

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ НАДІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ У РАДІАЦІЙНО-НАВАНТАЖЕНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до забезпечення стабільної передачі слабких сигналів у термоядерних реакторах в умовах впливу іонізуючого та нейтронного випромінювання. Розглянуто переваги та обмеження коаксіальних, мінерально-ізольованих, оптичних і гібридних ліній передачі. Запропоновано концепцію гібридних трактів, що поєднують мінерально-ізольовані та оптичні елементи з цифровими методами компенсації спотворень і системами самодіагностики.

Ключові слова: термоядерний реактор, слабкі сигнали, іонізуюче та нейтронне випромінювання, радіаційностійкі лінії передачі, цифрова компенсація спотворень, самодіагностика, стабільність сигналу.

Вступ

У сучасних термоядерних установках, таких як ITER, Wendelstein-7X, JT-60SA, передавання сигналів від сенсорів до обчислювальних систем відбувається в умовах іонізуючого та нейтронного випромінювання, високих температур і магнітних полів, що ускладнює збереження якості сигналів [1].

Надійність трактів слабких сигналів визначає точність вимірювання параметрів плазми та стабільність керування магнітними контурами [2]. Випромінювання змінює електричні властивості матеріалів, що призводить до фазових і амплітудних спотворень у довгих лініях та зниження SNR [3].

Метою роботи є розроблення підходів до створення надійних систем передавання даних у радіаційно-навантажених середовищах шляхом удосконалення структури трактів, добору стійких матеріалів і впровадження гібридних технологій із цифровою компенсацією та самодіагностикою.

Результати дослідження

Аналіз сучасних досліджень показує, що традиційні коаксіальні лінії з полімерною ізоляцією (PTFE, FEP) мають обмежену придатність до роботи в умовах інтенсивного іонізуючого випромінювання. При дозах понад 10^4 Gy спостерігається деградація діелектрика, зростання втрат на 15–25 % і поява фазових спотворень, що знижує достовірність переданих сигналів [2].

Мінерально-ізольовані кабелі на основі оксидів магнію (MgO) та алюмінію (Al_2O_3) демонструють суттєво вищу радіаційну стійкість – до 10^7 Gy і робочі температури до 900 °C (табл. 1). Вони зберігають електричні параметри навіть після тривалого опромінення, проте відзначаються високою жорсткістю і складністю монтажу, що обмежує їх застосування у складних конструкціях реакторних діагностичних систем [4].

Таблиця 1. Порівняльні характеристики типів ліній передачі

Тип лінії	Радіаційна стійкість (Gy)	Температура, °C	SNR, dB	Примітка
Коаксіальна (PTFE)	10^4	до 250	45-50	Обмежена стабільність
Мінерально-ізольована (MgO)	10^7	до 900	60-70	Висока надійність
Оптична	10^5	до 300	80+	Радіаційне затемнення скла
Гібридна (оптика + мідь)	10^6 - 10^7	до 600	70-80	Оптимальне рішення

Оптичні лінії передачі характеризуються високою пропускнуою здатністю (до сотень Гбіт/с), електромагнітною сумісністю та стабільними хвильовими характеристиками. Водночас, під

впливом радіації у скляному волокні виникає ефект радіаційного затемнення, який погіршує прозорість матеріалу та збільшує загасання сигналу при дозах понад 10^5 Gy [1].

Перспективним напрямом розвитку є гібридні тракти передачі (комбінація оптичних і мінерально-ізолюваних елементів), які забезпечують компроміс між гнучкістю конструкції, радіаційною стійкістю та стабільністю параметрів. Такі системи демонструють високу адаптивність до зовнішніх умов і збереження стабільності сигналу при тривалому опроміненні [3].

Висновки

Проведений огляд показав, що забезпечення надійної передачі слабких сигналів у радіаційно-навантажених середовищах можливе за рахунок комплексного підходу, який включає використання радіаційностійких матеріалів (MgO, Al₂O₃, кварцове волокно), впровадження гібридних трактів передачі, що поєднують мінерально-ізолювані та оптичні компоненти, а також застосування цифрових методів компенсації спотворень. Додаткову стабільність забезпечують системи самодіагностики, здатні в реальному часі контролювати параметри лінії та адаптивно компенсувати вплив деградаційних процесів. Запропонований підхід формує основу для створення високонадійних інформаційних систем у термоядерній енергетиці та інших галузях, де наявні умови інтенсивного опромінення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang, Y., Li, J., & Zhao, M. Radiation-resistant fiber optic sensors for fusion reactor diagnostics [Електронний ресурс] // *Fusion Engineering and Design*. - 2024. - Vol. 198. - Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0920379624000139> (дата звернення: 21.10.2025). - Назва з екрана.
2. Kozlov, A., & Shurygin, V. Development of radiation-resistant materials for data transmission in fusion facilities [Електронний ресурс] // *Journal of Fusion Energy*. - 2022. - Vol. 41, № 2. - Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10894-022-00334-8> (дата звернення: 21.10.2025). - Назва з екрана.
3. Pezzini, A., Mora, A., & Jackson, D. Advances in radiation-hardened signal processing electronics for plasma diagnostics [Електронний ресурс] // *Frontiers in Physics*. - 2024. - Vol. 12. - Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11125778/> (дата звернення: 23.10.2025).
4. International Science and Technology Center (ISTC). Development of radiation-resistant data transmission systems for nuclear applications [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.istc.int/projects/584> (дата звернення: 26.10.2025).

Кость Павло Ігорович – аспірант, спеціальності G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: pavlo.kost.asp.2025@lpnu.ua

Науковий керівник: **Гліненко Лариса Костянтинівна** - кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: larysa.k.hlinenko@lpnu.ua

MODERN APPROACHES TO CREATING RELIABLE DATA TRANSMISSION SYSTEMS IN RADIATION-LOADED ENVIRONMENTS

Abstract. The paper analyses modern approaches to ensuring stable transmission of weak signals in thermonuclear reactors under the influence of ionising and neutron radiation. The advantages and limitations of coaxial, mineral-insulated, optical and hybrid transmission lines are considered. A concept of hybrid paths combining mineral-insulated and optical elements with digital distortion compensation methods and self-diagnostic systems is proposed.

Keywords: thermonuclear reactor, weak signals, ionising and neutron radiation, radiation-resistant transmission lines, digital distortion compensation, self-diagnostics, signal stability.

Kost Pavlo Ihorovich – postgraduate student, specialising in G5 Electronics, Electronic Communications, Instrument Engineering and Radio Engineering, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: pavlo.kost.asp.2025@lpnu.ua

Scientific supervisor: **Hlinenko Larysa Kostiantynivna**– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electronic Means of Information and Computer Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: larysa.k.hlinenko@lpnu.ua