

**Романенко О.О.**<https://orcid.org/0009-0008-9316-1941>

Криворізький національний університет

## Q-АНАЛІЗ СИСТЕМИ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Сучасний етап розвитку промислового сектору характеризується все більшим ускладненням архітектури технологічного обладнання та інтенсифікацією виробничих процесів. За таких умов, забезпечення безперебійної експлуатації технічних систем вимагає переходу від традиційних стратегій планово-попереджувального обслуговування до концепції прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance). Ефективність таких систем ТО визначається не лише точністю аналітичних алгоритмів, а й структурною стійкістю інформаційних зв'язків між їх функціональними модулями. Наявність прихованих архітектурних вразливостей може призводити до розриву критичних зв'язків та інформаційної ізоляції сегментів системи, що нівелює коректність прогнозних моделей. Попри значну кількість розробок у сфері діагностичних алгоритмів, питання топологічної цілісності та багатовимірної зв'язності архітектур PdM-систем залишаються недостатньо дослідженими.

У роботі проведено дослідження структури системи прогнозного технічного обслуговування із застосуванням методології Q-аналізу, яка дозволяє формалізувати архітектуру у вигляді багатовимірного симпліціального комплексу, що дає можливість кількісно оцінити приховані рівні інформаційної зв'язності та виявити топологічні бар'єри. Здійснено оцінку структурної цілісності та надійності системи представленої у джерелах. Встановлено, що така архітектура основана на послідовній топології передавання даних і є критично вразливою до відмов вузлів та має високий рівень топологічних перешкод. Доведено, що лінійність структури спричиняє ізоляцію функціональних модулів у разі втрати критичних зв'язків. Запропоновано вдосконалену функціональну схему з централізованим сховищем даних, що реалізує паралельний доступ до інформаційних ресурсів. Отримані результати підтверджують, що перехід до централізованої моделі збереження даних значно покращує топологічну цілісність системи прогнозного ТО. Застосування Q-аналізу дозволило об'єктивно верифікувати переваги запропонованої архітектури, що є критичним для забезпечення надійної роботи складного технологічного обладнання в межах концепції Predictive Maintenance.

**Ключові слова:** Q-аналіз, симплекс, симплекційний комплекс, технічне обслуговування, predictive maintenance, матриця інцидентності, структурний вектор, вектор перешкод.

**Постановка проблеми.** Розвиток промислового сектору як в Україні та і у світі характеризується ускладненням як обладнання, що використовується в технологічних процесах, так і самих технологічних процесів, тому актуальним є задача забезпечення безперебійної та надійної роботи технологічного обладнання. Традиційним інструментом підтримки працездатного стану обладнання впродовж його життєвого циклу є системи технічного обслуговування та ремонту. Провідним сучасним підходом є прогнозне технічне обслуговування (Predictive Maintenance), що використовує моніторинг стану агрегатів та аналіз даних для виявлення прихованих дефектів та прогнозування залишкового ресурсу ще до моменту настання поламак та виходу устаткування з ладу. Ефектив-

ність таких систем ТО напряму залежить від швидкості та надійності взаємодії їхніх функціональних модулів: від первинного збору даних з датчиків до роботи аналітичних алгоритмів прогнозування та модулів прийняття управлінських рішень.

Для створення надійної системи технічного обслуговування із прогнозуванням залишкового ресурсу обладнання важливими є не тільки алгоритми прогнозування та діагностики, а й сама структура системи, оскільки приховані архітектурні вразливості можуть бути причиною розриву критичних інформаційних зв'язків, що призводить до ізоляції окремих частин системи і робить неможливим прийняття адекватних рішень навіть за умови коректної роботи прогнозної частини системи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В ході аналізу наукових досліджень та публікацій за темою [1-5], було встановлено, що фокус переважної більшості робіт спрямований на аналітичну та алгоритмічну частини прогнозного технічного обслуговування. Хоча в таких роботах і наводяться структурні схеми та пропонується варіанти конфігурації подібних систем, залишається осторонь дослідження інформаційних зв'язків у таких схемах.

**Постановка завдання.** Враховуючи визначену прогалину в наукових розробках, метою дослідження є аналіз архітектури системи прогнозного технічного обслуговування для оцінки показників її топологічної цілісності та багатовимірної зв'язності.

**Виклад основного матеріалу.** В якості інструменту дослідження було обрано Q-аналіз, так як дана методологія з її математичним апаратом дозволяє формалізувати систему у вигляді багатовимірного симпліціального комплексу та кількісно оцінити приховані рівні інформаційної зв'язності між вузлами та цілісність системи.

В якості базової структури системи прогнозного технічного обслуговування взято схему (рисунок 1) запропоновану в [1].

Розглядаючи схему, наведену на рисунку 1, функціональну структуру системи можна подати як взаємодію двох скінченних множин: множини функціональних блоків (множина  $L$ ) та множини інформаційних потоків, що циркулюють між ними (множина  $F$ ). На основі виділених множин  $F$  та  $L$

формується матриця інцидентності  $\Lambda$ . Елемент матриці  $\lambda_{ij}=1$ , за умови, якщо функціональний блок  $L_i$  певним чином взаємодіє (генерує, використовує тощо) інформаційний потік  $F_j$ . У протилежному випадку  $\lambda_{ij}=0$ . Нижче наведена матриця інцидентності для системи,

$$\Lambda = \begin{bmatrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 & F_7 & F_8 & F_9 & F_{10} & F_{11} \\ L_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ L_2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ L_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ L_5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ L_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Першочергово виконується розрахунок розмірності симплексів за формулою наведеною в [6]:

$$dim(\sigma) = |\sigma| - 1 \tag{1}$$

Симплекси  $\sigma(L_2)$ ,  $\sigma(L_4)$ ,  $\sigma(L_5)$  мають по 4 одиниці, отже їх розмірність  $q = 3$ . Аналогічно визначено розмірність для інших симплексів:

$$q=3; q_3 = 3 \{x_2, x_4, x_5\}$$

$$q=2; q_2 = 2 \{x_3, x_6\}$$

$$q=1; q_1 = 2 \{x_1, x_7\}$$

Максимальна розмірність комплексу  $Q_{dimK}=3$  дорівнює трьом, тому  $Q_{dimK} = 3$ . Показник  $Q_{dimK}$  визначає розмірність першого структурного вектора, для формування якого необхідно обчислити кількість зв'язних компонентів на кожному

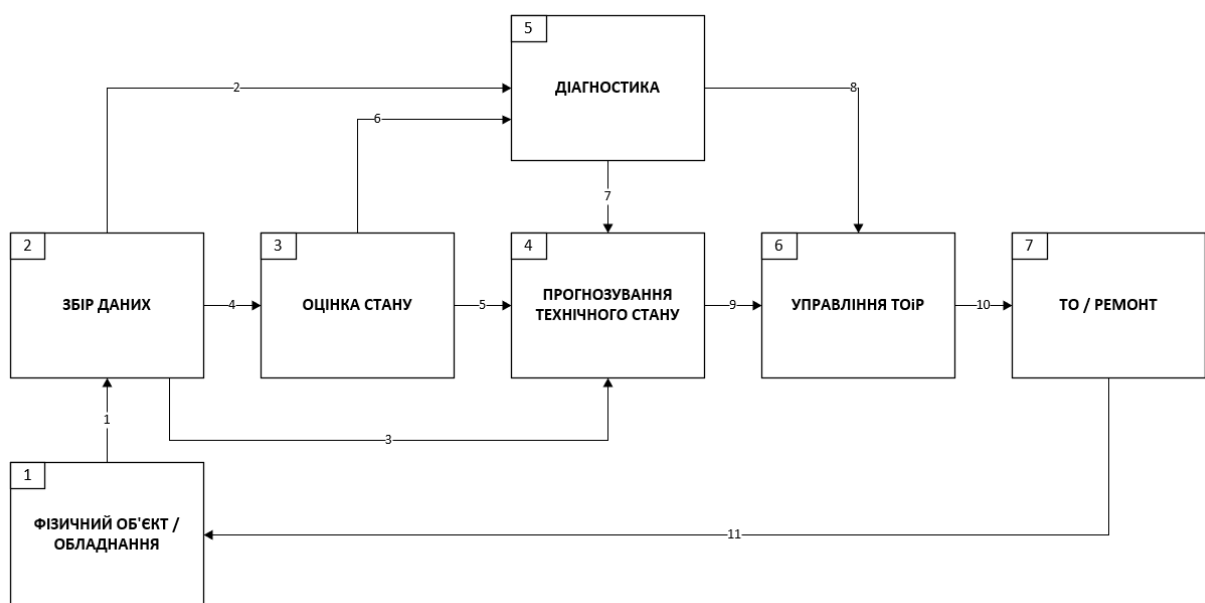


Рис. 1. Загальна функціональна схема прогностичного технічного обслуговування

наступному кроці зниження ієрархічного рівня системи. Нижче проведено розрахунок рівнів  $q$ -зв'язності для даної системи:

$$\begin{aligned} q=3; q_3 &= 3 \{x_2\}, \{x_4\}, \{x_5\} \\ q=2; q_2 &= 5 \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\} \\ q=1; q_1 &= 7 \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\} \\ q=0; q_0 &= 1 \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\} \end{aligned}$$

Перший структурний вектор комплексу  $Q_K$ , відповідно до [7] знаходиться за формулою:

$$Q_K = (Q_n, Q_{n-1}, \dots, Q_1, Q_0), \quad (2)$$

де  $Q_n = Q_{dimK}$

Раніше було встановлено, що  $Q_{dimK} = 3$ , отже  $Q_K = \{Q_3, Q_2, Q_1, Q_0\}$ . Підставляючи значення у формулу отримуємо:

$$Q_K = \{3, 5, 7, 1\}$$

Спираючись на отримані значення першого структурного вектора, перейдемо до визначення вектора перешкод  $D$ , який слугує математичним індикатором наявності топологічних перепон у структурі зв'язків на кожному рівні розмірності. Відповідно до [8] вектор перешкод  $D$  визначається як:

$$D = \{Q_K - I\}, \quad (3)$$

де  $I$  – одиничний вектор

$$D = ((3-1), (5-1), (7-1), (1-1)) = (2, 4, 6, 0)$$

Таким чином, визначено, що симпліціальний комплекс є зв'язним лише на нульовому рівні розмірності  $q_0 = 1$ . Для проміжних та великих значень зв'язності ( $q=1, 2, 3$ ) комплекс розпадається на 7, 5 та 3 незв'язних компоненти відповідно. Вектор перешкод  $D$  свідчить про те, що багатоканальний обмін даними в системі, з наведеною на рисунку 1 архітектурою, ускладнений, оскільки перешкода дорівнює нулю лише на найнижчому рівні зв'язності. Така архітектура системи має строгий послідовний характер інформаційних потоків між блоками.

Також, встановлено, що блоки 2, 4, 5 («Збір даних», «Прогнозування», «Діагностика») мають максимальну розмірність у системі ( $q = 3$ ). Кожен із них оперує 4 інформаційними потоками (зв'язками), що робить їх геометрично найскладнішими елементами системи – 3-вимірними симплексами (тетраедрами). Оскільки загальний показник структурної надлишковості системи вкрай низький (на рівні 0-зв'язності), ці блоки виступають головними вузлами перетину. Спотворення даних у будь-якому з цих вузлів миттєво перериває передачу даних, що унемож-

ливає адекватне управління технічним обслуговуванням і призводить до відмови всієї системи.

За результатами проведеного аналізу встановлено, що існуюча структура системи прогнозного ТО має жорстку послідовну архітектуру, що робить її вразливою до зупинки всього процесу при відмові хоча б одного вузла. З огляду на це, виникає необхідність оптимізувати топологію системи, забезпечивши її відмовостійкість, паралельну обробку даних та високу структурну цілісність. Вирішення цієї задачі пропонується здійснити шляхом переходу від лінійної передачі інформації до архітектури на базі єдиного сховища даних.

Було розроблено функціонально-структурну схему системи прогнозного ТО, яка враховує всі, зазначені вище зауваження. Оновлена схема представлена на рисунку 2. Ключовою відмінністю оновленої схеми стало єдине сховище даних (Блок 8 «Збереження даних»), у якому акумулюється інформація від усіх блоків, які генерують ті чи інші дані. Окрім цього, до такого сховища мають доступ і інші блоки. Таким чином, стає можливим паралельний доступ до даних, що дозволяє уникати послідовних залежностей між вузлами системи та виключає ризик інформаційної ізоляції вузлів у разі локальних апаратних чи програмних збоїв.

Матриця інцидентності для оптимізованої функціональної схеми системи прогнозного технічного обслуговування ( $\Lambda_N$ ) матиме наступний вигляд:

$$\Lambda_N = \begin{bmatrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 & y_6 & y_7 & y_8 & y_9 \\ x_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_4 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_5 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ x_6 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ x_7 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_8 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

На відміну від класичної теорії графів, де взаємодія між вершинами визначається наявністю прямого ребра (з'єднання) [9], апарат  $Q$ -аналізу має іншу природу зв'язності. У математичному апараті  $Q$ -аналізу зв'язок між симплексами, в даному випадку, між функціональними блоками, формується виключно на основі спільних вершин. З огляду на це, заповнення матриці значеннями «1» для симплексів, які на структурній схемі можуть не мати прямого послідовного з'єднання, що пояснюється тим, що блок 8 (Збереження даних) формує єдиний інформаційний простір,

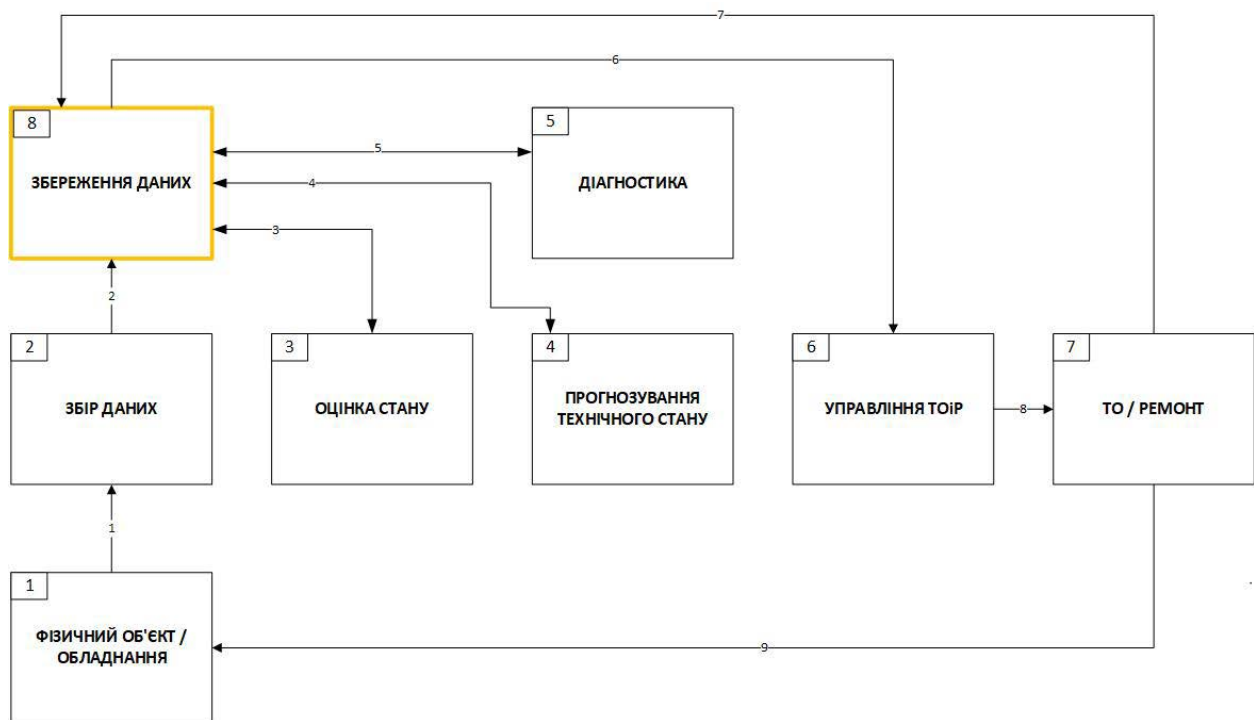


Рис. 2. Оновлена функціональна схема системи прогнозного технічного обслуговування

а будь-який функціональний модуль (наприклад, блок оцінки стану, прогнозування чи діагностики), який має права доступу до цього сховища, автоматично отримує доступ до всього комплексу, агрегованих у ньому даних. Тобто симплекси отримують «1» у відповідних стовпцях не через наявність прямого зв'язку між собою, а через факт спільного доступу до банку інформації.

Максимальна розмірність комплексу в оновленій системі дорівнює визначається симплексом  $x_7$  (блок «ТО / Ремонт») та дорівнює 7.

Визначення рівнів  $q$ -зв'язності для оновленої схеми:

$$\begin{aligned}
 q=7; q_7 &= 1 \{x_7\} \\
 q=6; q_6 &= 2 \{x_7, x_6\}, \{x_2\} \\
 q=5; q_5 &= 1 \{x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\} \\
 q=4; q_4 &= 1 \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\} \\
 q=3; q_3 &= 1 \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\} \\
 q=2; q_2 &= 1 \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\} \\
 q=1; q_1 &= 2 \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2\}, \{x_1\} \\
 q=0; q_0 &= 1 \{x_8, x_7, x_6, x_5, x_4, x_3, x_2, x_1\}
 \end{aligned}$$

Вектор  $Q_N = \{1, 2, 1, 1, 1, 1, 2, 1\}$  показує, що запропонована структура дозволяє уникнути виявленої раніше вразливості послідовних ланцюгів передавання. Утримання системою стану єдиної компоненти

зв'язності на чотирьох послідовних рівнях високої розмірності (від  $q=5$  до  $q=2$ ) свідчить про наявність структурної надлишковості. Це означає, що інформаційні потоки дублюються через спільний багатовимірний простір параметрів, гарантуючи, що вихід з ладу окремих каналів передачі даних не призведе до фрагментації системи чи зупинки процесу управління технічним обслуговуванням.

Для виявлення наявних топологічних бар'єрів або розривів, що заважають вільному розповсюдженню даних між функціональними блоками, виконаємо розрахунок вектора перешкод за формулою (3).

На основі отриманого раніше вектора  $Q_N$ , вектор перешкод для оптимізованої системи має вигляд:

$$D_N = \{0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0\}$$

Як видно, в оптимізованій структурі майже немає топологічних бар'єрів при обміні даними, що гарантує відсутність вузьких місць та забезпечує можливість паралельної роботи алгоритмів прогнозування і діагностики.

**Висновки.** У ході дослідження було проведено аналіз архітектури системи прогнозного технічного обслуговування за допомогою методології  $Q$ -аналізу, що дозволило кількісно оцінити її топологічну цілісність та рівні інформаційної зв'язності. Встановлено, що базова струк-

тура системи є топологічно вразливою та сильно фрагментованою, оскільки її структурна цілісність забезпечується лише на найнижчому рівні. Для усунення цієї вразливості запропоновано та обґрунтовано перехід до зв'язної топологічної моделі на базі єдиного багатовимірного сховища даних. За допомогою математичного апарату  $Q$ -аналізу доведено ефективність оптимізованої архітектури. Розрахунки показали, що в оптимізо-

ваній системі рівень зв'язності суттєво зріс – вона зберігає цілісність на чотирьох послідовних рівнях високої розмірності. Таким чином, використання  $Q$ -аналізу підтвердило, що створення архітектури з централізованим збереженням даних є критично важливим для забезпечення надійної та безперебійної роботи сучасного технологічного обладнання в рамках концепції Predictive Maintenance.

#### Список літератури:

1. “The Standardisation Roadmap of Predictive Maintenance for SinoGerman Industrie 4.0 / Intelligent Manufacturing,” 2018.
2. van Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Reference architecture for digital twin-based predictive maintenance systems. *Computers & Industrial Engineering*. 2023. P. 109099. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109099>
3. Maintenance 4.0: Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture / A. Cachada et al. *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Turin, 4–7 September 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/etfa.2018.8502489>
4. Sang G. M., Xu L., de Vrieze P. A Predictive Maintenance Model for Flexible Manufacturing in the Context of Industry 4.0. *Frontiers in Big Data*. 2021. Vol. 4. URL: <https://doi.org/10.3389/fdata.2021.663466> (date of access: 25.03.2026).
5. Predictive Maintenance in Industry 4.0 / G. M. Sang et al. *ICIST'20: 10th International Conference on Information Systems and Technologies*, Lecce Italy. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3447568.3448537> (date of access: 25.03.2026).
6. Полуциганова В., Смирнов С. Методологія побудови основних метрик  $Q$ -аналізу та їх застосування. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2019. №3. URL: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2019.3.07>.
7. Медведенко В., Смирнов С. Використання алгоритмів  $Q$ -аналізу на прикладі банківської системи. «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»: Матеріали XVI Всеукр. науково-практ. конференції студентів, аспірантів та молодих вчен., м. Київ, 26–27 квіт. 2018 р. Київ, 2018. С. 33–36.
8. Atkin R. H. *Combinatorial Connectivities in Social Systems*. – 1997. – 200 p
9. Темнікова О. Дискретна математика (Частина 1) : конспект лекцій. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 154 с.

#### Romanenko O.O. Q-ANALYSIS OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SYSTEM

*The current stage of development in the industrial sector is characterized by a significant and increasing complexity in the architecture of technological equipment and the intensification of production processes. Under these conditions, ensuring the uninterrupted operation of technical systems requires a transition from traditional planned preventive maintenance strategies to the concept of predictive maintenance (PdM).*

*The effectiveness of such maintenance systems is determined not only by the accuracy of prediction algorithms but also by the structural stability of the data links between their functional constituents. The presence of hidden architectural vulnerabilities may lead to the disruption of critical links and the information isolation of system segments, which negates the correctness of predictive models. Despite a significant number of developments in the field of diagnostic and prediction algorithms, the issues of topological integrity and multidimensional connectivity of PdM system architectures remain insufficiently studied.*

*In this work, a study of the structure of the predictive maintenance system was conducted using the  $Q$ -analysis methodology. This approach allows the formalization of the architecture in the form of a multidimensional simplicial complex, enabling the quantitative assessment of hidden levels of information connectivity and the identification of topological barriers.*

*An assessment of the structural integrity and reliability of the system presented in the literature was carried out. It was established that this architecture is based on a sequential data transmission topology and is critically vulnerable to node failures, exhibiting a high level of topological obstacles. It was proven that the linearity of the structure causes the isolation of functional modules in the event of the loss of critical links.*

*An improved functional scheme with a centralized data storage was proposed, which implements parallel access to information resources. The obtained results confirm that the transition to a centralized data storage model significantly improves the topological integrity of the predictive maintenance system.*

*The application of  $Q$ -analysis made it possible to objectively verify the advantages of the proposed architecture, which is critical for ensuring the reliable operation of complex technological equipment within the Predictive Maintenance concept.*

**Keywords:**  $Q$ -analysis, Predictive Maintenance, simplex, simplicial complex, incidence matrix, structure vector, obstruction vector.

Дата першого надходження статті до видання: 16.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026