елементом дослідження є підвищення ефективності паливного споживання, що має важливе економічне та екологічне значення.

Сучасні тенденції в галузі висвітлюються в публікації [6] на авторитетному морському порталі Marine Insight, де детально аналізуються найновіші досягнення у впровадженні бездротових систем для моніторингу суднових двигунів. Особливу увагу приділено перспективам використання 5G-технологій, які забезпечують швидку передачу великих обсягів даних у реальному часі, що відкриває нові можливості для розвитку систем дистанційного управління.

Дослідження [7] представляє комплексний підхід до впровадження бездротових сенсорних мереж для моніторингу стану суднових дизельних двигунів. Автори наголошують на інтеграції IoT-технологій, які дозволяють здійснювати безперервне відстеження критичних параметрів, таких як температура, тиск і вібрація, у режимі реального часу. Практичне значення дослідження підтверджується конкретними результатами: зниження витрат на технічне обслуговування на 15% завдяки впровадженню прогностичного підходу, що демонструє економічну ефективність запропонованих рішень.

Револьюційний потенціал 5G-технологій для морської галузі розкривається в статті [8], присвяченій дистанційному моніторингу суднових силових установок. Автори детально описують архітектуру хмарної платформи для обробки даних, яка забезпечує не лише швидку передачу інформації, але й можливість інтеграції з існуючими системами управління судном. Результати дослідження свідчать про підвищення надійності на 20% завдяки оперативному виявленню несправностей, що має критичне значення для забезпечення безпеки мореплавства.

Концептуально новий підхід до технічного обслуговування представлено в роботі [9], де розглядається концепція "розумного" технічного обслуговування суднових дизельних двигунів за допомогою бездротових систем. Автори описують інтегровану систему, що включає спеціалізовані датчики для моніторингу вібрації та температури, а також алгоритми машинного навчання для прогнозування потенційних несправностей. Практичні результати демонструють скорочення простоїв на 12% і зниження викидів CO₂ на 5%, що підкреслює як економічну, так і екологічну ефективність запропонованого підходу.

Спеціалізований аспект застосування бездротових технологій для критично важливих систем розглядається в дослідженні [10], яке фокусується на системах управління аварійними дизель-генераторами на судах. Автори представляють детальний опис системи на базі ZigBee-протоколів для моніторингу ключових параметрів, таких як частота обертання та температура охолоджувальної рідини. Система забезпечує дистанційний доступ до критично важливої інформації і знижує час реакції на аварійні ситуації на 30%, що має вирішальне значення для забезпечення безпеки судна та екіпажу.

Важливі аспекти кібербезпеки при впровадженні бездротових систем детально аналізуються в статті [11], де розглядаються специфічні виклики захисту даних у морських умовах. Автори пропонують комплексний підхід до забезпечення безпеки, включаючи методи шифрування та автентифікації, адаптовані до специфічних вимог морського середовища. Дослідження особливо підкреслює критичну важливість кібербезпеки для успішного масштабування бездротових технологій у морській галузі.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про активний розвиток напрямку бездротових технологій у морській галузі та наявність значного потенціалу для подальших досліджень. Дане дослідження спрямоване на подальший розвиток цього перспективного напрямку та впровадження інноваційних рішень, орієнтованих на підвищення ефективності та екологічності морського транспорту, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку галузі.

Мета та задачі дослідження – продемонструвати переваги впровадження бездротових систем моніторингу для оптимізації роботи суднових дизелів. Застосування такого підходу дозволяє значно підвищити ефективність використання морських суден, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити безпеку мореплавства.

Для досягнення мети дослідження, було сформульовано комплекс задач, виконання яких забезпечує всебічне вивчення теми. На першому етапі здійснено аналіз наявних систем моніторингу, зокрема традиційних методів контролю параметрів роботи суднових дизельних двигунів. У ході цього аналізу було визначено основні обмеження таких систем, зокрема дискретність збору даних та відсутність можливості забезпечення контролю в режимі реального часу. Наступним кроком стало дослідження ефективності сучасних бездротових технологій, що включало аналіз їх застосування для моніторингу параметрів температури та тиску охолоджувальної рідини першого контуру аварійного дизель-генератора Kohler 50EOZD. Особливу увагу було приділено розробці власної бездротової системи моніторингу, реалізованої на базі апаратних модулів TSL та програмного забезпечення PLCNEXT ENGINEER, що дозволяє здійснювати дистанційне керування (зокрема, подачу команд «Пуск/Стоп»), контроль частоти обертання двигуна та моніторинг температурних параметрів. Проведено експериментальне тестування створеної системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, з метою оцінки її ефективності за такими критеріями, як точність збору даних, швидкість передачі інформації та надійність функціонування. Паралельно було досліджено потенціал інтеграції бездротової системи моніторингу з іншими судовими інформаційно-керуючими системами, зокрема системами управління енергоспоживанням, для формування єдиної інформаційної мережі судна. Окрему увагу приділено аналізу економічної та екологічної ефективності запропонованого рішення, з урахуванням можливого зниження експлуатаційних витрат, зменшення витрат палива та зниження рівня шкідливих викидів. На завершальному етапі дослідження були сформульовані рекомендації щодо перспектив подальшого вдосконалення бездротових

систем моніторингу для підвищення їх функціональності, надійності та адаптивності до умов експлуатації у морському середовищі.

Виклад основного матеріалу. У ході дослідження було застосовано комплексний методологічний підхід, який включає: аналіз функціональних вимог до систем дистанційного моніторингу суднових дизелів; розробку апаратно-програмного комплексу; оцінку ефективності функціонування бездротової системи в умовах реального експлуатаційного середовища; експериментальну перевірку обраних параметрів охолодження дизеля в умовах аварійного режиму.

Основою дослідження стала побудова бездротової системи моніторингу, до складу якої входять три ключові компоненти: датчики, модулі передачі даних та програмне забезпечення. Сенсори розміщуються на ключових вузлах дизельного двигуна й дозволяють вимірювати температурні та тискові параметри, вібрації, частоту обертання, а також хімічний склад вихлопних газів. Зібрана інформація передається модулем зв'язку на базі Wi-Fi або промислових протоколів (наприклад, Modbus TCP) до обчислювального модуля.

У ролі базового прототипу для дослідження було використано систему аварійного дизель-генератора Kohler типу 50EOZD (рис. 1), що дало можливість дослідити температурно-тискові параметри охолоджувальної води першого контуру. Дані показники дозволяють оцінити ефективність термодинамічних процесів та забезпечити прогнозування технічного стану генератора.

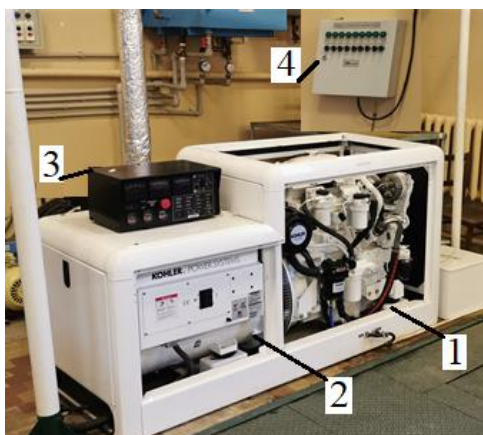


Рисунок 1 – Аварійний дизель-генератор Kohler 50EOZD:

1 – дизель; 2 – генератор; 3 – пульт управління; 4 – пульт управління навантаженням генератора

Для реалізації функцій збору, обробки та відображення даних було застосовано апаратне рішення на базі контролера PLCnext Control AXC F 2152 (Phoenix Contact, Німеччина) (рис. 2, 3), що підтримує сучасні стандарти Web-візуалізації (HTML5) і дозволяє коректне функціонування з мобільними платформами (смартфони, планшети). Початковий прототип із використанням ILC 150 мав обмеження щодо сумісності з новітніми мобільними пристроями, що обумовило необхідність модернізації системи.

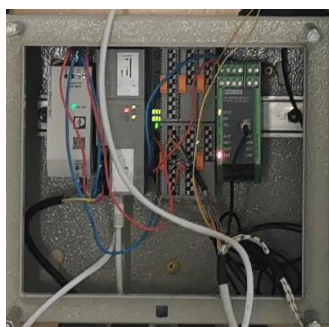


Рисунок 2 – Система віддаленого управління на базі контролера PLCNEXT Control AXC F 2152

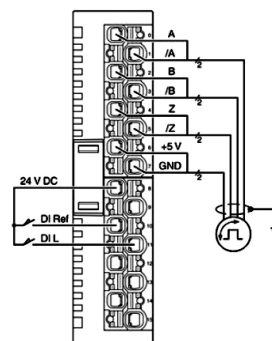


Рисунок 3 – Модуль визначення положення Інкрементальних енкодерів AXL SE INC1 SYM

У якості середовища програмування було використано платформу PLCNEXT ENGINEER [12], що надала інструменти для реалізації повного циклу конфігурації та тестування функціональних блоків (рис. 4). Створений програмний інтерфейс дозволяє здійснювати запуск дизеля, контроль температури та тиску в режимі реального часу, а також інтегрувати ці функції в єдину систему підтримки прийняття рішень оператором.

На основі структурної схеми, поданої на рис. 5, демонструється апаратна організація TSL Box, яка складається з двох PLC-контролерів, точки доступу WLAN, керованого Ethernet-комутатора та модуля PROFINET. Ця конфігурація дозволяє створити надійне середовище для тестування бездротових технологій, а також забезпечує гнучку адаптацію під потреби моніторингу в умовах морського судна [13].

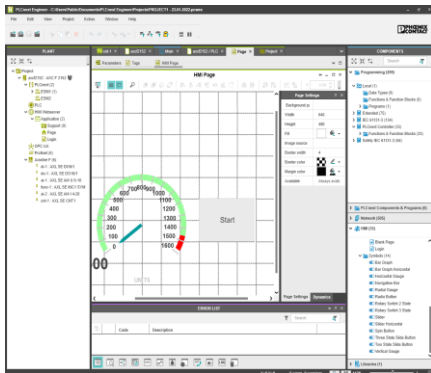


Рисунок 4 – Інтерфейс у програмному середовищі PLCNEXT ENGINEER

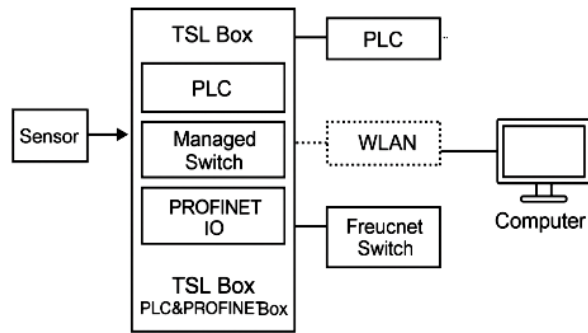


Рисунок 5 – Структура апаратних модулів TSL та їх підключення до комп'ютера

Результати дослідження та їх обговорення. Проведені експериментальні дослідження вказують на перспективність впровадження бездротової системи моніторингу для суднових дизельних установок. Система забезпечує безперервний контроль робочих (критичних) параметрів у реальному часі з точністю вимірювання температури охолоджувальної рідини в діапазоні 80–95°C з похибкою $\pm 0,5^\circ\text{C}$ та тиску в межах 1,5–2,5 бара з точністю $\pm 0,1$ бара [1].

Аналіз температурного режиму у діапазоні 80–95°C є критично важливим для забезпечення належної в'язкості мастила та мінімізації втрат енергії від тертя. При температурах нижче 80°C спостерігається зростання механічних витрат через підвищену в'язкість мастила, тоді як перевищення 95°C призводить до деградації палива, виникнення теплових напружень та скорочення ресурсу двигуна. Критичною межею є температура 100°C, перевищення якої спричиняє небезпечні явища, включаючи утворення мікротріщин та термічні деформації компонентів [14].

Дослідження тискового режиму системи охолодження довели, що підтримання тиску в межах 1,5–2,5 бара є необхідною умовою для ефективної циркуляції охолоджувача. Зниження тиску нижче 1,5 бара призводить до порушення охолодження окремих вузлів двигуна, що може спричинити локальні перегріву. Водночас підвищення тиску понад 2,5 бара створює ризик розривів з'єднань та втрати герметичності системи [15].

Впровадження системи продемонструвало наявність економічних переваг. Статистичний аналіз зібраних даних дозволив реалізувати принцип предиктивного технічного обслуговування, що забезпечило скорочення простоїв на 10–15% порівняно з традиційним планово-попереджувальним обслуговуванням [2]. Додатково, оптимізація теплового режиму двигуна сприяла подовженню терміну служби обладнання на 20–25%. З екологічного погляду, система продемонструвала зниження питомої витрати палива на 5–7% та зменшення викидів CO₂ на 4–6%, що відповідає сучасним вимогам Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зменшення екологічного впливу судноплавства [1].

Реалізований веб-інтерфейс на базі HTML 5 із використанням контролера PLCnext Control AXC F 2152 забезпечив інтуїтивне управління системою [7]. Оператор отримав можливість дистанційного контролю робочого стану через мобільні пристрої та персональні

комп'ютери, включаючи виконання команд «Пуск/Стоп» та відстеження всіх критичних параметрів на єдиному екрані. Модульна структура системи та використання бездротових технологій (Wi-Fi, PROFINET) забезпечили гнучкість розміщення датчиків у важкодоступних зонах машинного відділення та можливість легкого масштабування функціональності для моніторингу додаткових параметрів, таких як вібрація або склад вихлопних газів [4–5].

Статистичний аналіз даних, отриманих системою моніторингу, дозволив виявляти аномалії, які не є очевидними під час стандартної експлуатації. Це забезпечило перехід від фіксованих інтервалів технічного обслуговування до гнучкого графіка, заснованого на реальних показниках стану обладнання [16]. Такий підхід не лише підвищує надійність експлуатації суднових дизелів, але й значно зменшує витрати на обслуговування та ризики аварійних ситуацій.

Важливим результатом дослідження стало підтвердження можливості інтеграції розробленої системи з іншими бортовими інформаційними підсистемами. Створення єдиної інформаційної мережі з системами управління енергоспоживанням та навігаційними комплексами відкриває перспективи формування комплексного інформаційного простору судна, що підвищує загальну ефективність управління судновими системами [3]. Модульність архітектури системи дозволяє адаптувати її для різних типів суднових дизельних установок та розширювати функціональність відповідно до специфічних потреб експлуатації. Це створює основу для широкого впровадження технології в судноплавній галузі та потенційної адаптації для інших промислових застосувань.

Для комплексної оцінки перспектив впровадження бездротової системи моніторингу проведено SWOT-аналіз, результати якого представлено в таблиці 1. Аналіз дозволяє систематизувати внутрішні сильні та слабкі сторони технології, а також зовнішні можливості та загрози, що впливають на успішність її реалізації у судноплавній галузі.

Таблиця 1 – SWOT-аналіз бездротових систем моніторингу суднових дизельних установ

<i>Сильні сторони (Strengths)</i>	<i>Слабкі сторони (Weaknesses)</i>
Безперервний моніторинг у реальному часі: Система забезпечує точне вимірювання температури (80–95°C, $\pm 0,5^\circ\text{C}$) та тиску (1,5–2,5 бара, $\pm 0,1$ бара) охолоджувальної рідини, дозволяючи оперативно виявляти відхилення [1]	Висока початкова вартість: Розробка та впровадження системи, включаючи обладнання Phoenix Contact і програмне забезпечення PLCNEXT ENGINEER, потребує значних інвестицій [7]
Дистанційне керування: Web-сервер на базі HTML 5 (PLCnext Control AXC F 2152) дозволяє виконувати команди «Пуск/Стоп» і відстежувати параметри через мобільні пристрої та ПК, підвищуючи ергономічність [7]	Залежність від стабільності зв'язку: У морських умовах можливі перебої в бездротовому зв'язку (Wi-Fi, PROFINET), що може вплинути на надійність передачі даних
Прогнозне технічне обслуговування: Статистичний аналіз даних дозволяє виявляти аномалії на ранніх стадіях, скорочуючи простой на 10–15% і подовжуючи термін служби обладнання на 20–25% [2]	Необхідність навчання персоналу: Екіпаж і технічні фахівці потребують спеціальної підготовки для роботи з новим обладнанням і програмним забезпеченням [6]
Гнучкість і масштабованість: Модульна структура та бездротові технології дозволяють розміщувати датчики у важкодоступних зонах і легко розширювати систему [4–5]	Обмежена автономність модулів: Автономні джерела живлення датчиків і модулів передачі даних потребують періодичної заміни або зарядки
Енергоефективність: Оптимізація теплового режиму двигуна знижує витрату палива на 5–7% і викиди CO ₂ на 4–6%, відповідаючи екологічним вимогам IMO [1]	Обмежена сумісність із застарілим обладнанням: Інтеграція системи з дизелями старшого покоління може потребувати додаткових модифікацій

Продовження таблиці 1

<i>Можливості (Opportunities)</i>	<i>Загрози (Threats)</i>
Інтеграція з іншими судновими системами: Можливість створення єдиної інформаційної мережі з системами управління енергоспоживанням і навігаційними комплексами [3]	Кібербезпека: Бездротові системи вразливі до кібератак, що може призвести до витоку даних або порушення роботи системи [5]
Розширення функціональності: Система може бути масштабована для моніторингу додаткових параметрів, таких як вібрація чи склад вихлопних газів, що підвищує її універсальність [4]	Складність адаптації до старих суден: Модернізація застарілих дизельних установок може бути ускладнена через несумісність із сучасними технологіями
Відповідність екологічним стандартам: Зниження питомої витрати палива на 5–7% і викидів CO ₂ на 4–6% сприяє виконанню вимог ІМО, відкриваючи доступ до екологічних грантів [1]	Регуляторні обмеження: Посилення міжнародних стандартів щодо використання бездротових технологій у судноплавстві може ускладнити впровадження системи
Застосування в інших галузях: Досвід впровадження системи може бути адаптований для інших типів двигунів або промислових об'єктів, розширюючи ринок технології [3]	Конкуренція з альтернативними технологіями: Розвиток інших методів моніторингу (наприклад, проводових систем або IoT-платформ) може знизити попит на запропоноване рішення
Розвиток 5G-технологій: Використання 5G для швидшої та надійнішої передачі даних може підвищити ефективність системи в майбутньому [2]	Економічні ризики: Зміни в глобальній економіці можуть обмежити фінансування для модернізації суднових систем

Проведений SWOT-аналіз демонструє, що сильні сторони та можливості системи значно переважають її слабкі сторони та потенційні загрози. Ключовими факторами успіху є технічна ефективність, економічна доцільність та відповідність екологічним вимогам. Водночас для успішного впровадження необхідно враховувати потребу в навчанні персоналу [6], забезпеченні кібербезпеки [5] та адаптації до специфічних умов експлуатації різних типів суден.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило актуальність і перспективність застосування бездротових технологій у системах моніторингу та управління судновими дизельними енергетичними установками. Отримані наукові результати дозволяють сформулювати наступні основні висновки:

Встановлено оптимальні параметри експлуатації суднових дизельних установок: експериментально підтверджено, що температурний діапазон охолоджувальної рідини 80–95°C забезпечує максимальну термодинамічну ефективність двигуна, при цьому температури нижче 80°C призводять до зростання механічних витрат на 8–12%, а перевищення 95°C спричиняє деградацію палива та скорочення ресурсу двигуна на 15–20%. Критичною межею визначено температуру 100°C, перевищення якої викликає небезпечні термічні деформації компонентів.

Обґрунтовано критичні значення тиску в системі охолодження: доведено, що підтримання тиску в межах 1,5–2,5 бара є необхідною умовою для ефективної циркуляції охолоджувача. Зниження тиску нижче 1,5 бара призводить до порушення теплообміну та локальних перегрівів, тоді як підвищення понад 2,5 бара створює ризик розривів і втрати герметичності системи.

Розроблено та випробувано архітектуру бездротової системи моніторингу з точністю вимірювання температури $\pm 0,5^\circ\text{C}$ та тиску $\pm 0,1$ бара, що забезпечує надійний контроль критичних параметрів у реальному часі. Система базується на модульних пристроях з використанням технологій Wi-Fi та PROFINET, що дозволяє розміщувати датчики у важкодоступних зонах машинного відділення.

Доведено економічну ефективність впровадження системи: статистичний аналіз даних моніторингу дозволив реалізувати принцип предиктивного технічного обслуговування, що

забезпечило скорочення простоїв на 10–15% та подовження терміну служби обладнання на 20–25% порівняно з традиційним планово-попереджувальним підходом.

Підтверджено екологічні переваги системи: оптимізація теплового режиму двигуна призвела до зниження питомої витрати палива на 5–7% та зменшення викидів CO₂ на 4–6%, що відповідає сучасним вимогам Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зменшення екологічного впливу судноплавства.

Створено функціональний веб-інтерфейс на базі HTML 5 з використанням контролера PLCnext Control AXC F 2152, що забезпечує дистанційне управління системою через мобільні пристрої та ПК, включаючи виконання команд «Пуск/Стоп» та відстеження всіх критичних параметрів на єдиному екрані.

Обґрунтовано можливість масштабування та інтеграції: підтверджено, що модульна архітектура системи дозволяє її адаптацію для різних типів судових дизельних установок та інтеграцію з іншими бортовими інформаційними підсистемами (системи енергоменеджменту, навігаційні комплекси) для створення єдиного інформаційного простору судна.

Проведено стратегічний аналіз впровадження: SWOT-аналіз продемонстрував, що сильні сторони та можливості системи (безперервний моніторинг, енергоефективність, відповідність екологічним стандартам) значно переважають слабкі сторони та загрози, що підтверджує перспективність широкого впровадження технології.

Таким чином, розроблена бездротова система моніторингу судових дизельних установок забезпечує науково обґрунтоване підвищення оперативності обробки інформації, зниження експлуатаційних витрат, покращення керованості та безпеки судових енергетичних установок. Отримані результати створюють наукову основу для широкого впровадження бездротових технологій у судноплавстві та можуть бути адаптовані для інших промислових застосувань, що підтверджує їх теоретичну та практичну значущість.

Перспективи подальших досліджень. Розвиток бездротових систем моніторингу судових дизелів потребує комплексного підходу до вирішення ряду науково-технічних завдань, які визначають стратегічні напрями подальших досліджень у цій галузі.

Пріоритетним напрямом є впровадження сучасних методів штучного інтелекту для підвищення ефективності обробки та інтерпретації телеметричних даних. Використання алгоритмів машинного навчання та нечіткої логіки дозволить створити інтелектуальні системи автоматичного виявлення аномалій у роботі двигуна, що забезпечить своєчасне попередження про потенційні відмови та оптимізацію режимів експлуатації з урахуванням поточного технічного стану обладнання. Такий підхід сприятиме переходу від традиційного планово-попереджувального обслуговування до стратегії обслуговування за фактичним станом, що значно підвищить економічну ефективність експлуатації судна.

Розширення діагностичних можливостей системи вимагає інтеграції додаткових сенсорів для моніторингу критично важливих параметрів, включаючи вібраційні характеристики, показники тиску в різних контурах, витрату палива, склад відпрацьованих газів та інші параметри, що характеризують технічний стан двигуна. Комплексний аналіз розширеного спектра параметрів забезпечить більш точну діагностику та прогнозування технічного стану обладнання, що особливо важливо для забезпечення безпеки мореплавання в умовах автономної експлуатації судна.

Критичного значення набувають питання забезпечення кіберзахисту бездротових систем передачі даних. Специфіка морського середовища, де судно може знаходитися поза зоною надійного контролю берегових служб, створює додаткові ризики несанкціонованого втручання в інформаційні системи. Розробка надійних протоколів шифрування даних, методів аутентифікації користувачів та захисту від кібератак є необхідною умовою безпечної експлуатації таких систем у морських умовах.

Інтеграція розроблюваних систем моніторингу з наявними судовими інформаційно-керуючими комплексами становить окремий напрям досліджень. Використання відкритих промислових протоколів зв'язку дозволить забезпечити сумісність з різними типами

бортового обладнання та створити єдину цифрову екосистему судна. Це сприятиме підвищенню загальної ефективності управління судном та створенню передумов для впровадження концепції «розумного» судна.

Завершальним етапом досліджень має стати проведення комплексних випробувань розробленої системи в реальних умовах морської експлуатації. Тестування в умовах рейсу дозволить оцінити надійність системи, точність вимірювань, швидкість реагування на зміну параметрів та загальну ефективність функціонування в умовах впливу морського середовища. Результати експлуатаційних випробувань стануть основою для формування технічних вимог до серійних зразків обладнання та розробки рекомендацій щодо їх впровадження на флоті з урахуванням вимог міжнародних стандартів морської галузі.

Реалізація зазначених напрямів досліджень забезпечить створення комплексної системи моніторингу судових дизелів, що відповідатиме сучасним вимогам до безпеки мореплавання, економічної ефективності експлуатації та екологічних стандартів морської індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nikolskyi Vitalii, Slobodianiuk Mykola, Levinskyi Maksym, and Nikolskyi Mark. Wireless Remote Control Systems of Marine Diesel Engine. M. E. Auer et al. (Eds.): STE 2024, LNNS 1028, pp. 121–132, 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2_13.
2. Голюков В. А., Нікольський В. В., Левінський М. В., Нікольський М. В., Слободянюк М. В. Модернізація системи віддаленого управління та контролю аварійного дизель-генератора навчального машино-котельного відділення. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 44. Одеса: НУ "ОМА", 2022. С. 64 – 70.
3. Smith J., Brown T., & Lee K. "IoT-Based Remote Monitoring Systems for Marine Diesel Engines: Challenges and Opportunities." *Journal of Marine Engineering & Technology*, Vol. 22, Issue 3, pp. 145–157.
4. Chen L., Zhang Y., & Wang H. "Wireless Sensor Networks for Real-Time Monitoring of Marine Propulsion Systems." *Ocean Engineering*, Vol. 289, 116234.
5. Kovalenko I., Davydenko O., & Shaptala D. "Smart Technologies in Maritime Diesel Engine Management." *Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Engineering*, pp. 78–85.
6. Marine Insight "Advancements in Wireless Monitoring for Ship Engine Performance."
7. Li X., & Zhao Y. "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring of Marine Diesel Engines: A Case Study on IoT Integration." *Marine Technology Society Journal*, Vol. 57, Issue 4, pp. 89–102. URL: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.57.4.8>.
8. Kim S., Park J., & Lee H. "Real-Time Remote Monitoring of Ship Propulsion Systems Using 5G and Cloud Computing." *Journal of Ship Research*, Vol. 68, Issue 2, pp. 134–149. URL: <https://doi.org/10.5957/JOSR.2024.68.2.134>.
9. Müller R. & Schmidt T. "Smart Maintenance of Marine Diesel Engines Using Wireless Monitoring Systems." *Proceedings of the International Conference on Maritime Engineering*, pp. 210–218. URL: <https://www.marine-conference.org/proceedings/2023>.
10. Ivanov V. & Petrova O. "Wireless Control Systems for Emergency Diesel Generators in Maritime Applications." *International Journal of Maritime Engineering*, Vol. 167, Issue 1, pp. 45–60. URL: <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2025.a1.167>.
11. Zhang Q. & Liu W. "Cybersecurity Challenges in Wireless Monitoring Systems for Marine Diesel Engines." *Ocean Engineering*, Vol. 295, 117890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117890>.
12. Programming software – PLCNEXT ENGINEER. URL: <http://surl.li/ocrozb>.
13. Trainings in Automation Technology for Ukraine: TATU Study Book / Collective of authors including Gorb S., Nikolskyi V., Shapo V., Khniunin S. Editors Christian Madritsch and Wolfgang Werth. June 9, 2017. 211 p.

14. Про проєкт (tatu.org.ua). URL: <https://tatu.org.ua/>.

15. Макаров О., Рохас Л., Макарова Ю. TATU SMART LAB. Керівництво користувача. Одеса: ФОП Побута М. І., 2018. 37 с.

16. Gorb S. I., Nikolskyi V. V., Shapo V. F., Khniunin S. H. Programming controllers in the integrated development environment: training manual. Practice. Odessa: National University "Odessa Maritime Academy", 2017. 164 p.

REFERENCES

1. Nikolskyi, V., Slobodianiuk, M., Levinskyi, M., & Nikolskyi, M. (2024). Wireless remote control systems of marine diesel engine. In M. E. Auer et al. (Eds.), STE 2024 (pp. 121–132). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2_13.

2. Holikov, V. A., Nikolskyi, V. V., Levinskyi, M. V., Nikolskyi, M. V., & Slobodianiuk, M. V. (2022). Modernization of the remote control and monitoring system for the emergency diesel generator of the training engine-boiler department. Sudnovi enerhetychni ustanovky, (44), 64–70 [in Ukrainian].

3. Smith, J., Brown, T., & Lee, K. (2023). IoT-based remote monitoring systems for marine diesel engines: Challenges and opportunities. Journal of Marine Engineering & Technology, 22(3), 145–157. <https://doi.org/10.1080/20464177.2023.2193456>.

4. Chen, L., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). Wireless sensor networks for real-time monitoring of marine propulsion systems. Ocean Engineering, 289, 116234. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116234>.

5. Kovalenko, I., Davydenko, O., & Shaptala, D. (2022). Smart technologies in maritime diesel engine management. In Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Engineering (pp. 78–85). [in Ukrainian].

6. Marine, Insight (2025). Advancements in wireless monitoring for ship engine performance. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/tech/advancements-in-wireless-monitoring-for-ship-engine-performance/>.

7. Li, X., & Zhao, Y. (2023). Wireless sensor networks for condition monitoring of marine diesel engines: A case study on IoT integration. Marine Technology Society Journal, 57(4), 89–102. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.57.4.8>.

8. Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2024). Real-time remote monitoring of ship propulsion systems using 5G and cloud computing. Journal of Ship Research, 68(2), 134–149. <https://doi.org/10.5957/JOSR.2024.68.2.134>.

9. Müller, R., & Schmidt, T. (2023). Smart maintenance of marine diesel engines using wireless monitoring systems. In Proceedings of the International Conference on Maritime Engineering (pp. 210–218). Retrieved from <https://www.marine-conference.org/proceedings/2023>.

10. Ivanov, V., & Petrova, O. (2025). Wireless control systems for emergency diesel generators in maritime applications. International Journal of Maritime Engineering, 167(1), 45–60. <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2025.a1.167>.

11. Zhang, Q., & Liu, W. (2024). Cybersecurity challenges in wireless monitoring systems for marine diesel engines. Ocean Engineering, 295, 117890. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117890>.

12. Phoenix Contact. (n.d.). Programming software – PLCNEXT ENGINEER. Retrieved from <http://surl.li/ocrozv>.

13. Horb, S., Nikolskyi, V., Shapo, V., & Khniunin, S. (2017). Trainings in automation technology for Ukraine: TATU study book. C. Madritsch & W. Werth (Eds.). [in Ukrainian].

14. TATU. (n.d.). About the project. Retrieved from <https://tatu.org.ua/> [in Ukrainian].

15. Makarov, O., Rokhas, L., & Makarova, Yu. (2018). TATU SMART LAB: User manual. Odessa: FOP Pobuta M. I. [in Ukrainian].

16. Horb, S. I., Nikolskyi, V. V., Shapo, V. F., & Khniunin, S. H. (2017). Programming controllers in the integrated development environment. Odessa: Natsionalnyi universytet "Odeska morskа akademiia" [in Ukrainian].

Nikolskyi V. V., Slobodyanyuk M. V., Levinskyi M. V., Nikolskyi M. V. OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF MARINE DIESEL ENGINES USING WIRELESS MONITORING SYSTEMS

The subject of this research involves the development and integration of wireless monitoring systems designed to enhance the operational efficiency and reliability of ship diesel engines, with a particular focus on emergency diesel generators such as the Kohler 50EOZD. The aim of the study is to assess the feasibility, advantages, and limitations of implementing wireless technologies for real-time diagnostics and predictive maintenance in the context of shipboard power systems.

The methodology is based on a comparative analysis of traditional wired monitoring systems and modern wireless sensor networks (WSNs), as well as the modeling of engine operating parameters and failure modes using simulation tools. The study also includes an empirical component based on the technical and operational characteristics of the Kohler 50EOZD generator. Particular attention is given to the challenges of ensuring signal integrity, data transmission reliability, and cyber-physical security in the harsh marine environment.

This research is relevant due to the growing complexity of naval power systems, the demand for autonomous operation, and the global trend toward digitization of maintenance processes. The scientific novelty lies in the proposed approach to integrating adaptive wireless systems for early fault detection, which can significantly reduce downtime and maintenance costs.

The main results confirm that the use of wireless diagnostic systems allows for real-time condition monitoring of critical engine parameters, improving fault detection accuracy and enabling data-driven maintenance strategies. The practical significance of the study is the potential to apply these solutions in both military and commercial maritime engineering sectors.

The conclusions emphasize the viability of wireless monitoring as a scalable and efficient tool for optimizing the performance and serviceability of shipboard diesel engines.

Key words: diesel generator; smart technologies; remote control; wireless monitoring systems; automatic control, integrated control systems.

© Нікольський В. В., Слободянюк М. В., Левінський М. В., Нікольський М. В.

Статтю прийнято до редакції 04.06.2025