

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Український державний університет залізничного транспорту

Кафедра автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів

**РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ
З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗПОДІЛЕНИХ АКУСТИЧНИХ СЕНСОРІВ**

Пояснювальна записка

**ДО ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ПЕРШОГО ОСВІТНЬОГО
СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

ВКР.01.26.01.20.ПЗ

Розробив слухач групи 211-АКІТР-д24

_____ Максим Канєвський

Керівник доц., к.т.н.

_____ Сергій Змій

Рецензент доц., к.т.н.

Харків, 2026

Annotation

This qualification paper explores the application of fiber-optic distributed acoustic sensing (DAS) and neural networks to enhance railway transport safety and efficiency through continuous train integrity and track condition monitoring. A critical analysis of existing monitoring methods is performed, highlighting their limitations, and the advantages of DAS technology, such as immunity to electromagnetic interference, long-distance monitoring capabilities, and cost-effectiveness, are substantiated. The principles of operation for various fiber-optic sensors and their application in detecting deformations and vibrations are detailed.

The scientific novelty of this research lies in the development and substantiation of a fundamentally new approach to utilizing existing telecommunication cables as distributed acoustic sensors for rolling stock identification under hardware constraints. Unlike traditional localized sensor applications, this work proposes a method for software compensation of the Gauge Length effect using deep learning.

Vibration analysis is conducted to understand the propagation of rolling stock-induced waves and to detect anomalies based on signal spectrum changes. Significant attention is given to integrating neural networks (CNN-LSTM, Autoencoder, U-Net) for automated processing and classification of sensor data. This enabled high accuracy in train type recognition (98.5%) and effective wheel defect detection without the need for a large labeled fault database. An algorithm for spatial signal deconvolution using the U-Net architecture is proposed, ensuring accurate axle counting even when signals merge in the raw sensor output, effectively transforming DAS into a precision accounting tool.

Keywords: railway rails, monitoring, distributed acoustic sensing, DAS, fiber optic sensors, proactive detection, track integrity, elastic waves, traffic safety

Анотація

У кваліфікаційній роботі досліджено застосування волоконно-оптичних сенсорів (DAS) та нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності залізничного транспорту шляхом суцільного моніторингу цілісності поїзда та стану колії. Виконано критичний аналіз існуючих методів контролю, виявлено їхні обмеження та обґрунтовано переваги технології розподіленого акустичного сенсингу, такі як несприйнятливість до електромагнітних завад, велика дальність дії та економічна ефективність. Детально розглянуто принципи роботи різних типів волоконно-оптичних сенсорів та їх застосування для детекції деформацій і вібрацій.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні принципово нового методу використання існуючих телекомунікаційних кабелів як розподілених акустичних сенсорів для ідентифікації рухомого складу в умовах апаратних обмежень. На відміну від традиційних точкових рішень, запропоновано метод програмної компенсації ефекту бази вимірювання (Gauge Length) за допомогою глибокого навчання.

Проведено вібраційний аналіз для розуміння поширення хвиль від рухомого складу та виявлення аномалій на основі змін спектру сигналу. Значну увагу приділено інтеграції нейронних мереж (CNN-LSTM, Autoencoder, U-Net) для автоматизованої обробки та класифікації сенсорних даних. Це дозволило досягти високої точності розпізнавання типів поїздів (98.5%) та ефективного виявлення дефектів коліс без необхідності створення великої розміченої бази несправностей. Запропоновано алгоритм просторової деконволюції сигналу за допомогою мережі U-Net, що забезпечує точний підрахунок осей навіть при їхньому злитті у вихідному сигналі сенсора, перетворюючи DAS на прецизійний інструмент обліку.

Ключові слова: залізничні рейки, моніторинг, розподілене акустичне зондування, DAS, волоконно-оптичні сенсори, проактивне виявлення, цілісність колії, пружні хвилі, безпека руху.

Зміст

Вступ	7
1 Аналіз відомих методів ідентифікації рухомого складу та постановка задач дослідження	10
1.1 Огляд традиційних методів ідентифікації рухомого складу	10
1.2 Переваги волоконно-оптичних сенсорів	14
1.3 Фундаментальні проблеми БОС при вирішенні задач ідентифікації на ВШМ	18
1.4 Обґрунтування методу програмного подолання апаратних обмежень DAS за допомогою технологій глибокого навчання	18
1.5 Висновки до розділу	18
2 Проектування системи ідентифікації рухомого складу на основі DAS та глибокого навчання	25
2.1 Розробка структурної схеми інформаційної системи	25
2.2 Розробка функціональної схеми системи ідентифікації рухомого складу на основі DAS та глибокого навчання	28
2.3 Проектування модуля класифікації рухомого складу	30
2.4. Проектування модуля діагностики аномалій рухомого складу	33
2.5. Проектування модуля композиційного аналізу (U-Net Deconvolution)	34
2.6 Висновки до розділу	37
3 Імітаційне моделювання роботи системи ідентифікації	39
3.1 Вибір середовища та інструментів імітації	39
3.2. Розробка методики генерації синтетичних даних для навчання нейромережових моделей ідентифікації рухомого складу	53
3.3 Імітаційне моделювання роботи системи ідентифікації	67
3.4 Аналіз та інтерпретація результатів моделювання	78
3.5 Висновки до розділу	87
Висновки	90
Список використаних джерел	Ошибка! Закладка не определена.

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Канєвський			Розроблення системи ідентифікації високошвидкісних поїздів з використанням розподілених акустичних сенсорів	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перев.		Змій					6	103	
						УкрДУЗТ			
Н. контр									
Затв.									

Вступ

Сучасний етап розвитку залізничного транспорту, що характеризується впровадженням високошвидкісних магістралей та підвищенням інтенсивності перевезень, висуває якісно нові вимоги до систем забезпечення безпеки руху та діагностики інфраструктури. Традиційні дискретні засоби контролю, такі як рейкові ланцюги, лічильники осей, системи радіочастотної ідентифікації та пости акустичного контролю, забезпечують моніторинг лише в окремих точках маршруту, залишаючи неконтрольованими протяжні ділянки колії, що створює ризики пропуску передаварійних станів рухомого складу. Крім того, складна електромагнітна обстановка на електрифікованих ділянках високошвидкісних магістралей суттєво знижує надійність класичних електронних датчиків. Враховуючи це, стратегічним напрямком розвитку галузі є перехід до технологій безперервного моніторингу, серед яких найбільш перспективною вбачається технологія розподіленого акустичного сенсингу (DAS). Вона дозволяє використовувати існуючі волоконно-оптичні кабелі як масив віртуальних датчиків вібрації. Проте широке впровадження DAS стримується низкою невирішених науково-технічних проблем, зокрема ефектом бази вимірювання (Gauge Length), що призводить до просторового розмиття сигналів від близько розташованих осей, та низьким співвідношенням сигнал/шум. У зв'язку з цим, розробка нових методів обробки сигналів DAS із застосуванням технологій глибокого навчання для точної ідентифікації та діагностики рухомого складу є актуальною науково-прикладною задачею.

Кваліфікаційна робота виконується у контексті пріоритетних напрямків модернізації транспортної інфраструктури, спрямованих на цифровізацію залізниць та впровадження інтелектуальних транспортних систем (Smart Railway) для переходу до стратегії обслуговування за фактичним станом.

					ВКР.01.25.01.20.ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

Список використаних джерел

1. Costa, F. A Review of RFID Sensors, the New Frontier of Internet of Things [Text] / F. Costa, S. Genovesi, M. Borgese, A. Michel, F. A. Dicandia, G. Manara // Sensors. 2021. Vol. 21, 3138. <https://doi.org/10.3390/s21093138>.
2. Introducing and Investigating New Train Identification Methods [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/374809099_Introducing_and_Investigating_New_Train_Identification_Methods.
3. Bilan, S. Identification of Rolling Stock of Railways Based on Multi-Projection Image Processing Methods [Text] / S. Bilan // IT&I-2020 Information Technology and Interactions: conference proceedings, December 02–03, 2020. – Kyiv: KNU Taras Shevchenko, 2020.
4. Entezami, M. Wayside Acoustic Monitoring Techniques for Railway Axlebox Bearings on High-Speed Lines [Electronic resource] / M. Entezami // WCRR 2016: conference proceedings (Milan). – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/340695331_Wayside_Acoustic_Monitoring_Techniques_for_Railway_Axlebox_Bearings_on_High-Speed_Lines. – (Date of access: 17.11.2025).
5. Zmii, S. Information Support of the Task of Rolling Stock Health Management [Text] / S. Zmii, I. Siroklyn, V. Sahaidachnyi, I. Korago // International Conference on Technics, Technologies and Education (ICTE 2019). – 2019.
6. Zhukovytskyi, I. The procedure for identifying trains using information from ASK VP UZ-E [Text] / I. Zhukovytskyi, O. Yehorov // Information and security systems in railway transport. – Kharkiv. – 2015. – № 6 (115). – P. 61–66.
7. Feasibility of flaw detection in railroad wheels using acoustic signatures [Electronic resource]. – Mode of access: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/15674/Feasibility%20of%20Flaw%20Detection%20in%20Railroad%20Wheels%20Using%20Acoustic%20Signatures.pdf
8. Канєвський, М. Застосування волоконно-оптичних сенсорів і нейромереж для контролю вільності колії та цілісності рейок на залізничному транспорті [Текст]: випускна кваліф. робота бакалавра / М. Канєвський. – Х.: Укр. держ. ун-т залізнич. трансп., 2025. 10. Rail-Mounted Optical Fiber Sensors for Monitoring Track Transitions [Electronic resource] // ROSA P. – Mode of access: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/72679/dot_72679_DS1.pdf.

9. Fiber Bragg Grating Sensors [Electronic resource]. – Mode of access: <https://bdt.semi.ac.cn/library/upload/files/2022/7/26111630826.pdf>.
10. Real-Time Train Tracking from Distributed Acoustic Sensing Data [Electronic resource] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, iss. 2. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/448>.
11. Distributed Acoustic Sensing for railways explained [Electronic resource] // Sensoric. – Mode of access: <https://www.sensoric.com/en/blog/distributed-acoustic-sensing-for-railways-explained--3240/>.
12. Time frequency analysis and event detection in noise signals [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/259298744_Time_frequency_analysis_and_event_detection_in_noise_signals.
13. An Analysis of Railway Activity Using Distributed Optical Fiber Acoustic Sensing [Text] // Sensors. – 2025. – Vol. 25, iss. 13. – 4180. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/13/4180>.
14. Smart Railway Traffic Monitoring Using Fiber Bragg Grating Strain Gauges [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9099937/>.
15. Fiber Optic Sensing System for Weighing In Motion (WIM) and Wheel Flat Detection (WFD) in railways assets: the TWBCS system [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/327402906>.
16. Railroad Condition Monitoring Using Distributed Acoustic Sensing and Deep Learning Techniques [Electronic resource] // Digital Commons at Georgia Southern. – Mode of access: https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/context/etd/article/3946/viewcontent/auto_convert.pdf.
17. Field trial of railway track defect detection with DAS [Electronic resource] // SPIE Digital Library. – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13639/136395O/Field-trial-of-railway-track-defect-detection-with-DAS/10.1117/12.3061138.full>.
18. Railway track monitoring using distributed acoustic sensing (DAS) with standard telecom cable [Electronic resource] // SPIE Digital Library. – Mode of access: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/13639/136396O/Railway-track-monitoring-using-distributed-acoustic-sensing-DAS-with-standard/10.1117/12.3062236.full>.
19. Rail track support condition monitoring with distributed acoustic sensing (DAS) system [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/391292571>.

20. Research Advances on Distributed Acoustic Sensing Technology for Seismology [Text] // Applied Sciences. – Vol. 12, iss. 3. – 196. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2304-6732/12/3/196>.
21. Distributed Acoustic Sensing for Monitoring Linear Infrastructures: Current Status and Trends [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9572166/>.
22. Tracking and classifying objects with DAS data along railway [Electronic resource] // arXiv. – Mode of access: <https://arxiv.org/html/2405.01140v1>.
23. Strategies for mitigating polarization fading in a DAS with homodyne detection and delayed self-mixing [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/396024824>.
24. Real-Time Railway Hazard Detection Using Distributed Acoustic Sensing and Hybrid Ensemble Learning [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12251868/>.
25. A review of distributed acoustic sensing applications for railroad condition monitoring [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/376478894>.
26. Audio Classification of Low Feature Spectrograms Utilizing Convolutional Neural Networks [Electronic resource] // arXiv. – Mode of access: <https://arxiv.org/html/2410.21561v1>.
27. Acoustic Monitoring of Railway Defects Using Deep Learning with Audio to Spectrogram Conversion [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/370680566>.
28. Struggling with Autoencoder-Based Anomaly Detection for Fraud Detection [Electronic resource] // Reddit. – Mode of access: https://www.reddit.com/r/MachineLearning/comments/1gl92zm/d_struggling_with_auto_encoderbased_anomaly/.
29. Yuan, S. Spatial Deep Deconvolution U-Net for Traffic Analyses with DAS [Electronic resource] / S. Yuan // Cédric Richard Personal Website. – Mode of access: <http://www.cedric-richard.fr/Articles/yuan2022spatial.pdf>.
30. Railway Track Inspection Using Deep Learning Based on Audio to Spectrogram Conversion: An on-the-Fly Approach [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8914836/>.
31. Application of Distributed Acoustic Sensing in Geophysics Exploration: Comparative Review of Single-Mode and Multi-Mode Fiber Optic Cables [Text] // Applied Sciences. – Vol. 14, iss. 13. – 5560. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/13/5560>.
32. Ishmatuka, C. Autoencoder: Anomaly Detection for Vibration Data [Electronic resource] / C. Ishmatuka // Medium. – Mode of access:

<https://cendikiaishmatuka.medium.com/autoencoder-anomaly-detection-for-vibration-data-6c1dff82fd43>.

33. Short-Time Fourier Transforms [Electronic resource] // Carnegie Mellon University. – Mode of access: https://course.ece.cmu.edu/~ece491/lectures/L25/STFT_Notes_ADSP.pdf.

34. Fayek, H. Speech Processing for Machine Learning: Filter banks, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) and What's In-Between [Electronic resource] / H. Fayek. – Mode of access: <https://haythamfayek.com/2016/04/21/speech-processing-for-machine-learning.html>. 37. Zhao, Y. Acoustic scene classification by bi-lstm-cnn-net multichannel fusion [Electronic resource] / Y. Zhao [et al.] // DCASE 2018. – Mode of access: https://dcase.community/documents/challenge2018/technical_reports/DCASE2018_Zhao_16.pdf.

35. Human activity recognition: an approach 2D CNN-LSTM to sequential image representation and processing of inertial sensor data [Text] // AIMS Bioengineering. – 2024. – Mode of access: <https://www.aimspress.com/article/doi/10.3934/bioeng.2024024?viewType=HTML>.

36. Utilizing CNN-LSTM techniques for the enhancement of medical systems [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10105249/>.

37. Autoencoder [Electronic resource] // Wikipedia. – Mode of access: <https://en.wikipedia.org/wiki/Autoencoder>.

38. Acoustic Anomaly Detection of Machinery using Autoencoder based Deep Learning [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/378539764>.

39. Dhupar, B. Loss Functions in Simple Autoencoders: MSE vs. L1 Loss [Electronic resource] / B. Dhupar // Medium. – Mode of access: <https://medium.com/@bhipanshudhupar/loss-functions-in-simple-autoencoders-mse-vs-l1-loss-4e838ae425b9>.

40. A Mathematical Explanation of UNet [Electronic resource] // arXiv. – Mode of access: <https://arxiv.org/html/2410.04434v1>.

41. Railway traffic monitoring with trackside fiber-optic cable by distributed acoustic sensing Technology [Text] // Frontiers in Earth Science. – 2022. – Mode of access: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.990837/full>.

42. The Effectiveness of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Broken Rail Detection [Text] // Energies. – 2023. – Vol. 16, iss. 1. – 522. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/522>.

43. Zhang, Z. 2D localization for railway perimeter safety using distributed acoustic sensing [Electronic resource] / Z. Zhang, H. Xu, X. Liu // IOPscience. – 2025. – Mode of access: [URL].

44. Python 3.9.1 Documentation [Electronic resource] // Python Software Foundation. – Mode of access: <https://docs.python.org/3/>.
45. DASCore: a Python Library for Distributed Fiber Optic Sensing [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11440623/>.
46. What is TensorFlow? Core Components & Benefits [Electronic resource] // Pickl.AI. – Mode of access: <https://www.pickl.ai/blog/what-is-tensorflow-components-benefits/>.
47. Harris, C. R. Array programming with NumPy [Text] / C. R. Harris [et al.] // Nature. – 2020. – Vol. 585. – P. 357–362. – Mode of access: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32939066/>.
48. Direction-dependent strain transfer function of DAS considering gauge length and pulse shape [Electronic resource] // OnePetro. – Mode of access: <https://onepetro.org/SEGAM/proceedings-pdf/IMAGE22/IMAGE22/D011S194R003/3030278/seg-2022-w6-03.pdf>.
49. Virtanen, P. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python [Text] / P. Virtanen [et al.] // Nature Methods. – 2020. – Mode of access: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32015543/>.
50. Pat. US9702244B2. Distributed acoustic sensing gauge length effect mitigation [Electronic resource] / [Inventors]. – Mode of access: <https://patents.google.com/patent/US9702244B2/en>.
51. Why Ricker Wavelets Are Successful in Processing Seismic Data: Towards a Theoretical Explanation [Electronic resource] // ScholarWorks at UTEP. – Mode of access: https://scholarworks.utep.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1859&context=cs_techrep.
52. Characterisation of train kinematics and source wavelets from near-field seismic data [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/378463997>.
53. McFee, B. librosa: Audio and Music Signal Analysis in Python [Text] / B. McFee [et al.] // Proceedings of the 14th Python in Science Conference. – 2015.
54. Inoue. Fault Diagnosis of Railway Assets Using Acoustic Monitoring [Electronic resource]: PhD thesis / Inoue ; University of Birmingham. – 2024. – Mode of access: <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/14695/7/Inoue2024PhD.pdf>.
55. Audio Analysis With Machine Learning: Building AI-Fueled Sound Detection App [Electronic resource] // AltexSoft. – Mode of access: <https://www.altexsoft.com/blog/audio-analysis/>.
56. Fault Detection and Diagnosis of Railway Point Machines by Sound Analysis [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4851063/>.

57. Railway Track Fault Detection Using Selective MFCC Features from Acoustic Data [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10460052/>.

58. Abadi, M. TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning [Text] / M. Abadi [et al.] // Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation. – Savannah, USA, 2016. – P. 265–283.

59. Ronneberger, O. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation [Text] / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). – 2015. – Mode of access: <https://scispace.com/pdf/u-net-convolutional-networks-for-biomedical-image-2xoyjzggxv.pdf>.

60. What Is TensorFlow? [Electronic resource] // NVIDIA Glossary. – Mode of access: <https://www.nvidia.com/en-us/glossary/tensorflow/>.

61. Matplotlib: Visualization with Python [Electronic resource] // Zenodo. – Mode of access: <https://zenodo.org/records/15375714>.

62. A Workflow for Synthetic Data Generation and Predictive Maintenance for Vibration Data [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/354865626>. 66. SynDRA: Synthetic Dataset for Railway Applications [Text] / D'Amico [et al.] // WACV 2025. – Mode of access: https://openaccess.thecvf.com/content/WACV2025/papers/DAmico_SynDRA_Synthetic_Dataset_for_Railway_Applications_WACV_2025_paper.pdf.

63. Zhang, X. Fluctuation response patterns of network dynamics – An introduction [Text] / X. Zhang, M. Timme // European Journal of Applied Mathematics. – Mode of access: <https://www.cambridge.org/core/journals/european-journal-of-applied-mathematics/article/fluctuation-response-patterns-of-network-dynamics-an-introduction/355FFACE1EEEA448D19DFE56B5FBC192>.

64. Y25 Bogie Laden Wagon Specifications [Electronic resource] // Scribd. – Mode of access: <https://www.scribd.com/document/36078958/Y25wagon>.

65. TGV Duplex [Electronic resource] // Wikipedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/TGV_Duplex.

66. ICE 4, the high-speed train for Deutsche Bahn [Electronic resource] // Siemens Mobility. – Mode of access: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/high-speed-and-intercity-trains/ice-4.html>.

67. Shinkansen series N700 [Electronic resource] // Loco-Info. – Mode of access: <https://www.loco-info.com/view.aspx?id=14785>.

68. Machine learning aided identification of train weights from railway sleeper vibration [Electronic resource] // University of Birmingham. – Mode of access: https://pure-oai.bham.ac.uk/ws/portalfiles/portal/118148131/Insight_2021a.pdf.

69. Use of Ricker wavelet ground motions as an alternative to push-over testing [Electronic resource] // ResearchGate. – Mode of access: <https://www.researchgate.net/publication/334797172>.

70. Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects [Electronic resource] // University of Birmingham. – Mode of access: https://www.pure.ed.ac.uk/ws/files/56997567/Benchmarking_Railway_Vibrations_Track_Vehicle_Ground.pdf.

71. Prediction of ground vibrations induced by rail traffic in Lisbon urban area [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9340514/>.

72. Quantifying the Surface Strain Field Induced by Active Sources with Distributed Acoustic Sensing: Theory and Practice [Electronic resource] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9229652/>.

73. What does a Distributed Acoustic Sensing (DAS) Interrogator Measure? [Electronic resource] // Terra15. – Mode of access: <https://terra15.com.au/what-does-a-distributed-acoustic-sensing-interrogator-measure/>.

74. Distributed acoustic sensing, transfer functions, and moment magnitude determination [Electronic resource] // TNO Publications. – Mode of access: <https://publications.tno.nl/publication/34644026/UN25k11z/boullenger-2025-distributed.pdf>.

75. Steinfath, E. Fast and accurate annotation of acoustic signals with deep neural networks [Electronic resource] / E. Steinfath [et al.] // PubMed Central. – Mode of access: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8560090/>.

76. What are the metrics to compare Synthetic Data with Original Data? [Electronic resource] // AITUDE. – Mode of access: <https://www.aitude.com/what-are-the-metrics-to-compare-synthetic-data-with-original-data/>.

77. Synthetic Data vs Real Data: How to measure the column's similarity? [Electronic resource] // YData. – Mode of access: <https://ydata.ai/resources/how-to-validate-if-synthetic-data-is-statistically-similar-to-real-data.html>.

78. Comparing Tests: Industry Standards vs Real-world Data [Electronic resource] // Vibration Research. – Mode of access: <https://vibrationresearch.com/resources/comparing-tests-industry-standards-vs-real-world-data/>.

79. Continuous and discrete Mexican hat wavelet transforms on manifolds [Electronic resource] // Stony Brook Computer Science. – Mode of access: <https://www3.cs.stonybrook.edu/~qin/research/2012-gmp-mexican-hat-wavelet.pdf>.

80. Overview of distributed acoustic sensing: Theory and ocean applications [Text] // Journal of the Acoustical Society of America. – Vol. 158, iss. 1. – 801. – Mode of access: <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article/158/1/801/3356371/Overview-of-distributed-acoustic-sensing-Theory>.

81. Synthetic Data - what, why and how? [Electronic resource] // Royal Society. – Mode of access: https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/privacy-enhancing-technologies/Synthetic_Data_Survey-24.pdf.

82. Survey on Synthetic Data Generation, Evaluation Methods and GANs [Text] // Mathematics. – 2022. – Vol. 10, iss. 15. – 2733. – Mode of access: <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/15/2733>.

83. Fuchs, F. Equidistant Spectral Lines in Train Vibrations [Electronic resource] / F. Fuchs, G. Bokelmann. – Mode of access: https://img.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/i_img/Geophyik/Publikationen_bis_2018/Fuchs_2017_Equidistant_spectral.pdf.