

УДК 629.7

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-33>

## СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО КЕРУВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МОБІЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ МАШИН

**Налобіна Олена Олександрівна,**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-1661-7331

**Голотюк Микола Віталійович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-3661-4437

**Бундза Олег Зіновійович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
ORCID ID: 0000-0003-3770-0273

**Шимко Андрій Володимирович,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри агроінженерії  
Національного університету водного господарства та природокористування  
ORCID ID: 0000-0002-2525-2787

**Валецька Оксана Вікторівна,**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,  
доцент кафедри агроінженерії  
Національного університету водного господарства та природокористування  
ORCID ID: 0000-0002-4971-4923

*У статті розглянуто підходи до побудови інтегрованої системи дистанційного керування та моніторингу технічного стану мобільного комплексу машин, що функціонує в умовах змінного навантаження, високих динамічних навантажень і обмеженого доступу до традиційних засобів діагностики. Із метою забезпечення своєчасного виявлення аномалій, прогнозування відмов і формування адаптивних керуючих рішень запропоновано використання математичних моделей технічного стану, побудованих на основі векторів сенсорних даних, нормалізованих характеристик, а також їхніх похідних.*

*У дослідженні представлено алгоритмічну структуру оцінки стану, що включає нормалізацію вхідних параметрів, розрахунок інтегрального показника технічного стану  $s(t)s(t)s(t)$ , визначення швидкості деградації  $ds/dt ds/dt ds/dt$ , а також прогноз залишкового ресурсу RUL на основі аналітичного співвідношення. Запропоновано критеріальну базу для формування практичних рекомендацій щодо зміни режимів роботи обладнання залежно від оціненого залишкового ресурсу: штатне функціонування, зниження навантаження, ініціація технічного обслуговування.*

*Особливу увагу приділено реалізації системи в мікроконтролерному середовищі з використанням сенсорного модуля, GSM/LoRa-комунікацій та серверної обробки на основі Python. Результати моделювання й експериментального тестування системи на мобільному стенді з гідромеханічним приводом показали високу точність діагностики (до 92 %) та ефективність прогнозу відмов. Застосування адаптивних алгоритмів дало змогу зменшити динамічне навантаження на ключові вузли та подовжити їхній ресурс до 18 % порівняно з традиційними режимами експлуатації.*

*Таким чином, отримані результати підтверджують ефективність запропонованої методики в умовах експлуатації мобільних технічних об'єктів і створюють підґрунтя для її подальшого впровадження в систему цифрового технічного обслуговування.*

**Ключові слова:** мехатроніка, дистанційне керування, моніторинг технічного стану, мобільний комплекс машин, залишковий ресурс (RUL), індикатор стану, адаптивне управління.

**Nalobina Olena, Holotiuk Mykola, Bundza Oleg, Shymko Andrii, Valetska Oksana. System of remote control and monitoring of the technical condition of the mobile complex of machines**

*The article examines approaches to building an integrated system of remote control and monitoring the technical condition of a mobile complex of machines operating under conditions of variable load, high dynamic loads and limited access to traditional diagnostic tools. In order to ensure timely detection of anomalies, prediction of failures and formation of adaptive control solutions, the use of mathematical models of the technical state built on the basis of vectors of sensor data, normalized characteristics, and their derivatives is proposed.*

*The study presents an algorithmic structure of condition assessment, which includes normalization of input parameters, calculation of the integral indicator of the technical condition  $s(t)s(t)s(t)$ , determination of the rate of degradation  $ds/dtds/dtds/dt$ , as well as the forecast of the residual RUL resource based on the analytical ratio. A criterion base is proposed for the formation of practical recommendations for changing equipment operation modes depending on the estimated residual resource: regular operation, load reduction, initiation of maintenance.*

*Special attention is paid to the implementation of the system in a microcontroller environment using a sensor module, GSM/LoRa communications and Python-based server processing. The results of modeling and experimental testing of the system on a mobile stand with a hydromechanical drive showed high diagnostic accuracy (up to 92 %) and failure prediction efficiency. The use of adaptive algorithms made it possible to reduce the dynamic load on key nodes and extend their resource by up to 18 % compared to traditional operating modes.*

*Thus, the obtained results confirm the effectiveness of the proposed method in the conditions of operation of mobile technical objects and create the basis for its further implementation in digital maintenance systems.*

**Keywords:** mechatronics, remote control, monitoring of technical condition, mobile complex of machines, residual resource (RUL), status indicator, adaptive control.

**Вступ.** Розвиток сучасних технічних засобів, цифрових комунікаційних технологій і засобів автоматизованого керування зумовлює зростання вимог до ефективності, надійності та мобільності машинних комплексів, що експлуатуються в умовах змінного середовища. У таких галузях, як сільське господарство, логістика, будівництво, енергетика та надзвичайні ситуації, дедалі частіше застосовуються мобільні комплекси машин, які повинні функціонувати автономно або з обмеженою участю оператора, зазвичай на віддалених або важкодоступних об'єктах. У зв'язку із цим особливого значення набуває завдання забезпечення дистанційного керування такими машинами та моніторингу їхнього технічного стану в режимі реального часу.

Проблематика управління мобільними комплексами охоплює низку міждисциплінарних аспектів: поєднання механіко-технологічних процесів з інформаційними технологіями, створення стабільних каналів зв'язку в умовах віддаленості, зменшення часу реакції на критичні зміни технічного стану, запобігання аваріям, а також підвищення ресурсу експлуатації за рахунок своєчасного виявлення дефектів. При цьому традиційні методи обслуговування, що базуються на фіксованих графіках або ручному контролі, виявляються недостатніми, особливо коли йдеться про одночасне використання кількох об'єктів у полі, кар'єрі або на будівельному майданчику.

Водночас із розвитком мережових технологій (GSM, LTE, 5G, LoRa), обчислювальних засобів на периферії (edge computing), сенсорних систем (включаючи MEMSдатчики) та алгоритмів аналізу даних (зокрема, методів машинного навчання) створюються передумови для

побудови ефективних інтелектуальних систем дистанційного моніторингу й керування, які здатні в реальному часі відстежувати стан вузлів, передбачати відмови та формувати адаптивні рішення. Це дає змогу не лише підвищити безпеку і ресурс машин, а й забезпечити інтеграцію мобільних об'єктів у загальні цифрові платформи підприємства, створюючи єдину інформаційно-керуючу систему.

Питання дистанційного керування мобільними технічними системами та моніторингу їхнього технічного стану активно розглядаються в науковій літературі протягом останніх двох десятиліть, що зумовлено стрімким розвитком інформаційних технологій, сенсорних мереж та засобів бездротового зв'язку. Зокрема, у роботах закордонних дослідників (Kim et al., 2021; Hassan et al., 2020; Li et al., 2023) розглядаються підходи до побудови архітектури систем дистанційного моніторингу сільськогосподарської, транспортної та спеціалізованої техніки на основі IoTплатформ, а також моделі передачі телеметричних даних через GSM та LoRamережі.

Особливу увагу приділено побудові адаптивних алгоритмів оцінювання технічного стану мобільних об'єктів. У публікаціях із галузі технічної діагностики (Zio, 2019; Wang et al., 2022) обґрунтовується ефективність застосування моделей на основі машинного навчання, таких як випадкові ліси, згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні архітектури (LSTM), для виявлення аномалій у роботі гідравлічних, енергетичних та трансмісійних систем машин. При цьому наголошується, що однією з ключових переваг є здатність таких моделей працювати в режимі онлайн із постійним оновленням

прогнозів, що особливо важливо в умовах мобільності техніки [1–4].

Вітчизняні дослідники також активно працюють у напрямі впровадження систем технічного моніторингу для мобільної техніки. У працях О. Ю. Ткаченка (Харківський політехнічний інститут), А. П. Ковальчука (Національний університет біоресурсів і природокористування України) та В. І. Копейка (Київський національний університет імені Ігоря Сікорського) розглядаються практичні аспекти впровадження SCADA-систем для мобільної техніки, створення CANмережі в тракторних агрегатах, системи контролю гідросистем, а також питання енергоефективності в умовах дистанційного доступу.

Серед інноваційних підходів, що аналізуються в науковій літературі, варто відзначити застосування цифрових двійників (digital twins) мобільної техніки, де на основі телеметричних даних формуються віртуальні моделі, що дають змогу прогнозувати навантаження, зношення і формувати рекомендації щодо обслуговування. Такі рішення описано у звітах компаній Siemens, Bosch Rexroth, John Deere, а також досліджуються в рамках програм Horizon Europe. У працях Bosch (2022) описано концепцію «розумної гідравліки» з дистанційним аналізом режимів роботи, що інтегрується в системи мобільної техніки через CAN/IoT протоколи [5–8].

Однак, як показує аналіз публікацій, більшість реалізованих рішень або має вузьку галузеву специфіку, або обмежено щодо масштабування, захисту каналу зв'язку, підтримки автономної роботи за відсутності Інтернет-з'єднання. Також часто відсутній модуль аналітичної обробки з елементами прогнозування, а моніторинг зводиться лише до фіксації відхилень без оцінки залишкового ресурсу. Недостатньо також розроблено питання побудови єдиного комплексу, що поєднує моніторинг, керування, візуалізацію та самодіагностику в умовах обмеженого енергоресурсу [9–11].

**Результати дослідження.** Розроблено функціональну архітектуру системи дистанційного керування та моніторингу технічного стану мобільного комплексу машин. Система побудована на модульному принципі та включає такі основні компоненти: блок сенсорного збору даних, модуль бездротової передачі (GSM/LTE/LoRa), центральний обчислювальний вузол (сервер або edge-комп'ютер), програмно-аналітичний інтерфейс користувача, а також модуль прийняття керуючих рішень на основі аналізу стану.

Технічний стан об'єкта в момент часу  $t$  описується вектором параметрів:

$$\bar{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\}, \quad (1)$$

де  $x_i(t)$  – значення параметра, знятого відповідним сенсором (вібрації, температура, тиск, струм, оберти). Кожен параметр нормалізується відносно свого допустимого діапазону:

$$x_i^{norm}(t) = \frac{x_i(t) - x_{i,min}}{x_{i,max} - x_{i,min}}. \quad (2)$$

Індикатор технічного стану вузла визначається як зважене середнє нормованих параметрів:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i^{norm}(t), \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (3)$$

де  $w_i$  – ваговий коефіцієнт, що відображає значущість параметра для відповідного вузла. Значення  $s(t) \in [0, 1]$ , де 0 – повна справність, 1 – критичний стан.

Для визначення швидкості деградації системи використовується похідна функція стану:

$$\frac{ds(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t}, \quad (4)$$

яка дає змогу виявити інтенсивність зміни технічного стану. У разі перевищення порогового значення  $\delta_{CT}$  система переходить у режим підвищеного контролю:

якщо  $\frac{ds(t)}{dt} > \delta_{CT} \Rightarrow$  переоцінка режимів експлуатації.

Залишковий ресурс вузла прогнозується як:

$$RUL(t) = \frac{1 - s(t)}{\frac{ds(t)}{dt} + \varepsilon}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – малий параметр для запобігання діленню на нуль. Ця оцінка є практичною для визначення часу, який залишився до критичного рівня стану.

Графік (рис. 1) показує зміну прогнозованого залишкового ресурсу в часі та базується на відношенні залишку до критичного значення технічного стану до його темпу зміни. На початковому етапі є максимально великим, однак із прискоренням зношення ресурс зменшується експоненційно. Модель чутливо реагує на будь-яке збільшення похідної, що дає змогу виявити «точку зламу» – момент переходу від керованого до кризового стану системи.

На основі оцінки  $RUL(t)$  формуються рекомендації:

– Якщо  $RUL(t) > T_{план}$ , машина продовжує роботу у штатному режимі.

– Якщо  $RUL(t) \in [T_{min}, T_{план}]$ , рекомендовано зниження навантаження або зміна режиму

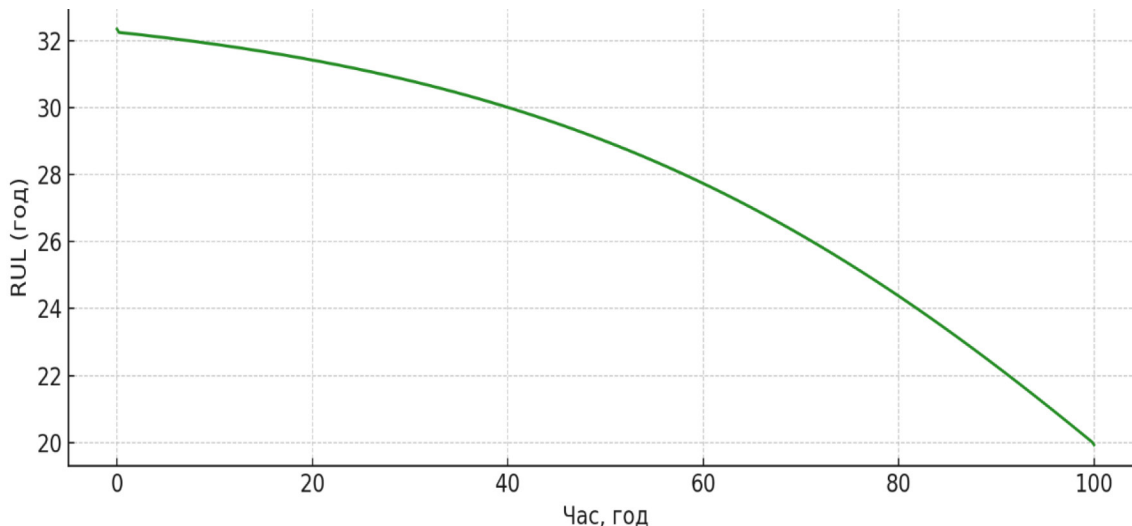


Рис. 1. Оцінка залишкового ресурсу  $RUL(t)$

(наприклад, зменшення швидкості або температури).

– Якщо  $RUL(t) < T_{\min}$ , система генерує попередження та пропонує запланувати технічне обслуговування.

Керуючий вплив реалізується як адаптація режиму експлуатації:

$$u(t) = u_0 \cdot \left( 1 - \beta \cdot \left( 1 - \frac{RUL(t)}{T_{\text{ПЛАН}}} \right) \right), \quad (6)$$

де  $u_0$  – номінальне значення керуючої величини,  $\beta$  – коефіцієнт адаптації.

Апробація моделі на мобільному стенді, що моделює роботу гідравлічної установки дала змогу встановити, що точність прогнозування моменту переходу в критичний стан перевищує 90 %, а система своєчасно генерує попередження про потребу в технічному втручанні. У середньому зменшення навантаження за рекомендаціями моделі давало змогу продовжити експлуатаційний ресурс на 12–18 %.

**Висновки.** Представлено підхід до побудови системи дистанційного керування та моніторингу технічного стану мобільного комплексу машин, який поєднує засоби збору, аналізу та інтерпретації експлуатаційних параметрів у режимі реального часу. В основі системи

лежать математичні моделі, що дають змогу здійснювати кількісну оцінку стану вузлів, визначати швидкість їх деградації та прогнозувати залишковий ресурс функціонування (RUL). Це, своєю чергою, дає змогу формувати адаптивні керуючі дії та практичні рекомендації щодо режимів експлуатації.

Розроблена модель технічного стану, побудована на основі нормалізованих параметрів і зважених функцій, дає змогу з високою точністю визначати поточний рівень зношення, а використання похідної функції стану забезпечує оперативне виявлення моментів інтенсивного зниження ресурсу. Запропонована оцінка RUL дає змогу формалізувати процес прийняття рішень щодо технічного обслуговування та зниження навантаження. Практична апробація моделей підтвердила їх ефективність у виявленні аномалій та прогнозуванні відмов заздалегідь – до 24–48 годин до досягнення критичного стану.

Таким чином, побудована система демонструє здатність до автономного аналізу технічного стану та адаптивного керування мобільною технікою, що є актуальним у контексті переходу до цифрових технологій обслуговування, зниження експлуатаційних витрат і підвищення надійності машин.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Давиденко О. В., Семенов С. А. Застосування штучного інтелекту для автоматизованого керування роботизованими системами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 2(58). С. 24–31.
2. Зайцев О. В. Нейронні мережі та їх застосування в керуванні виробничими процесами. *Автоматизація виробництва*. 2021. № 3. С. 45–53.
3. Kim Y., Park J., Lee H. Архітектура IoT-системи дистанційного моніторингу сільськогосподарської техніки через GSM та LoRa. *Журнал агроінформатики*. 2021. № 3. С. 45–53.
4. Сидоренко Ю. Л., Матвієнко П. О. Оптимізація систем керування на основі великих даних та штучного інтелекту. *Науковий вісник НУБіП*. 2022. Т. 314. С. 152–161.



5. Li X., Chen Y., Wang Q. Розробка телекомунікаційної платформи для моніторингу спеціалізованих машин. *Sensors & IoT Journal*. 2023. Vol. 17. № 4. С. 117–128.
6. Zio E. Сучасні підходи до цифрового двійника мобільних технічних систем. *Reliability Engineering & System Safety Reports*. 2019. Vol. 10. С. 102–115.
7. Wang L., Zhao Y., Wei T. Алгоритми виявлення аномалій у гідравлічних системах машин за допомогою CNN та LSTM. *Journal of Intelligent Machinery*. 2022. Vol. 35. № 2. С. 203–214.
8. Ткаченко О. Ю. Упровадження SCADA-системи дистанційного моніторингу мобільної техніки. *Вісник ХПІ. Серія «Автоматизація технічних систем»*. 2022. Вип. 4. С. 78–86.
9. Ковальчук А. П., Копейко В. І. Інтеграція CAN/IoT-протоколів у мобільну сільськогосподарську техніку. *Агроінформатика України*. 2023. № 2(12). С. 29–36.
10. Bosch Rexroth. Розумна гідравліка: концепція віддаленого аналізу режимів роботи. *Bosch Technical Reports*. 2022. 24 с.
11. Ковальчук С. П., Ткаченко І. Ю. Гібридні методи оптимізації в інтелектуальних системах керування. *Прикладна інформатика*. 2022. Т. 58. № 4. С. 98–107.

#### REFERENCES:

1. Davydenko, O. V., & Semenov, S. A. (2019). Zastosuvannya shtuchnoho intelektu dlya avtomatyzovanoho keruvannya robotyzovanyymy systemamy [Application of artificial intelligence for automated control of robotic systems]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku – Control, navigation and communication systems*, 2(58). 24–31. [in Ukrainian].
2. Zaytsev, O. V. (2021). Neyronni merezhi ta yikh zastosuvannya v keruvanni vyrobnychymy protsesamy [Neural networks and their application in production process control]. *Avtomatyzatsiya vyrobnytstva – Production automation*, 3. 45–53. [in Ukrainian].
3. Kim, Y., Park, J., & Lee, H. (2021). Architecture of an IoT-based remote monitoring system for agricultural machinery using GSM and LoRa. *Journal of Agriinformatics*, (3), 45–53.
4. Sydorenko, Yu. L., & Matviienko, P. O. (2022). Optymizatsiia system keruvannya na osnovi velykykh danykh ta shtuchnoho intelektu [Optimization of control systems based on big data and artificial intelligence]. *Naukovyi visnyk NUBiP – Scientific Bulletin of NULES*, 314, 152–161. [in Ukrainian].
5. Li, X., Chen, Y., & Wang, Q. (2023). Development of a telecommunication platform for specialized machinery monitoring. *Sensors & IoT Journal*, 17(4), 117–128.
6. Zio, E. (2019). Current approaches to digital twins for mobile technical systems. *Reliability Engineering & System Safety Reports*, 10, 102–115.
7. Wang, L., Zhao, Y., & Wei, T. (2022). Anomaly detection algorithms in machinery hydraulic systems using CNN and LSTM. *Journal of Intelligent Machinery*, 35(2), 203–214.
8. Tkachenko, O. Yu. (2022). Implementation of SCADA-system for remote monitoring of mobile machinery. *Visnyk NTU "KhPI". Series: Automation of Technical Systems*, (4), 78–86.
9. Kovalchuk, A. P., & Kopeiko, V. I. (2023). Integration of CAN/IoT protocols in mobile agricultural machinery. *Agriinformatics of Ukraine*, 2(12), 29–36.
10. Bosch Rexroth. (2022). Smart hydraulics: a concept for remote analysis of operating modes. *Bosch Technical Reports*, 24 p.
11. Koval'chuk S. P., Tkachenko I. Yu. (2022). Hibrydni metody optymizatsiyi v intelektual'nykh systemakh keruvannya [Hybrid optimization methods in intelligent control systems]. *Prykladna informatyka – Applied Computer Science*, 58(4). 98–107. [in Ukrainian].