

ABSTRACT AND REFERENCES

APPLIED MECHANICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341427

ESTABLISHING PATTERNS IN THE STRESSED-STRAINED STATE OF CONCRETE SLEEPERS WITH PRESTRESSED COMPOSITE REINFORCEMENT AND THEIR MODELS (p. 6–16)**Andrii Plugin**Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6941-2076>**Maxim Murygin**Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0532-4765>**Dmytro Plugin**Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4359-4369>**Elshad Najafov**Azerbaijan University of Architecture and Construction,
Baku, Azerbaijan
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>**Serhii Musiienko**LLC Consulting Agency Galileo, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5418-6886>**Oleksii Lobiak**Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9553-4245>

This study investigates the finite-element and physical models of railroad sleepers made of concrete with steel and composite prestressed reinforcement.

Reinforced concrete sleepers withstand mechanical loads well but have low electrical resistance, which contributes to traction current losses, leakage currents and electrocorrosion of linear structures on electrified railroads, as well as disruption of auto-lock. Since low electrical resistance is due to the electrical conductivity of steel reinforcement, its replacement with composite makes it possible to solve a number of problems in railroad operation. However, its use for sleepers is complicated by the difference from steel reinforcement in elasticity and remains insufficiently studied.

Sleeper models and a scheme for their testing have been devised, which corresponds to the standard sleeper test. Calculation and full-scale experiments with loading the models have been performed. It has been established that as the models are loaded and the deformation moment increases, it evolves in three stages: crack formation; their development to the formation of a plastic hinge; failure with reinforcement slipping. In the model with composite reinforcement, compared to steel reinforcement, the moments corresponding to these stages are smaller by values that correlate with lower tension forces and the modulus of elasticity of the reinforcement. The type of reinforcement affects all moments characterizing the strength and crack resistance of the models less than the pre-tensioning forces.

The results from the calculated and full-scale experiments have been compared. Correction factors were proposed for calculating the moments of crack formation in sleepers. The results make it possible to design sleepers with composite reinforcement of the required crack resistance. Such sleepers could be implemented provided that a positive result is obtained from their experimental operation on an electrified section of the railroad.

Keywords: railroad sleeper, concrete, steel reinforcement, composite reinforcement, pre-stress, crack.

References

1. Yee, J. J., Khong, S. C., Che, J., Tee, K. F., Chin, S. C. (2024). Sustainable Materials in Concrete Railway Sleepers: A Review of Current Developments and Future Prospects. *Journal of Chemical Engineering and Industrial Biotechnology*, 10 (1), 1–16. <https://doi.org/10.15282/jceib.v10i1.10292>
2. Mbatha, A. J., Alugongo, A. A., Nkomo, N. Z. (2024). A Review of Composites Sleepers Used in the Railway Structure. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72 (12), 360–366. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v72i12p130>
3. Mirza, O., Camille, C., Clarke, T. (2025). Optimisation of Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete (MSFRC) as Alternative Railway Sleepers. *Engineering Materials, Structures, Systems and Methods for a More Sustainable Future*. Taylor & Francis, 29–34. <https://doi.org/10.1201/9781003677895-5>
4. Lau, D., Pam, H. J. (2010). Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 32 (12), 3857–3865. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.08.028>
5. Alsayed, S. H. (1998). Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Cement and Concrete Composites*, 20 (1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0958-9465\(97\)00061-9](https://doi.org/10.1016/s0958-9465(97)00061-9)
6. Chitsazan, I., Kobraei, M., Jumaat, M. Z., Shafigh, P. (2010). An experimental study on the flexural behavior of FRPRC beams and a comparison of the ultimate moment capacity with ACI. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 1 (2), 27–42. Available at: https://eprints.um.edu.my/6018/1/An_experimental_study_on_the_flexural_behaviour_of_FRP_RC_bemas_and_comparison_of_the_ultimate_moment_capacity_with_A.pdf
7. Schmidt, J. W., Täljsten, B., Bennitz, A., Pedersen, H. (2008). FRP tendon anchorage in posttensioned concrete structures. *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II*. CRC Press, 419–420. Available at: <https://doi.org/10.1201/9781439828403.ch166>
8. Chang, X., Wang, X., Liu, C., Wu, Z., Noori, M. (2024). Anchoring and stressing methods for prestressed FRP plates: State-of-the-art review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. <https://doi.org/10.1177/07316844241258864>
9. Plugin, A., Kaliuzhna, O., Lobiak, O., Plugin, D., Nadzhafov, E. F. O., Lagler, M. (2024). Regarding the replacement of steel reinforcement in pre-stressed concrete sleepers with composite rebars. *14TH International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive, and Railway Engineering and Technologies*, 3064, 060003. <https://doi.org/10.1063/5.0199575>
10. Lobiak, A., Plugin, A., Kravtsiv, L., Kovalova, O. (2018). Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. *MATEC Web of Conferences*, 234, 04004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823404004>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338430

IDENTIFICATION OF FLEXURAL PERFORMANCE OF FINGER-JOINTED LAMINATED TIMBER BEAMS REINFORCED WITH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (p. 17–27)**Lilis Nurhayati**Universitas Brawijaya, Malang East Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2108-2693>**Sri Murni Dewi**Universitas Brawijaya, Malang East Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7624-6283>

Wisnu Murti

Universitas Brawijaya, Malang East Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2939-2170>

Devi Nuralinah

Universitas Brawijaya, Malang East Java, Indonesia
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4236-2492>

This paper presents the study of the mechanical performance of finger jointed laminated timber beams, unreinforced and reinforced with Carbon Fiber Reinforced Polymer, made from waste Merbau wood as an alternative to conventional structural materials. The present study focuses on the ultimate load capacity, modulus of elasticity, modulus of rupture, and load-deflection behavior of laminated beams with face butt and face finger joint orientations against solid beams. Tests were conducted by the four-point bending method according to ASTM D198-02. The results indicated that solid beams had the highest load bearing capacity compared to finger-jointed laminated beams. CFRP reinforcement increased the load capacity by 7.15% for face butt orientation and 38.58% for face finger orientation. CFRP reinforced face finger joints showed a significant increase in modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) compared to face butt joints, indicating the effectiveness of CFRP reinforcement in certain orientations. Load-deflection analysis shows that CFRP-reinforced beams exhibit better ductility than unreinforced beams, with peak deflection increasing by 27.2% for face-butt and 26.0% for face-finger. Results confirm that CFRP reinforcement can enhance finger-jointed laminated beams; however, despite these improvements, the reinforced laminated beams still do not reach the strength level of solid beams, with the maximum load capacity and bending moment being approximately 31% of the solid beam values. This study offers insights into the development of robust, efficient, and sustainable wood-based building materials. Furthermore, the findings indicate that finger-jointed laminated wood, produced from waste cuttings from the wood processing industry, possesses the potential to be developed into structural building materials, thereby enhancing the value of wood waste.

Keywords: laminated timber, finger joint, carbon fiber reinforced polymer (CFRP), modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR).

References

- Fossetti, M., Minafò, G., Papia, M. (2015). Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. *Construction and Building Materials*, 95, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.116>
- Suleimana, A., Peixoto, B. C., Branco, J. M., Camões, A. (2023). Experimental Evaluation of Glulam Made from Portuguese Eucalyptus. *Applied Sciences*, 13 (12), 6866. <https://doi.org/10.3390/app13126866>
- Sotayo, A., Bradley, D. F., Bather, M., Oudjene, M., El-Houjeiri, I., Guan, Z. (2020). Development and structural behaviour of adhesive free laminated timber beams and cross laminated panels. *Construction and Building Materials*, 259, 119821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119821>
- Jelušič, P., Kravanja, S. (2018). Flexural analysis of laminated solid wood beams with different shear connections. *Construction and Building Materials*, 174, 456–465. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.102>
- Donadon, B. F., Mascia, N. T., Vilela, R., Trautwein, L. M. (2020). Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement. *Engineering Structures*, 202, 109818. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109818>
- Maier, D. (2022). The use of wood waste from construction and demolition to produce sustainable bioenergy – a bibliometric review of the literature. *International Journal of Energy Research*, 46 (9), 11640–11658. <https://doi.org/10.1002/er.8021>
- Risse, M., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2019). Eco-efficiency analysis of recycling recovered solid wood from construction into laminated timber products. *Science of The Total Environment*, 661, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.117>
- Tamanna, K., Raman, S. N., Jamil, M., Hamid, R. (2020). Utilization of wood waste ash in construction technology: A review. *Construction and Building Materials*, 237, 117654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117654>
- Yang, H., Ju, D., Liu, W., Lu, W. (2016). Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. *Construction and Building Materials*, 109, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.008>
- Auriga, R., Gumowska, A., Szymanowski, K., Wronka, A., Robles, E., Ocipka, P., Kowaluk, G. (2020). Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. *Composite Structures*, 248, 112533. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>
- Núñez-Decap, M., Barra-Rodríguez, Y., Opazo-Carlsson, C., Moya-Rojas, B., Vidal-Vega, M., Opazo-Vega, A. (2022). Use of Carbon and Basalt Fibers with Adhesives to Improve Physical and Mechanical Properties of Plywood. *Applied Sciences*, 12 (10), 5114. <https://doi.org/10.3390/app12105114>
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Devarajan, P., Stefańska, A., Wodzyński, Ł., Koda, E. (2023). Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) Composites in Civil Engineering Application – A Comprehensive Review. *Buildings*, 13 (6), 1509. <https://doi.org/10.3390/buildings13061509>
- Dong, X., Gan, W., Shang, Y., Tang, J., Wang, Y., Cao, Z. et al. (2022). Low-value wood for sustainable high-performance structural materials. *Nature Sustainability*, 5 (7), 628–635. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00887-8>
- Le, S. T., Nguyen, T. N., Bui, D.-K., Ha, Q. P., Ngo, T. D. (2023). Modeling and Multi-Objective Optimisation of Finger Joints: Improving Flexural Performance and Minimising Wood Waste. *Buildings*, 13 (5), 1186. <https://doi.org/10.3390/buildings13051186>
- Rodríguez-Grau, G., Cordonnier, P.-L., Navarrete, B., Montero, C., Alvarado, C., Pommier, R. et al. (2024). The Adhesion Performance in Green-Glued Finger Joints Using Different Wood Ring Orientations. *Sustainability*, 16 (16), 7158. <https://doi.org/10.3390/su16167158>
- Morin-Bernard, A., Blanchet, P., Dagenais, C., Achim, A. (2021). Glued-laminated timber from northern hardwoods: Effect of finger-joint profile on lamellae tensile strength. *Construction and Building Materials*, 271, 121591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121591>
- Karagöz İşleyen, Ü., Peker, İ. (2020). Effects of layer number and finger direction on bending behavior of glulam beams. *BioResources*, 15 (2), 4217–4233. <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4217-4233>
- Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., Arif M, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>
- Novosel, A., Sedlar, T., Čizmar, D., Turkulin, H., Živković, V. (2021). Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants. *Construction and Building Materials*, 287, 123073. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123073>
- Bakalarz, M. M., Kossakowski, P. G. (2022). Ductility and Stiffness of Laminated Veneer Lumber Beams Strengthened with Fibrous Composites. *Fibers*, 10 (2), 21. <https://doi.org/10.3390/fib10020021>
- Karagöz İşleyen, Ü., Kesik, H. İ. (2021). Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips. *Structures*, 33, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.04.070>
- Percin, O., Uzun, O. (2023). Physical and mechanical properties of laminated wood made from heat-treated Scotch pine reinforced with carbon fiber. *BioResources*, 18 (3), 5146–5164. <https://doi.org/10.15376/biores.18.3.5146-5164>

23. Kawecki, B., Podgórski, J. (2020). The Effect of Glue Cohesive Stiffness on the Elastic Performance of Bent Wood–CFRP Beams. *Materials*, 13 (22), 5075. <https://doi.org/10.3390/ma13225075>
24. İşleyen, Ü. K., Ghoroubi, R., Mercimek, Ö., Anil, Ö., Erdem, R. T. (2021). Behavior of glulam timber beam strengthened with carbon fiber reinforced polymer strip for flexural loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 40 (17-18), 665–685. <https://doi.org/10.1177/0731684421997924>
25. Khelifa, M., Celzard, A., Oudjene, M., Ruelle, J. (2016). Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 68, 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007>
26. Mansour, W., Li, W., Wang, P., Fame, C. M., Tam, L., Lu, Y. et al. (2024). Improving the Flexural Response of Timber Beams Using Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets. *Materials*, 17 (2), 321. <https://doi.org/10.3390/ma17020321>
27. Khelifa, M., Lahouar, M. A., Celzard, A. (2015). Flexural strengthening of finger-jointed Spruce timber beams with CFRP. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29 (19), 2104–2116. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1057395>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342108

IDENTIFYING MECHANISMS BEHIND CRACK FORMATION AND DESTRUCTION OF THE DAMPER WINDING OF A CAPSULE-TYPE HYDROGENERATOR IN THE PRESENCE OF STATIC ROTOR ECCENTRICITY (p. 28–39)

Olexandr Geraskin

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4651-4579>

Yurii Haidenko

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5862-2812>

Vadim Chumack

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8401-7931>

Vladislav Mihaylenko

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0973-4612>

Yevhenii Trotsenko

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

This study investigates a capsule-type SGK 538/160–70M hydrogenerator with a rated power of 23 MVA. The task addressed relates to crack initiation and failure of the damper winding in the hydrogenerator in the presence of rotor static eccentricity.

A three-dimensional field-based mathematical model of the electromagnetic-thermal-mechanical interaction has been constructed to evaluate the distributions of currents, temperatures, and thermomechanical stresses in the damper winding segment and in the brazed joints of rods.

It is shown that the occurrence and evolution of rotor static eccentricity constitute one of the essential causes of catastrophic damages and failures in hydrogenerators of this type. It has been determined that, under rotor static eccentricity of $\varepsilon = 0.83$, the local stresses in the joint of the central rod increase by a factor of ~ 3.2 (up to ≈ 540 MPa). This value exceeds the tensile strength

of copper and explains rod ruptures and avalanche-type failure of the segment. In addition, it was established that the existence and localization of cracks in brazed joints significantly affect the bending (deformation) behavior of the pole damper winding segment.

The results could be applied to estimate the service life and to upgrade large slow-speed synchronous hydrogenerators (including capsule types). Specifically, under the following conditions:

- a) existing or expected eccentricities;
- b) high thermal gradients in the end/short-circuiting parts of the damper winding;
- c) operation with frequent starts/stops or cooling modes close to limiting values.

The effective engineering measures that have been proposed, such as improving the mobility of rods in slots; revising the number and diameters of rods; applying high-strength materials, could be implemented in retrofitting projects and when repairing the rotor.

Keywords: capsule hydrogenerator, rotor eccentricity, rods damage, damper winding, thermomechanical stresses.

References

1. Mostafaei, M., Faiz, J. (2021). An overview of various faults detection methods in synchronous generators. *IET Electric Power Applications*, 15 (4), 391–404. <https://doi.org/10.1049/elp2.12031>
2. Ehya, H., Nysveen, A., Nilssen, R., Liu, Y. (2021). Static and dynamic eccentricity fault diagnosis of large salient pole synchronous generators by means of external magnetic field. *IET Electric Power Applications*, 15 (7), 890–902. <https://doi.org/10.1049/elp2.12068>
3. Vaskovsky, Yu. M., Geraskin, O. A. (2021). Influence of regime and operational factors on the damper system of the sali-ent-pole synchronous machine rotor. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 2021 (2), 47–57. <https://doi.org/10.15407/tehn2021.02.047>
4. Vaskovskii, Yu. M., Geraskin, O. A. (2020). The effect of rotor eccentricity on damper winding of 23 MVA capsular hydraulic-turbine generator. *Hydroenerhetyka Ukrainy*, 1-2, 59–64. Available at: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2020-07/15.pdf>
5. Vaskovskii, Yu. M., Geraskin, O. A., Tatarinov, K. M. (2020). Simulation of thermomechanical stresses of the damper winding of capsular hydrogenerator when the rotor eccentricity appears. *Hydroenerhetyka Ukrainy*, 3-4, 64–67. Available at: <https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2020-12/17.pdf>
6. Zhou, Z.-T., Yang, Y., Xiao, K., Fan, Z.-N., Bian, Z.-Y., Wen, K. et al. (2020). Analysis and Treatment of an Overheated Ablated Fault on the Pole Shoe Surface of a Large Tubular Hydro-Generator. *IEEE Access*, 8, 127929–127938. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3008253>
7. Zhang, S., Li, W., Li, J., Wang, L., Zhang, X. (2014). Research on Flow Rule and Thermal Dissipation Between the Rotor Poles of a Fully Air-cooled Hydro-generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (6), 3430–3437. <https://doi.org/10.1109/tie.2014.2366723>
8. Jichao, H., Yufei, L., Jiechen, D., Yutian, S., Baojun, G., Weili, L. (2021). Thermal Modeling and Experimental Validation in the Rotor Region of Hydrogenerator With Different Rotor Structures. *IEEE Access*, 9, 120001–120009. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3098319>
9. Fan, Z., Liao, Y., Han, L., Xie, L. (2013). No-Load Voltage Waveform Optimization and Damper Bars Heat Reduction of Tubular Hydro-generator by Different Degree of Adjusting Damper Bar Pitch and Skewing Stator Slot. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28 (3), 461–469. <https://doi.org/10.1109/tec.2013.2259628>
10. Xu, M., Hu, W., Zhou, Z., Fan, Z. (2024). The influence of electromagnetic field models on the damper winding loss and heat calculation results of tubular hydro-generator. *Electronics Letters*, 60 (5). <https://doi.org/10.1049/ell2.13144>
11. Bian, Z., Zhou, Z., Fan, Z. (2021). No-load voltage and damper winding loss and heat analysis of the pole shoe and damper winding centre

line shifted structure of tubular hydro-generators. *Electronics Letters*, 57 (18), 691–693. <https://doi.org/10.1049/ell2.12227>

12. Qiu, H., Fan, X., Yi, R., Feng, J., Wu, J., Yang, C., Zhao, H. (2017). Eddy current density asymmetric distribution of damper bars in bulb tubular turbine generator. *Archives of Electrical Engineering*, 66 (3), 571–581. <https://doi.org/10.1515/aee-2017-0043>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340014

DETERMINING THE STRENGTH OF A FRAME IN A RAILROAD OPEN WAGON WITH SLINGS IN ITS STRUCTURE TO IMPROVE ITS OPERATIONAL ENERGY EFFICIENCY (p. 40–47)

Alyona Lovska

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

Iraida Stanovska

Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5884-4228>

Yevhen Pelypenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kharkiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8988-791X>

Hanna Barsukova

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4261-2182>

Oleksandr Yurchenko

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3047-6654>

This study's object is the processes related to load acceptance and redistribution within the frame of a railroad open wagon with slings in the structure under operational loads. The task addressed in the study is to reduce the loading on the open wagon frame during operation by installing slings in its cantilever parts.

To substantiate this technological advancement, the strength of an open wagon frame was calculated under the basic load schemes in operation. The dynamic loads acting on the open wagon frame were determined by mathematical modeling. The strength calculations performed showed that the maximum stresses in the railroad open wagon frame occur under the first design mode. However, these stresses are 6% lower than those that occur in a typical frame structure.

In addition, within the framework of the study, the strength of a railroad open wagon frame was calculated while transported by railroad ferry. The calculation results showed that the strength of the open wagon frame is ensured. The estimated stresses are 4% lower than those in the typical structure of an open wagon frame.

A feature of the proposed technological advancement is that its implementation is feasible at the stage of wagon modernization, rather than only during the manufacture of new structures.

The area of practical use of the results is railroad transport.

A condition for the practical implementation of this study's results is to link the sling to the areas of arranging the front and rear stops of auto couplers.

The results of the research will contribute to improving the strength of the supporting structures in open wagons during operation and reducing the costs of their maintenance. The findings could also contribute to the design of freight wagons with improved technical and economic indicators.

Keywords: railroad transport, railroad open wagon, open wagon frame, frame improvement, frame strength, structural energy efficiency.

References

1. Bulakh, M. (2025). Freight wagon body design with increased load capacity. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97152-7>
2. Šťastniak, P., Smetanka, L., Moravčík, M. (2018). Structural Analysis of a Main Construction Assemblies of the New Wagon Prototype Type Zans. *Manufacturing Technology*, 18 (3), 510–517. <https://doi.org/10.21062/ujep/130.2018/a/1213-2489/mt/18/3/510>
3. Caban, J., Vrabel, J., Górnicka, D., Nowak, R., Jankiewicz, M., Matijošius, J., Palka, M. (2023). Overview of Energy Harvesting Technologies Used in Road Vehicles. *Energies*, 16 (9), 3787. <https://doi.org/10.3390/en16093787>
4. Lovska, A., Gerlici, J., Dižo, J., Pavliuchenkov, M. (2024). A Feasibility Study into the Use of Corrugated Beams in the Passenger Car Frame. *Transport Means 2024. Proceedings of the 28th International Scientific Conference*. <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.p186-191>
5. Lovska, A., Gerlici, J., Dižo, J. (2025). Research of the possibility of using beams with corrugated walls in a passenger rail car frame. *Scientific Reports*, 15 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12783-0>
6. Kuczek, T. (2015). Application of manufacturing constraints to structural optimization of thin-walled structures. *Engineering Optimization*, 48 (2), 351–360. <https://doi.org/10.1080/0305215x.2015.1017350>
7. Al-Sukhon, A., ElSayed, M. S. (2021). Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 236 (8), 920–935. <https://doi.org/10.1177/09544097211049640>
8. Jeong, D. Y., Tyrell, D. C., Carolan, M. E., Perlman, A. B. (2009). Improved Tank Car Design Development: Ongoing Studies on Sandwich Structures. *2009 Joint Rail Conference*, 89–98. <https://doi.org/10.1115/jrc2009-63025>
9. Lee, W. G., Kim, J.-S., Sun, S.-J., Lim, J.-Y. (2016). The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232 (1), 25–42. <https://doi.org/10.1177/0954409716646140>
10. Lee, H.-A., Jung, S.-B., Jang, H.-H., Shin, D.-H., Lee, J. U., Kim, K. W., Park, G.-J. (2015). Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230 (4), 1283–1296. <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>
11. Gerlici, J., Lovska, A., Vatulia, G., Pavliuchenkov, M., Kravchenko, O., Solčanský, S. (2023). Situational Adaptation of the Open Wagon Body to Container Transportation. *Applied Sciences*, 13 (15), 8605. <https://doi.org/10.3390/app13158605>
12. Koziar, M. M., Feshchuk, Yu. V., Parfeniuk, O. V. (2018). *Kompiuterna hrafika: SolidWorks*. Kherson: Oldi-plius, 252. Available at: <https://ep3.nuwm.edu.ua/22175/1/Комп%27ютерна%20графіка.pdf>
13. Pustulha, S. I., Samostian, V. R., Klak, Yu. V. (2018). *Inzhenerna hrafika v SolidWorks*. Lutsk: Vezha, 172. Available at: <https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-02/Інженерна%20графіка%20в%20SolidWorks.pdf>
14. Gerlici, J., Lovska, A., Kozáková, K. (2025). Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. *Designs*, 9 (1), 12. <https://doi.org/10.3390/designs9010012>
15. Gerlici, J., Lovska, A., Pavliuchenkov, M. (2024). Study of the Dynamics and Strength of the Detachable Module for Long Cargoes under Asymmetric Loading Diagrams. *Applied Sciences*, 14 (8), 3211. <https://doi.org/10.3390/app14083211>

16. Stoilov, V., Simić, G., Purgić, S., Milković, D., Slavchev, S., Radulović, S., Maznicki, V. (2019). Comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies of freight wagon Sdgmrs-twin. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 664 (1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/664/1/012026>
17. Lakshmikanth, P., D V, R., Guha, S. (2025). Numerical investigation of the fatigue life of center sill of a BFNSM wagon. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. <https://doi.org/10.1177/14644207251345076>
18. Dižo, J., Blatnický, M., Sága, M., Harušinec, J., Gerlici, J., Legutko, S. (2020). Development of a New System for Attaching the Wheels of the Front Axle in the Cross-Country Vehicle. Symmetry, 12 (7), 1156. <https://doi.org/10.3390/sym12071156>
19. Caban, J., Marczyk, A., Šarkan, B., Vrábel, J. (2015). Studies on operational wear of glycol-based brake fluid. Badania eksploatacyjnego zużycia płynu hamulcowego wytworzonego na bazie glikolu. PRZEMYSŁ CHEMICZNY, 94 (10), 1802–1806. <https://doi.org/10.15199/62.2015.10.30>
20. Dizo, J., Blatnický, M. (2019). Evaluation of Vibrational Properties of a Three-wheeled Vehicle in Terms of Comfort. Manufacturing Technology, 19 (2), 197–203. <https://doi.org/10.21062/ujep/269.2019/a/1213-2489/mt/19/2/197>
21. Kowalski, S., Cieślowski, B., Barta, D., Dižo, J., Dittrich, A. (2023). Analysis of the Operational Wear of the Combustion Engine Piston Pin. Lubricants, 11 (3), 100. <https://doi.org/10.3390/lubricants11030100>
22. Lovska, A., Gerlici, J., Dižo, J., Ishchuk, V. (2023). The Strength of Rail Vehicles Transported by a Ferry Considering the Influence of Sea Waves on Its Hull. Sensors, 24 (1), 183. <https://doi.org/10.3390/s24010183>
23. Domin, Yu. V., Cherniak, H. Yu. (2003). Osnovy dynamiki vagoniv. Kyiv: KUETT, 269.
24. Panchenko, S., Gerlici, J., Vatulia, G., Lovska, A., Ravlyuk, V., Harušinec, J. (2023). Studying the load of composite brake pads under high-temperature impact from the rolling surface of wheels. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 155–167. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002994>
25. Kondratiev, A. V., Kovalenko, V. O. (2019). Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. Space Science and Technology, 25 (4), 3–21. <https://doi.org/10.15407/knit2019.04.003>
26. Blatnický, M., Dižo, J., Gerlici, J., Sága, M., Lack, T., Kuba, E. (2020). Design of a robotic manipulator for handling products of automotive industry. International Journal of Advanced Robotic Systems, 17 (1). <https://doi.org/10.1177/1729881420906290>
27. Vatulia, G. L., Lovska, A. O., Krasnokutskyi, Y. S. (2023). Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1254 (1), 012140. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012140>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340389

DESIGNING A GRAVITY CHUTE BASED ON THE GIVEN TRAJECTORY OF CARGO MOVEMENT (p. 48–55)

Tetiana Volina

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-2208>

Victor Nesvidomin

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1495-1718>

Serhii Pylypaka

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1496-4615>

Mykhailo Kalenyk

Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko,
Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7416-4233>

Vitalii Ploskyi

Kyiv National University of Construction and Architecture,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2632-8085>

Natalia Ausheva

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0816-2971>

Vitaliy Babka

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4971-4285>

Olena Nalobina

National University of Water and Environmental Engineering,
Rivne, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1661-7331>

Serhii Andrukh

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5041-885X>

Oleksandr Pavlenko

Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University,
Zaporizhzhia, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8646-2622>

This study's object is the process of cargo movement along the helical surface of an oblique open helicoid under the action of its natural weight. Such movement takes place in gravity chutes where the cargo descends under the action of its natural weight. Gravity (screw) chutes are used for transportation, separation, and enrichment of material.

For a given surface, the problem is solved by composing differential equations of motion of a mathematical point, which is conditionally replaced by cargo, in projections onto the axis of the spatial coordinate system. If the surface is helical, then after stabilization of the motion, it is possible to find the parameters of the helical line – the trajectory of cargo movement. The task implies solving the inverse problem – constructing a helical surface along a given trajectory of cargo descent, which is a helical line.

The results are attributed to the use of two accompanying trihedra of the trajectory with a common vertex and tangent orts to the trajectory, which coincide. One of them is a Frenet trihedron whose position is determined by the differential characteristics of the curve, and the second is a Darboux trihedron, the position of which depends on the point of the trajectory on the surface. In addition to the two coincident orts, the remaining four orts are located in the plane normal to the trajectory. The use of these two orts makes it possible to compose differential equations of motion of the load in projections onto a moving Darboux trihedron, one of the planes of which is tangent to the surface.

A feature of the solution to the problem is that the trajectory of the load, i.e., the helix, is given by radius r of the cylinder on which it is located and velocity V of the load. Using these data, angle β of its ascent is determined. For example, at $r = 0.5$ m, $V = 2.5$ m/s, the angle of elevation is $\beta = 20.7^\circ$. Then, a helical linear surface is constructed that passes through the given trajectory.

Keywords: Frenet and Darboux trihedra, arc length, applied forces, differential equations, helix.

References

1. Trokhaniak, O. (2023). Determination of optimal parameters of hinged operating elements of screw conveyers. *Machinery & Energetics*, 14 (1). <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.79>
2. Trokhaniak, O. (2022). Estimation of eddy currents and power losses in the rotor of a screw electrothermomechanical converter for additive manufacturing. *Machinery & Energetics*, 13 (3). [https://doi.org/10.31548/machinery.13\(3\).2022.92-98](https://doi.org/10.31548/machinery.13(3).2022.92-98)
3. Klendii, M., Logusch, I., Dragan, A., Tsvartazkii, I., Grabar, A. (2022). Justification and calculation of design and strength parameters of screw loaders. *Machinery & Energetics*, 13 (4). [https://doi.org/10.31548/machinery.13\(4\).2022.48-59](https://doi.org/10.31548/machinery.13(4).2022.48-59)
4. Chvartatskiy, I., Flonts, I., Grabar, A., Shatrov, R. (2021). Synthesis of energy-saving transport-technological systems with screw working bodies. *Machinery & Energetics*, 12 (4). <https://doi.org/10.31548/machinery.2021.04.077>
5. Bogomolov, O. V., Braginets, M. V., Khmelovskiy, V. S., Bogomolov, O. O. (2021). Research of gravity separator of rapesee. *Machinery & Energetics*, 12 (2), 77–82. <https://doi.org/10.31548/machinery.2021.02.077>
6. Aliiev, E., Vedmedeva, K. (2025). Automated devices for quantitative phenotyping of sunflower seeds. *Machinery & Energetics*, 16 (1), 54–64. <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.54>
7. Novitskiy, A., Banniy, O., Novitskiy, Y., Antal, M. (2023). A study of mixer-feeder equipment operational reliability. *Machinery & Energetics*, 14 (4), 101–110. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2023.101>
8. Zablodskiy, M., Kovalchuk, S., Gritsyuk, V., Subramanian, P. (2023). Screw electromechanical hydrolyzer for processing poultry by-products. *Machinery & Energetics*, 14 (1). <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2023.36>
9. Bidas, M., Galecki, G. (2021). The concept of a screw conveyor for the vertical transport of bulk materials. *Mining Machines*, 39, 28–33. <https://doi.org/10.32056/KOMAG2021.3.3>
10. Moelder, K., Lillerand, T. (2025). Design and feasibility analysis of vertical static flight screw conveyor usage in granulated fertilizer transportation. 24th International Scientific Conference Engineering for Rural Development Proceedings, 24. <https://doi.org/10.22616/erdev.2025.24.tf090>
11. Minglani, D., Sharma, A., Pandey, H., Dayal, R., Joshi, J. B., Subramaniam, S. (2020). A review of granular flow in screw feeders and conveyors. *Powder Technology*, 366, 369–381. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.066>
12. Karwat, B., Rubacha, P., Stańczyk, E. (2020). Simulational and experimental determination of the exploitation parameters of a screw conveyor. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 22 (4), 741–747. <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.18>
13. Lian, G., Zhong, W., Liu, X. (2021). DEM study on the mixed feeding process of coal and cylindroid biomass particles in a screw feeder. *Advanced Powder Technology*, 32 (7), 2543–2554. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.05.031>
14. Wenwu, Y., Longyu, F., Xiwen, L., Hui, L., Yangqing, Y., Zhanhao, L. (2020). Experimental study of the effects of discharge port parameters on the fertilizing performance for fertilizer distribution apparatus with screw. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36 (17), 1–8. <https://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.001>
15. Kresan, T. (2020). Calculation of gravitation descent formed by surface of skew closed helicoid. *Machinery & Energetics*, 11 (2), 49–57. Available at: <https://technicalscience.com.ua/en/journals/t-11-2-2020/rozrakhunok-gravitatsiyonogo-spusku-utvoryenogo-povyerkhnyeyu-kosogo-zakritogo-gyelikoyida>
16. Xin, M., Jiang, Z., Song, Y., Cui, H., Kong, A., Chi, B., Shan, R. (2023). Compression Strength and Critical Impact Speed of Typical Fertilizer Grains. *Agriculture*, 13 (12), 2285. <https://doi.org/10.3390/agriculture13122285>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341450

CONSTRUCTION OF A SIMULATION MODEL OF THE SYSTEM “STRIKER-TOOL-PROCESSED MEDIUM”(p. 56–64)

Viktor Slidenko

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9313-331X>

Oleksandr Slidenko

“Kyiv Consulting Group” Limited Liability Company, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7000-9286>

Oksana Zamaraeva

“Kyiv Consulting Group” Limited Liability Company, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2961-7730>

Anton Novykov

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7597-3013>

Vladyslav Tkachenko

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8123-0638>

This study investigates the process of impulse interaction between the elements of an impact device and the processed medium (PM). The task addressed is to combine simulation and mathematical modeling of the process.

A simulation model of the striker has been constructed using the Ansys programming system. The basic elements of the striker were built in a geometric shape close to cylindrical; a PM simulator was developed in the Design Modeler module. The degrees of freedom of the elements, their physical properties and external factors were adopted in accordance with the structural scheme and operating modes of the striker.

Adequacy of the simulation model was assessed by comparison with discrete and discrete-continuous models. The finite difference method was used to solve the system of differential equations under given initial and boundary conditions. The comparison was carried out by the parameters of impact interaction: co-impact time, vibrations of the contact and impact ends of the tool. Strikers and tools of different sizes with flat contact ends were considered. The impact time was determined by the difference in speeds and displacements of the contact ends of the striker and the tool; it is 0.1–0.5 ms. In this case, the striker speed varied in the range of 3–20 m/s. High-frequency oscillations of the tool ends amounted to 3000–6000 Hz and were determined by the dimensions of the striker and the tool. The discrepancy of the parameters relative to the Ansys system did not exceed 10%.

The simulation model has made it possible to evaluate the energy transformation in the “striker-tool-processed medium” system. The coefficient of energy transfer to PM from the tool is 0.55–0.65; from the striker to the tool – 0.75–0.8.

The results lay the foundation for applying the simulation model to conduct numerical experiments involving elements of a striking device of complex geometric shape. The simulation model and discrete-continuous models could be used to select rational parameters when designing striking devices.

Keywords: Ansys Mechanical, impact device, co-impact time, model identification, energy characteristics.

References

1. Goldsmith W. (1960). Impact. The theory and physical behaviour of colliding solids. London: Edvard Arnold LTD, 393. Available at:

- <https://ia601507.us.archive.org/33/items/in.ernet.dli.2015.133946/2015.133946.Impact-The-Theory-And-Physical-Behaviour-Of-Colliding-Solids.pdf>
2. Batako, A. D., Babitsky, V. I., Halliwell, N. A. (2004). Modelling of vibro-impact penetration of self-exciting percussive-rotary drill bit. *Journal of Sound and Vibration*, 271 (1-2), 209–225. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(03\)00642-4](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(03)00642-4)
 3. Batako, A. D., Babitsky, V. I., Halliwell, N. A. (2003). A self-excited system for percussive-rotary drilling. *Journal of Sound and Vibration*, 259 (1), 97–118. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2002.5158>
 4. Yu Neyman, V., Markov, A. V. (2018). Linear electromagnetic drive of impact machines with retaining striker. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 194, 062023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/194/6/062023>
 5. Yang, G., Fang, J. (2012). Structure Parameters Optimization Analysis of Hydraulic Hammer System. *Modern Mechanical Engineering*, 2 (4), 137–142. <https://doi.org/10.4236/mme.2012.24018>
 6. Slidenko, V., Slidenko, O., Marchuk, L., But, V. (2023). Development of a discrete-continuous mathematical model of a percussion device with parameters of influence on the characteristics of an impact pulse. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (7 (125)), 70–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.290029>
 7. Slidenko, V., Slidenko, O., Listovschik, L., Novykov, A., But, V. (2025). Construction of a mathematical model of an impact device with a two-element striker. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (7 (133)), 38–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322728>
 8. Zhukov, I. A., Molchanov, V. V. (2014). Rational Designing Two-Stage Anvil Block of Impact Mechanisms. *Advanced Materials Research*, 1040, 699–702. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1040.699>
 9. Zhukov, I. A., Dvornikov, L. T., Nikitenko, S. M. (2016). About creation of machines for rock destruction with formation of apertures of various cross-sections. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 124, 012171. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/124/1/012171>
 10. Zhukov, I., Repin, A., Timofeev, E. (2018). Automated calculation and analysis of impacts generated in mining machine by anvil blocks of complex geometry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 134, 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/134/1/012071>
 11. Samarskii, A. (2001). *The Theory of Difference Schemes*. New York: CRC Press, 786. <https://doi.org/10.1201/9780203908518>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342109

SYNTHESIS OF A CONTROLLER FOR QUADROTORS WITH SUSPENDED PAYLOADS (p. 65–71)

Nguyen Thi Dieu Linh

Hanoi University of Industry, Hanoi, Vietnam

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8596-392X>

Nguyen Van Bang

Air Defence – Air Force Academy, Hanoi, Vietnam

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9354-9283>

The object of this study is the control of quadrotor. Unmanned aerial vehicles currently in use often encounter various challenges and limitations. When operating in environments affected by external disturbances-particularly, when carrying suspended loads via cables, the control problem becomes significantly more complex. As a result, the quadrotor is unable to accurately follow the predefined flight trajectory.

Problem that was solved is the synthesis of a new controller for the quadrotor with a cable-suspended load, ensuring that the quadrotor accurately follows the predefined flight trajectory. The

proposed algorithm demonstrates a significant improvement over existing methods by effectively suppressing the oscillation angle of the suspended payload, treating the payload's influence as an external disturbance. Furthermore, it constrains the swing angle within an acceptable range, thereby ensuring the stability and robustness of the overall system during operation.

This study presents a novel control algorithm capable of guiding the quadrotor precisely to the desired position, even under the condition of carrying a cable-suspended load in a varying environment. The algorithm demonstrates a significant advantage, enabling the quadrotor to reach the desired trajectory within 2.6 seconds. The suspended load exhibits only small oscillations, which gradually diminish as the quadrotor transitions to a stable state. With its simple structure, high stability, and fast convergence, this robust solution is essential for unmanned aerial vehicles, significantly enhancing their operational effectiveness under complex conditions.

A key strength of the proposed algorithm lies in its simple structure. Furthermore, it demonstrates high convergence rates and exceptional stability, crucial attributes for real-time applications. Its design also ensures ease of practical implementation, making it a viable solution for unmanned aerial vehicles.

The algorithm is developed based on modern control techniques, combining a sliding mode controller with an extended state observer. The SMC maintains system stability in the presence of disturbances and uncertainties, while the ESO estimates unmeasured states and aggregated disturbances affecting the system. This design ensures accurate positioning of the quadrotor with a suspended load at the desired location.

Keywords: sliding mode control, extended state observer, unmanned aerial vehicle, trajectory.

References

1. Lin, S., Liu, A., Wang, J., Kong, X. (2022). A Review of Path-Planning Approaches for Multiple Mobile Robots. *Machines*, 10 (9), 773. <https://doi.org/10.3390/machines10090773>
2. Loganathan, A., Ahmad, N. S. (2023). A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 40, 101343. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101343>
3. Liu, Y., Wang, S., Xie, Y., Xiong, T., Wu, M. (2024). A Review of Sensing Technologies for Indoor Autonomous Mobile Robots. *Sensors*, 24 (4), 1222. <https://doi.org/10.3390/s24041222>
4. Niloy, Md. A. K., Shama, A., Chakraborty, R. K., Ryan, M. J., Badal, F. R., Tasneem, Z. et al. (2021). Critical Design and Control Issues of Indoor Autonomous Mobile Robots: A Review. *IEEE Access*, 9, 35338–35370. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3062557>
5. Sousa, R. B., Sobreira, H. M., Moreira, A. P. (2023). A systematic literature review on long-term localization and mapping for mobile robots. *Journal of Field Robotics*, 40 (5), 1245–1322. <https://doi.org/10.1002/rob.22170>
6. Kabir, H., Tham, M.-L., Chang, Y. C. (2023). Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions. *Digital Communications and Networks*, 9 (6), 1265–1290. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2023.05.006>
7. Gielis, J., Shankar, A., Prorok, A. (2022). A Critical Review of Communications in Multi-robot Systems. *Current Robotics Reports*, 3 (4), 213–225. <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00090-9>
8. Garaffa, L. C., Basso, M., Konzen, A. A., de Freitas, E. P. (2023). Reinforcement Learning for Mobile Robotics Exploration: A Survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 34 (8), 3796–3810. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2021.3124466>
9. Orr, J., Dutta, A. (2023). Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Multi-Robot Applications: A Survey. *Sensors*, 23 (7), 3625. <https://doi.org/10.3390/s23073625>

10. Sun, H., Zhang, W., Yu, R., Zhang, Y. (2021). Motion Planning for Mobile Robots – Focusing on Deep Reinforcement Learning: A Systematic Review. *IEEE Access*, 9, 69061–69081. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3076530>
11. Zhu, K., Zhang, T. (2021). Deep reinforcement learning based mobile robot navigation: A review. *Tsinghua Science and Technology*, 26 (5), 674–691. <https://doi.org/10.26599/tst.2021.9010012>
12. Cohen, S., Agmon, N. (2021). Recent Advances in Formations of Multiple Robots. *Current Robotics Reports*, 2 (2), 159–175. <https://doi.org/10.1007/s43154-021-00049-2>
13. Rafai, A. N. A., Adzhar, N., Jaini, N. I. (2022). A Review on Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for Autonomous Mobile Robots. *Journal of Robotics*, 2022, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2022/2538220>
14. Cho, S. W., Park, H. J., Lee, H., Shim, D. H., Kim, S.-Y. (2021). Coverage path planning for multiple unmanned aerial vehicles in maritime search and rescue operations. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107612. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107612>
15. Omar, H. M., Akram, R., Mukras, S. M. S., Mahvouz, A. A. (2023). Recent advances and challenges in controlling quadrotors with suspended loads. *Alexandria Engineering Journal*, 63, 253–270. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.001>
16. Liang, X., Yu, H., Zhang, Z., Liu, H., Fang, Y., Han, J. (2023). Unmanned Aerial Transportation System With Flexible Connection Between the Quadrotor and the Payload: Modeling, Controller Design, and Experimental Validation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (2), 1870–1882. <https://doi.org/10.1109/tie.2022.3163526>
17. Huang, J., Tao, H., Wang, Y., Sun, J.-Q. (2023). Suppressing UAV payload swing with time-varying cable length through nonlinear coupling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185, 109790. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109790>
18. Xinyu, C., Yongsheng, Z., Yunsheng, F. (2020). Adaptive Integral Backstepping Control for a Quadrotor with Suspended Flight. 2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), 226–234. <https://doi.org/10.1109/cacre50138.2020.9229913>
19. Van Trieu, P., Cuong, H. M., Dong, H. Q., Tuan, N. H., Tuan, L. A. (2021). Adaptive fractional-order fast terminal sliding mode with fault-tolerant control for underactuated mechanical systems: Application to tower cranes. *Automation in Construction*, 123, 103533. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103533>
20. Basal, M. A. (2025). Advanced Sliding Mode Control with Disturbance Rejection Techniques for Multi-DOF Robotic Systems. *Journal of Robotics and Control*, 6 (4), 1612–1623. <https://doi.org/10.18196/jrc.v6i4.25779>
21. Labbadi, M., Boukal, Y., Cherkaoui, M. (2022). Advanced Robust Nonlinear Control Approaches for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. In *Studies in Systems, Decision and Control*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81014-6>
22. Tokat, S., Fadali, M. S., Eray, O. (2015). A Classification and Overview of Sliding Mode Controller Sliding Surface Design Methods. *Recent Advances in Sliding Modes: From Control to Intelligent Mechatronics*, 417–439. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18290-2_20
23. Liu, J., Wang, X. (2011). Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20907-9>

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341427

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ШПАЛ ІЗ БЕТОНУ З ПОПЕРЕДНЬО-НАПРУЖЕНОЮ КОМПОЗИТНОЮ АРМАТУРОЮ ТА ЇХ МОДЕЛЕЙ (с. 6–16)

А. А. Плугін, М. А. Муригін, Д. А. Плугін, Е. Ф. Наджафов, С. М. Мусієнко, О. В. Лобяк

Об'єкт дослідження – скінченоелементні та фізичні моделі залізничних шпал із бетону зі сталеву та композитною попередньо напруженою арматурою. Залізобетонні шпали добре опираються механічним навантаженням, але мають невисокий електричний опір, що сприяє втратам тягового струму, струмам витoku та електрокорозії лінійних споруд на електрифікованих залізницях, порушенням автоблокування. Оскільки невисокий електричний опір обумовлений електропровідністю сталеву арматури, її заміна композитною дозволяє вирішити низку проблем експлуатації залізниць. Але її використання для шпал ускладнюється відміною від сталеву арматури за пружністю і залишається недостатньо дослідженим. Розроблено моделі шпал та схему їх випробування, яка відповідає стандартному випробуванню шпал. Виконано розрахунковий і натурний експерименти з навантаженням моделей. Встановлено, що по мірі навантаження моделей та збільшення моменту деформування розвивається трьома стадіями: утворення тріщин; їх розвиток до утворення пластичного шарніру; руйнування з проковзуванням арматури. У моделі з композитною арматурою порівняно зі сталеву моменти, відповідні цим стадіям, менші на величини, що корелюють з меншими зусиллям натягу і модулем пружності арматури. На всі моменти, що характеризують міцність та тріщиностійкість моделей, вид арматури впливає менше, ніж зусилля попереднього натягу. Порівняно результати розрахункового та натурального експериментів. Запропоновані поправочні коефіцієнти для розрахунку моментів утворення тріщин в шпалах. Отримані результати дозволяють конструювати шпали з композитною арматурою потрібної тріщиностійкості. Такі шпали можуть бути впроваджені за умови отримання позитивного результату їх дослідної експлуатації на електрифікованій ділянці залізниці.

Ключові слова: залізнична шпала, бетон, сталеву арматура, композитна арматура, попереднє напруження, тріщина.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.338430

ВИЗНАЧЕННЯ ЗГІНАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНАНИХ КЛЕЄНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ БАЛОК, АРМОВАНИХ ПОЛІМЕРОМ, АРМОВАНИМ ВУГЛЕЦЕВИМ ВОЛОКНОМ (с. 17–27)

Lilis Nurhayati, Sri Murni Dewi, Wisnu Murti, Devi Nuralinah

У цій статті представлено дослідження механічних характеристик з'єднаних шипами клеєних дерев'яних балок, неармованих та армованих полімером, армованим вуглецевим волокном (ПАВВ), виготовлених з відходів деревини мербау, як альтернатива традиційним конструкційним матеріалам. Дане дослідження зосереджено на граничній вантажопідйомності, модулі пружності, модулі розриву та поведінці навантаження-прогину шаруватих балок з орієнтацією торцевого стику та торцевого шипового з'єднання відносно суцільних балок. Випробування проводилися методом чотириточкового згинання відповідно до ASTM D198-02. Результати показали, що суцільні балки мали найвищу несучу здатність порівняно з шаруватими балками. Армування з вуглецевого волокна збільшило вантажопідйомність на 7,15% для орієнтації торцевого стику та на 38,58% для орієнтації торцевого шипу. Торцеві шипові з'єднання ПАВВ показали значне збільшення модуля пружності та модуля розриву порівняно з торцевими стиковими з'єднаннями, що свідчить про ефективність армування з вуглецевого волокна в певних орієнтаціях. Аналіз залежності навантаження від прогину показує, що ПАВВ балки демонструють кращу пластичність, ніж неармовані, причому піковий прогин збільшується на 27,2% для балок, з'єднаних торцевим стиком, і на 26,0% для балок, з'єднаних торцевим стиком. Результати підтверджують, що армування вуглепластиком може покращити міцність шаруватих балок, з'єднаних шипами; однак, незважаючи на ці покращення, армовані шаруваті балки все ще не досягають рівня міцності суцільних балок, причому максимальна вантажопідйомність і момент згинання становлять приблизно 31% від значень суцільних балок. Це дослідження пропонує розуміння розробки міцних, ефективних та екологічних будівельних матеріалів на основі деревини. Крім того, результати дослідження показують, що шаруватий з'єднаний деревний матеріал, виготовлений з відходів деревообробної промисловості, має потенціал для переробки в конструкційні будівельні матеріали, тим самим підвищуючи цінність деревних відходів.

Ключові слова: шаруватий деревний матеріал, шарувате з'єднання, полімер, армований вуглецевим волокном, модуль пружності, модуль розриву.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342108

ВИЯВЛЕННЯ МЕХАНІЗМІВ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ТРІЩИН І РУЙНУВАННЯ ДЕМПФЕРНОЇ ОБМОТКИ ГІДРОГЕНЕРАТОРА КАПСУЛЬНОГО ТИПУ ПРИ НАЯВНОСТІ СТАТИЧНОГО ЕКСЦЕНТРИСИТЕТУ РОТОРА (с. 28–39)

О. А. Гераскін, Ю. А. Гайдено, В. В. Чумак, В. В. Михайленко, Є. О. Троценко

Об'єктом дослідження є капсульний гідрогенератор типу СГК 538/160–70М потужністю 23 МВА. Вирішується проблема формування тріщин і руйнування демпферної обмотки гідрогенератора при наявності статичного ексцентриситету ротора.

Розроблено тривимірну польову математичну модель електромагнітно-тепло-механічної взаємодії, що оцінює розподіли струмів, температур і термомеханічних напружень у сегменті демпферної обмотки та в пайних швах стержнів.

Показано, що поява і розвиток статичного ексцентриситету ротора є однією із суттєвих причин аварійних ушкоджень і виходу з ладу гідрогенераторів такого типу. Визначено, що за статичного ексцентриситету ротора величиною $\epsilon=0,83$ локальні напруження у шві центрального стержня зростають у $\sim 3,2$ рази (до ≈ 540 МПа). Таке значення перевищує межу міцності міді і пояснює обриви стержнів та лавиноподібне руйнування сегмента. Додатково встановлено, що наявність і локалізація тріщин у пайних швах істотно впливають на характер вигину (деформацію) сегмента демпферної обмотки полюса.

Результати можуть бути використані для оцінювання ресурсу та модернізації великих повільнохідних синхронних гідрогенераторів, у т. ч. капсульних. Зокрема, це може бути зроблено за наступних умов:

- а) наявних або очікуваних ексцентриситетів;
- б) високих теплових градієнтів у лобових/короткозамикаючих частинах демпферної обмотки;
- в) експлуатації з частими пусками/зупинками чи наближеннями до граничних режимами охолодження.

Запропоновано ефективні інженерні заходи: підвищення рухливості стержнів у пазах; перегляд кількості та діаметрів стержнів; застосування матеріалів підвищеної міцності, які можуть бути впроваджені в проектах модернізації та під час ремонту ротора.

Ключові слова: капсульний гідрогенератор, ексцентриситет ротора, ушкодження стержнів, демпферна обмотка, термомеханічні напруження.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340014

ВИЯВЛЕННЯ МІЦНОСТІ РАМИ НАПІВВАГОНА ІЗ РОГАТКАМИ В КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ (с. 40–47)

А. О. Ловська, І. І. Становська, Є. С. Пелипенко, Г. В. Барсукова, О. Ю. Юрченко

Об'єктом дослідження є процеси сприйняття та перерозподілу навантажень в рамі напіввагона із рогатками в конструкції при експлуатаційних навантаженнях. Проблема, що вирішувалась в рамках дослідження, полягає у зменшенні навантаженості рами напіввагона в експлуатації шляхом встановлення у її консольних частинах рогаток.

Для обґрунтування даного удосконалення проведено розрахунок на міцність рами напіввагона при основних схемах навантажень в експлуатації. Визначення динамічних навантажень, які діють на раму напіввагона, проведено математичним моделюванням. Результати розрахунків на міцність показали, що максимальні напруження в рамі виникають при I розрахунковому режимі. Однак ці напруження на 6% нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції рами.

Також в рамках дослідження проведено розрахунок на міцність рами напіввагона при перевезенні залізничним поромом. Встановлено, що міцність рами напіввагона забезпечується. Отримані розрахункові напруження на 4% нижче за ті, що виникають у типовій конструкції рами напіввагона.

Особливістю запропонованого удосконалення є те, що його реалізація є можливою на стадії модернізації вагонів, а не тільки виготовлення нових конструкцій.

Сферою практичного використання отриманих результатів є залізничний транспорт.

Умовою практичного впровадження результатів дослідження є сполучення рогатки із зонами розміщення передніх та задніх упорів автозчепів.

Результати проведеного дослідження сприятимуть покращенню міцності несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації та зменшенню витрат на їх утримання. Також проведене дослідження сприятиме створенню напрацювань щодо проектування вантажних вагонів із покращеними техніко-економічними показниками.

Ключові слова: залізничний транспорт, напіввагон, рама напіввагона, удосконалення рами, міцність рами, енергоефективність конструкції.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.340389

КОНСТРУЮВАННЯ ГРАВІТАЦІЙНОГО СПУСКУ ЗА ЗАДАНОЮ ТРАЄКТОРІЄЮ РУХУ ВАНТАЖУ (с. 48–55)

Т. М. Воліна, В. М. Несвідомін, С. Ф. Пилипака, М. В. Каленик, В. О. Плоский, Н. М. Аушева, В. М. Бабка, О. О. Налобіна, С. Л. Андрух, О. М. Павленко

Об'єктом дослідження є процес руху вантажу по гвинтовій поверхні косоного відкритого гелікоїда під дією сили власної ваги. Такий рух має місце в гравітаційних спусках, де вантаж опускається під дією сили власної ваги. Гравітаційні (гвинтові) спуски застосовують для транспортування, сепарації і збагачення матеріалу. При заданій поверхні задача розв'язується складанням диференціальних рівнянь руху математичної точки, яку умовно замінюють вантажем, в проекціях на осі просторової системи координат. Якщо поверхня гвинтова, то після стабілізації руху можна знайти параметри гвинтової лінії – траєкторії руху вантажу. Проблема полягає в розв'язанні оберненої задачі – конструюванні гвинтової поверхні за заданою траєкторією опускання вантажу, якою є гвинтова лінія.

Отримані результати пояснюються застосуванням двох супровідних тригранників траєкторії із спільною вершиною і дотичними ортами до траєкторії, які збігаються. Один із них є тригранником Френе, положення якого визначається диференціальними характеристиками кривої, а другий – тригранником Дарбу, положення якого залежить від точки траєкторії на поверхні. Крім двох ортів, що збігаються, решта чотири орти розташовані в нормальній до траєкторії площині. Застосування цих двох ортів дає можливість скласти диференціальні рівняння руху вантажу в проекціях на рухомий тригранник Дарбу, одна із площин якого є дотичною до поверхні.

Особливістю розв'язання задачі є те, що траєкторія руху вантажу, тобто гвинтова лінія, задається радіусом r циліндра, на якому вона розташована, і швидкістю V руху вантажу. За допомогою цих даних визначається кут β її підйому. Наприклад, при $r = 0,5$ м, $V = 2,5$ м/с кут підйому становить $\beta = 20,7^\circ$. Після цього відбувається побудова гвинтової лінійчатої поверхні, яка проходить через задану траєкторію.

Ключові слова: тригранники Френе і Дарбу, довжина дуги, прикладені сили, диференціальні рівняння, гвинтова лінія.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.341450**РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ «БОЙОК-ІНСТРУМЕНТ-ОБРОБЛЮВАЛЬНЕ СЕРЕДОВИЩЕ»
(с. 56–64)****В. М. Сліденко, О. М. Сліденко, О. В. Замараєва, А. О. Новиков, В. О. Ткаченко**

Об'єктом дослідження є процес імпульсної взаємодії елементів ударного пристрою та оброблювального середовища (ОС). Вирішувалась проблема поєднання імітаційного та математичного моделювання процесу. Розроблена імітаційна модель ударника із застосуванням системи програмування Ansys. У модулі Design Modeler побудовані основні елементи ударника в геометричній формі, наближеній до циліндричної, та імітатор ОС. Степені свободи елементів, їх фізичні властивості та зовнішні фактори прийняті відповідно до конструктивної схеми та режимів роботи ударника. Оцінка адекватності імітаційної моделі проведена порівнянням з дискретними та дискретно-континуальними моделями. Розв'язок системи диференціальних рівнянь при початкових та крайових умовах отримано методом скінченних різниць. Порівняння проводилося за параметрами ударної взаємодії: часу співудару, коливань контактних і ударних торців інструменту. Розглядалися бойки та інструменти різних розмірів при плоских контактних торцях. Час співудару визначався за різницею швидкостей та переміщень контактних торців бойка та інструменту, він становив 0,1–0,5 мс. При цьому швидкість бойка змінювалась в діапазоні 3–20 м/с. Високочастотні коливання торців інструменту складали величину 3000–6000 Гц і визначались розмірами бойка та інструменту. Розбіжність параметрів відносно системи Ansys становить не більше 10%. Імітаційна модель дозволила оцінити трансформацію енергії в системі «бойок-інструмент-ОС». Коефіцієнт передачі енергії до ОС від інструменту становить 0,55–0,65, від бойка до інструменту –0,75–0,8. Отримані результати є основою використання імітаційної моделі для проведення числових експериментів з елементами ударного пристрою складної геометричної форми. Імітаційна модель та дискретно-континуальні моделі можуть застосовуватися для вибору раціональних параметрів при проектуванні ударних пристроїв.

Ключові слова: Ansys Mechanical, ударний пристрій, час співудару, ідентифікація моделі, енергетичні характеристики.

DOI: 10.15587/1729-4061.2025.342109**СИНТЕЗ КОНТРОЛЕРА ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРІВ З ПІДВІШЕНИМИ КОРИСНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ
(с. 65–71)****Nguyen Thi Dieu Linh, Nguyen Van Bang**

Об'єктом цього дослідження є керування квадрокоптером. Безпілотні літальні апарати, що використовуються зараз, часто стикаються з різними труднощами та обмеженнями. Під час роботи в середовищах, що піддаються зовнішнім збуренням, зокрема, під час перенесення підвішених вантажів на тросах, проблема керування стає значно складнішою. В результаті квадрокоптер не може точно слідувати заданій траєкторії польоту.

Вирішена проблема полягає в синтезі нового контролера для квадрокоптера з вантажем, підвішеним на тросі, що забезпечує точне слідування квадрокоптера заданій траєкторії польоту. Запропонований алгоритм демонструє значне покращення порівняно з існуючими методами, ефективно пригнічуючи кут коливань підвішеного корисного вантажу, розглядаючи вплив корисного вантажу як зовнішнє збурення. Крім того, він обмежує кут розгойдування в прийнятному діапазоні, тим самим забезпечуючи стабільність та надійність всієї системи під час роботи.

У цьому дослідженні представлено новий алгоритм керування, здатний точно направляти квадрокоптер у потрібне положення, навіть за умови перенесення вантажу, підвішеного на тросі, у змінному середовищі. Алгоритм демонструє значну перевагу, дозволяючи квадрокоптеру досягти бажаної траєкторії протягом 2,6 секунд. Підвішений вантаж демонструє лише невеликі коливання, які поступово зменшуються, коли квадрокоптер переходить у стабільний стан. Завдяки своїй простій структурі, високій стабільності та швидкій конвергенції, це надійне рішення є важливим для безпілотних літальних апаратів, значно підвищуючи їхню експлуатаційну ефективність у складних умовах.

Ключовою перевагою запропонованого алгоритму є його проста структура. Крім того, він демонструє високі показники конвергенції та виняткову стабільність, що є важливими атрибутами для застосувань у реальному часі. Його конструкція також забезпечує легкість практичного впровадження, що робить його життєздатним рішенням для безпілотних літальних апаратів. Алгоритм розроблено на основі сучасних методів керування, поєднуючи контролер ковзного режиму з розширеним спостерігачем станів. Керування ковзним режимом підтримує стабільність системи за наявності збурень та невизначеностей, тоді як розширений спостерігач станів оцінює невимірні стани та сукупні збурення, що впливають на систему. Така конструкція забезпечує точне позиціонування квадрокоптера з підвішеним вантажем у потрібному місці.

Ключові слова: керування ковзним режимом, розширений спостерігач станів, безпілотний літальний апарат, траєкторія.