

## **Комп'ютерне проектування інноваційних систем охолодження кабелів рідиною у зарядних станціях для електромобілів: аналіз та перспективи**

*Національний аерокосмічний університеті  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»*

Стаття присвячена дослідженню та аналізу інноваційних систем охолодження кабелів рідиною у зарядних станціях для електромобілів. Відзначається актуальність проблем теплового режиму кабельних систем під час процесу зарядки електромобілів та необхідність застосування високоефективних технологій охолодження для забезпечення оптимальних умов функціонування. Особливо підкреслюється, що надійна робота зарядних станцій залежить від ефективності систем охолодження, які мінімізують ризики перегріву кабелів, що можуть призводити до аварійних ситуацій або виходу з ладу обладнання. Система охолодження силового кабелю є критичною для забезпечення ефективності та надійності роботи зарядних станцій, що є важливим в умовах зростання ринку електромобілів та відповідних вимог до інфраструктури. Розглядаються різні типи охолоджувальних рідин, їх теплопровідність, в'язкість, стабільність при високих температурах та діелектричні властивості. Особлива увага приділяється системам охолодження кабелів, які передають великий струм і виділяють значну кількість теплоти. Впровадження рідинного охолодження дає змогу підтримувати оптимальні температурні умови, зменшуючи площу поперечного перерізу та вагу кабелів, що, у свою чергу, сприяє зменшенню витрат на матеріали і підвищенню ефективності енергоспоживання. У статті розглядаються також різні типи систем охолодження, зокрема циркуляційні, поглиблені, іммерсійні, а також системи з охолоджувальними трубками всередині струмопровідних жил. Кожна система має свої переваги та недоліки, які детально проаналізовано з погляду на їх застосування в конкретних умовах. Питання вибору діелектричних рідин, таких як силіконові, фторові рідини та ефіри, розглянуто з огляду на їх теплопровідність, стабільність, екологічність, а також довговічність та надійність у складних експлуатаційних умовах. Розглянуто їх сумісність з матеріалами, що використовуються в зарядних станціях, що є важливим для забезпечення тривалого терміну служби систем. В статті наголошено на важливість урахування теплових та електричних характеристик матеріалів під час проектування систем охолодження, що безпосередньо впливає на загальну ефективність і надійність роботи зарядних станцій. Аналізуються інноваційні рішення для покращання охолодження кабельних мереж при високих температурах і великих навантаженнях, що особливо є актуальним у світлі постійного зростання вимог до швидкості зарядження електромобілів. Автори рекомендують впровадження сучасних рішень у сфері охолодження для підвищення ефективності та безпеки електромобільної інфраструктури, що може стати одним із ключових факторів у розвитку стійкої і екологічно безпечної транспортної системи.

**Ключові слова:** проектування; інноваційні технології; системи охолодження зарядних станцій; охолодження рідиною; зарядження електромобілів; тепловий режим; діелектричні рідини; тепловідведення; кабельні мережі; ефективність зарядження; оптимізація теплопередачі.

### **Вступ**

У статті обговорюються поточні тенденції розвитку систем охолодження для зарядних станцій та висвітлюються перспективи впровадження нових матеріалів та технологій з метою оптимізації теплового режиму. Аналізується

вплив інноваційних рішень на забезпечення ефективного зарядження електромобілів і підвищення надійності зарядних станцій. Проводиться аналіз різних типів охолоджувальних рідин та їх переваг у контексті зарядних станцій для електромобілів. Особлива увага приділяється вивченню інноваційних технологій, які дають змогу підвищити ефективність систем охолодження та забезпечити стабільну роботу кабельних мереж у різних умовах експлуатації.

Отже, мета статті – внести вагому інформацію в область розвитку технологій охолодження для зарядних станцій електромобілів, що буде сприяти подальшому розвитку стійких і продуктивних систем для зарядження електротранспорту. Охолодження рідиною кабелів у зарядних станціях для електромобілів є важливою стратегією, оскільки забезпечує оптимальні умови функціонування та безпеку електричної інфраструктури.

Під час зарядження електромобілів в кабелях та рознімах може виникати значне тепловиділення через великий електричний струм, який проходить через них. Системи охолодження рідиною дають змогу відводити це тепло, підтримуючи оптимальну температуру та ефективність зарядження, що впливає на площу перетину кабелів та дає змогу їх зменшити, а це, в свою чергу, впливає на вагу кабелю та збільшує можливу потужність заряджання автомобілів.

Сучасні електромобілі здатні заряджатися струмом до 600 А. Для забезпечення проходження такого струму без нагрівання провідника необхідно використовувати кабелі з великою площею перерізу 180...240 мм<sup>2</sup>. Такі кабелі мають дуже велику вагу та не можуть використовуватися для підключення електромобіля до зарядної станції. Для забезпечення проходження великого струму у провіднику невеликого перерізу пропонується відводити теплову енергію від кабелю та рознімів рідиною.

Під час використання кабелів підвищення температури також може призводити до зниження ресурсу електричних кабелів через погіршення їхніх електротехнічних характеристик. Охолодження рідиною допомагає уникнути перегрівання та підтримує нормальні умови експлуатації.

За стандартами не допускається висока температура на поверхні кабелю, що може створювати небезпеку для операторів та користувачів зарядних станцій. Системи охолодження рідиною сприяють утриманню температур на безпечному рівні.

Використання систем охолодження рідиною у зарядних станціях дає змогу оптимізувати процес зарядження, забезпечуючи ефективність, тривалу службу обладнання та безпеку експлуатації, що є важливим в контексті ринку електромобілів, який швидко розвивається.

## **1. Види систем охолодження кабелів рідиною**

*Циркуляційні системи з рідиною.* Ця технологія передбачає використання рідини, яка циркулює через спеціальні трубопроводи або канали, розташовані поруч (рис. 1, а) з кабелем або у середині (рис. 1, б) кабелю. Рідина відводить тепло від кабелю та транспортує його до системи охолодження. Це може бути вода, галогенові вуглеводні або інші охолоджувальні рідини.

Перевагою такої системи є можливість застосування будь-якої рідини як теплоносія. Зазвичай для систем охолодження використовується спеціальна рідина, що складається з етиленгліколю або пропіленгліколю, які забезпечують морозостійкість і захист від корозії, а також додаткових добавок для підвищення ефективності охолодження та захисту системи охолодження.

Недоліком такої системи є невелика ефективність відведення теплоти від кабелю.

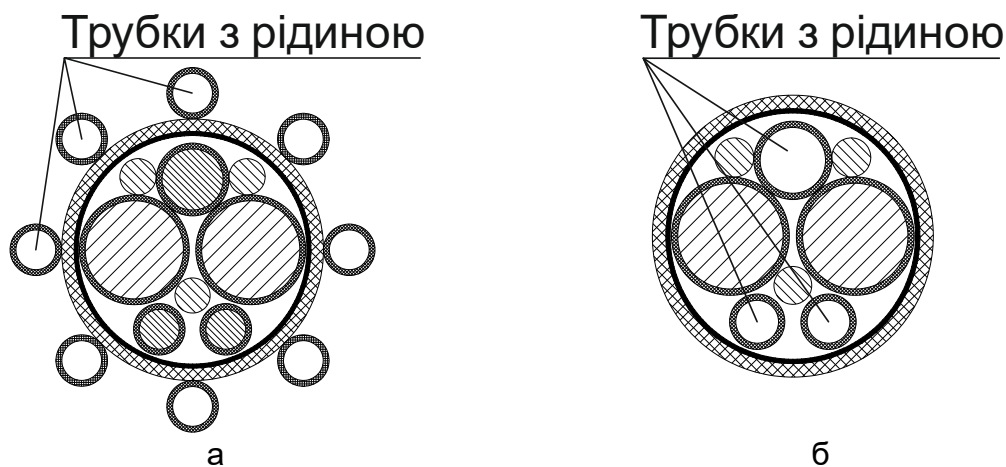


Рис. 1. Система охолодження кабелю з трубками:  
а – на зовнішній поверхні; б – у середині кабелю

*Поглиблені системи охолодження.* У цих системах кабель розміщується у спеціальних камерах (рис. 2), наповнених охолоджувальною рідиною. Це дає змогу ефективно відводити тепло від кабелю та підтримувати стабільну температуру.

Перевагою такої системи є велика ефективність тепловідведення, недоліком – неможливість застосування у побутових умовах, а саме у системах заряджання автомобілів.

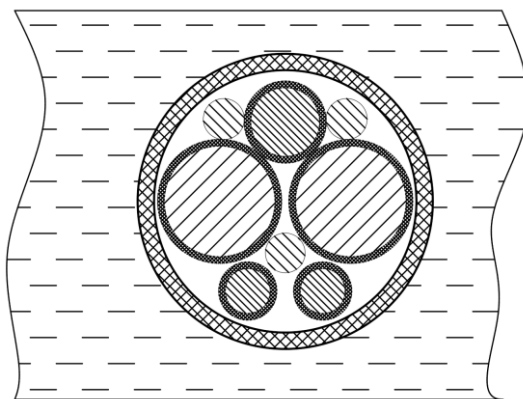


Рис. 2. Схема поглибленої системи охолодження

*Системи іммерсійного охолодження.* При цьому типі систем кабель імергується повністю в охолоджувальну рідину, яка може бути діелектриком (рис. 3). Це забезпечує високий рівень охолодження та велику площу контакту між кабелем і рідиною.

Перевагою такої системи є велика ефективність тепловідведення, недоліком – неможливість застосування у побутових умовах, а саме у системах заряджання автомобілів. Для ефективності системи охолодження елементи кабелю заглиблюють у рідину, що охолоджує без захисту. Також слід відмітити, що у таких системах охолоджувальна рідина має бути діелектричною.

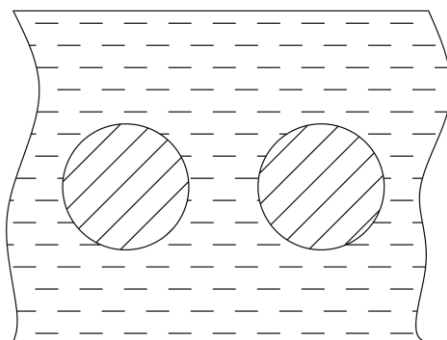


Рис. 3. Схема імерсійної системи охолодження

*Система охолодження з розміщенням струмопровідних жил у середині трубок з охолоджувальною рідиною (рис. 4).*

Перевагами такої системи є:

- висока ефективність тепловідведення;
- технологічна доступність;
- можливість використовувати у системах заряджання автомобілів.

Недоліками такої системи є:

- використання діелектричної рідини;
- складна система подачі рідини до кабелю.

Незважаючи на наведені недоліки така система є найбільш ефективною для використання у системах заряджання автомобілів.

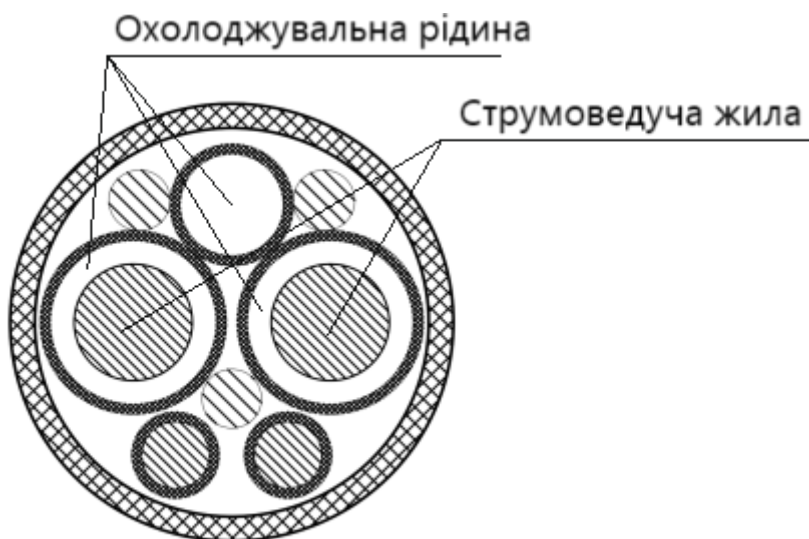


Рис. 4. Схема кабелю з розміщенням струмопровідних жил у середині трубок з охолоджувальною рідиною

Діелектричні рідини в системах охолодження кабелів у зарядних станціях для електромобілів відіграють важливу роль у забезпеченні ефективності та безпеки всього процесу. Наведемо деякі ключові аспекти та огляд деяких типових діелектричних рідин, які можуть бути використані.

## 2. Вимоги до діелектричних рідин

*Висока теплопровідність.* Діелектричні рідини повинні мати достатньо високий коефіцієнт теплопровідності для ефективного відведення тепла від кабелів та зарядних станцій.

*Низька в'язкість.* Це є важливим для забезпечення ефективного перенесення тепла через систему.

*Стабільність при високих температурах.* Оскільки системи зарядження можуть працювати при високих температурах, діелектрична рідина має бути стабільною при використанні.

*Діелектричні властивості.* Оскільки маємо справу з електричними системами, діелектрична рідина повинна мати достатньо високу діелектричну проникливість та стійкість до розряду.

*Низька токсичність.* Для забезпечення безпеки обслуговування та відповідності екологічним стандартам.

## 3. Типові діелектричні рідини

*Силіконові рідини.* Вони мають добру теплопровідність, низьку в'язкість та стабільність при високих температурах. Також вони часто мають хороші діелектричні властивості. Силіконові діелектричні рідини є одними з найпоширеніших в системах охолодження, включаючи зарядні станції для електромобілів.

Наведемо деякі типові силіконові діелектричні рідини, які можуть бути використані:

- *полідиметилсилоксани (PDMS).* Це один з найпоширеніших типів силіконових рідин, які використовуються у різних промислових застосуваннях, включаючи системи охолодження. PDMS має дуже низьку токсичність, відмінну теплопровідність та хімічну стійкість [3];

- *фенілметилсилоксани (PMPS).* Ці силіконові рідини мають вищий індекс заломлення і коефіцієнт в'язкості порівняно з PDMS. PMPS можуть бути використані у вимогливих застосуваннях, де важлива оптична прозорість або висока стійкість до високих температур [1];

- *функціоналізовані силіконові рідини.* Ці рідини містять додаткові функціональні групи, що можуть покращити їх властивості для конкретних застосувань. Наприклад, можуть бути додані антикорозійні або антиоксидантні домішки [5];

- *силіконові гелі.* Деякі виробники також використовують силіконові гелі як діелектричні рідини. Гелі мають високу в'язкість та можуть бути використані для заповнення просторів із складною геометрією або для забезпечення додаткової механічної стійкості.

*Фторові рідини.* Ці рідини мають високий коефіцієнт теплопровідності та стійкість до високих температур. Вони також відомі своєю хімічною стійкістю. Наведемо декілька рідин цього класу:

- *Fluorinert™* – вироблений компанією 3M, є одним з найвідоміших брендів фторових рідин. Він відзначається високою теплопровідністю, низькою токсичністю та хімічною стійкістю. Fluorinert™ використовується у різних високотехнологічних застосуваннях, включаючи електроніку та автомобільну промисловість;

- *Galden®* – це інша популярна марка фторових рідин, яку виробляє

компанія Solvay. Вона має високий коефіцієнт теплопровідності та хімічну стійкість, що робить її популярним вибором для застосувань у високотемпературних середовищах;

– *Fluorolube®* – це ще один продукт від Solvay, який використовується як діелектрична рідина в різних технічних застосуваннях. Вона має високу термічну стійкість і хімічну стійкість;

– *FC-40* – це фторова рідина, розроблена компанією DuPont, яка також відома своєю високою теплопровідністю та хімічною стійкістю. Вона широко використовується в промислових застосуваннях, включаючи системи охолодження;

– *Novac™* – це бренд фторових рідин від компанії 3M, які також відомі своєю високою теплопровідністю та низькою токсичністю. Вони часто використовуються в електроніці та автомобільній промисловості для охолодження та теплообміну.

Ці продукти є лише деякими з численних фторових діелектричних рідин, які доступні на ринку. Вибір конкретної рідини залежить від вимог конкретної системи охолодження, а також від фінансових та екологічних обмежень.

**Масла на основі ефірів.** Ці рідини можуть мати високу теплопровідність та добру стійкість до високих температур. Вони також можуть бути менш токсичними, але можуть потребувати уваги до вибору матеріалів у системі.

Наведемо деякі загальновідомі масла на основі ефірів, які можуть використовуватися в системах охолодження та інших технічних застосуваннях:

- *Dibasic Ester (DBE)* – є популярним вибором для різних технічних застосувань, включаючи електроніку, електричні системи та інші;
- *Trimethylolpropane (TMPTE)* – це масло на основі ефірів, яке використовується у високотехнологічних застосуваннях;
- *Trimethylolpropane Trioleate (TMPTO)* – також використовується в різних технічних застосуваннях через свої властивості;
- *Neopentyl Glycol Dioleate (NPGDO)* – це масло на основі ефірів, яке може знаходити застосування в електроніці та електротехніці;
- *Diethylene Glycol Dibenzoate (DEGDB)* – є ще одним прикладом масла на основі ефірів, яке може використовуватися у різних технічних застосуваннях.

#### 4. Обмеження та виклики

Розглянемо ключові фактори, які слід враховувати при виборі діелектричних рідин для систем охолодження кабелів у зарядних станціях для електромобілів. Основні аспекти включають економічну доцільність, матеріальну сумісність, вплив на навколишнє середовище та відповідність технічним вимогам. Ці чинники є критично важливими для забезпечення надійності, ефективності та довговічності систем, а також для мінімізації потенційних ризиків у процесі експлуатації.

– **Вартість.** Деякі діелектричні рідини можуть бути відносно дорогими, що може вплинути на вартість системи зарядження.

– **Сумісність з матеріалами.** Важливо враховувати сумісність використовуваних матеріалів із діелектричною рідиною, щоб уникнути корозії або інших проблем.

– *Екологічні аспекти.* Вибір діелектричної рідини також має враховувати його вплив на навколишнє середовище та відповідність екологічним нормам.

Загалом, вибір діелектричних рідин для систем охолодження кабелів у зарядних станціях для електромобілів має бути здійснений з урахуванням вимог до теплопровідності, електричної і теплової стійкості, вартості та екологічних аспектів. Крім того, рекомендується проводити тестування на сумісність з матеріалами ізоляції та іншими компонентами системи, щоб уникнути можливих проблем у майбутньому.

### Висновки

У статті зроблено огляд конструкцій кабелів, що охолоджуються рідиною. Самою ефективною є конструкція, схему якої наведено на рис. 4. Зроблено огляд існуючих рідин, що можуть бути використані у такій системі. Із зазначених вище рідин дуже важко виявити найкращу за всіма критеріями, тому необхідно вибирати рідину відповідно до конкретної конструкції, використаних в ній матеріалів, вартості.

Системи охолодження, що використовують рідину, забезпечують ефективне відведення тепла від кабелів, дозволяючи їм працювати на високих струмах заряду без перегріву. Це може призвести до значного скорочення часу заряджання електромобіля, оскільки більший струм заряду дозволяє заряджати батареї швидше.

Однак при впровадженні таких систем важливо враховувати ефективність та економічну доцільність, оскільки вони можуть потребувати додаткових витрат на устаткування та обслуговування. Також необхідно враховувати вплив збільшеного струму на електричну мережу та необхідність використання енергоефективних систем охолодження для забезпечення стабільності та ефективності використання електроенергії.

### References

1. Liu, J., Du, M., Huang, X., Liu, Z., & Qu, Z. (2020). Silicone oil impregnated insulating paper for transformer application: A review. *IEEE Access*, 8, 91996-92005.
2. Andjelkovic, M., Radosavljevic, J., Mihailovic, D., & Bozic, M. (2019). Review of silicone oils as phase change materials for low temperature applications. *Thermochimica Acta*, 678, 178383.
3. Klaassen, E., Kuipers, L., & Huijben, M. (2018). Review on silicone based dielectric elastomers. *Polymer Reviews*, 58(1), 1–49.
4. Jiang, J., Wang, Y., Yang, J., Zhang, J., & Liu, C. (2017). A review on silicone rubber dielectric elastomers. *Polymer Reviews*, 57(1), 68–107.
5. Li, Z., Li, J., Shao, J., Xiong, J., & Lu, S. (2016). Review of silicone based dielectric fluids and development of nano-composite for liquid immersed transformer applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 151(1), 012063.
6. Pandey, A., Anand, S., & Saroha, S. (2018). Liquid cooling for electronics: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 393-412.
7. Shuja, S. Z., Bin-Mahfouz, A. S., & Hossain, M. A. (2020). Liquid Cooling of Electronics: A Review of Critical Factors Influencing Performance. *IEEE Access*, 8, 58749-58779.
8. Alklaibi, A. M., Al-Meer, S. H., Assaaedi, A. S., & Al-Hajji, S. H. (2019). A

review of two-phase and single-phase liquid cooling for high heat flux electronic devices. International Communications in Heat and Mass Transfer, 108, 104320.

9. Wang, L., Zhou, G., & Zhang, Z. (2018). Recent developments in liquid cooling technologies for electronic devices. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 91, 1094-1112.

Надійшла в редакцію 18.03.2025, розглянута на редколегії 18.03.2025.

## **Computer-Aided Design of Innovative Liquid Cooling Systems for Cables in Electric Vehicle Charging Stations: Analysis and Prospects**

This article is dedicated to the study and analysis of innovative liquid cooling systems for cables in electric vehicle charging stations. The relevance of thermal management issues in cable systems during the charging process of electric vehicles is highlighted, emphasizing the need for highly efficient cooling technologies to ensure optimal operating conditions. The article analyzes current trends in the development of cooling systems for electric vehicle charging stations, particularly the optimization of thermal management using innovative materials and technologies. Cooling is critical to ensure the efficiency and reliability of charging stations, which is vital given the growing electric vehicle market. Various types of cooling liquids are examined, including their thermal conductivity, viscosity, stability at high temperatures, and dielectric properties. Special attention is given to cable cooling systems that transmit large currents and generate significant heat. The implementation of liquid cooling allows for the maintenance of optimal temperature conditions while reducing the cross-sectional area and weight of the cables. The article also discusses different types of cooling systems, such as circulation, deep, immersion, and systems with cooling tubes inside the conductive cores. Each system has its advantages and disadvantages, which are analyzed in detail. The selection of dielectric fluids, such as silicone, fluorinated liquids, and esters, is considered in terms of their thermal conductivity, stability, and environmental impact. Their compatibility with materials used in charging stations is also addressed. The article emphasizes the importance of considering the thermal and electrical characteristics of materials during the design of cooling systems, which impacts the overall efficiency and reliability of charging stations. Innovative solutions for improving the cooling of cable networks under high temperatures and heavy loads are analyzed. The authors recommend the implementation of modern cooling solutions to enhance the efficiency and safety of electric vehicle infrastructure.

**Keywords:** design; innovative technologies; cooling systems for charging stations; liquid cooling; electric vehicle charging; thermal management; dielectric fluids; heat dissipation; cable networks; charging efficiency; heat transfer optimization.

### **Відомості про авторів**

**Сасенко Сергій Юрійович** – к.т.н., доцент кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання Національного аерокосмічного університету «ХАІ», м. Харків, Україна, e-mail: [s.saienko@khai.edu](mailto:s.saienko@khai.edu), tel.: +380501376126, ORCID:0000-0002-7607-0860;

Google

Scholar:

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=u4DJH70AAAAJ>

**Мсаллам Катерина Петрівна** – к.т.н., доцент кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання Національного аерокосмічного університету «ХАІ», м. Харків, Україна, e-mail: [k.msallam@khai.edu](mailto:k.msallam@khai.edu), tel.: +380673878176, ORCID:0000-0002-3923-0650, <https://orcid.org/0000-0002-3923-0650>, ID Scopus: Scopus ID: 24338935400, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24338935400>, Google Scholar: <https://scholar.google.ru/citations?user=vAALoyqAAAAJ&hl=ru&oi=sra>

**Мурадян Тигран Костянтинович** – старший викладач кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання Національного аерокосмічного університету «ХАІ», м. Харків, Україна, e-mail: [t.muradjan@khai.edu](mailto:t.muradjan@khai.edu), tel.: +380504028142, Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=PWjrU7MAAAAJ>

**Перехрест Наталія Вікторівна** – старший викладач кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання Національного аерокосмічного університету «ХАІ», м. Харків, Україна, e-mail: [n.perekhrest@khai.edu](mailto:n.perekhrest@khai.edu), tel.: +380506225767, Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=3rD7Xi0AAAAJ&hl=uk>

### About the Authors

**Syenko Serhii Yuriiovych** – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of descriptive geometry and computer modeling, National Aerospace University «KhAI», Kharkiv, Ukraine, e-mail: [s.saienko@khai.edu](mailto:s.saienko@khai.edu), tel.: +380501376126, ORCID:0000-0002-7607-0860; Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=u4DJH70AAAAJ>

**Msallam Kateryna Petrivna** – Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of descriptive geometry and computer modeling, National Aerospace University «KhAI», Kharkiv, e-mail: [k.msallam@khai.edu](mailto:k.msallam@khai.edu), tel.: +380673878176, ORCID:0000-0002-3923-0650, <https://orcid.org/0000-0002-3923-0650>, ID Scopus: Scopus ID: 24338935400, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24338935400>, Google Scholar: <https://scholar.google.ru/citations?user=vAALoyqAAAAJ&hl=ru&oi=sra>

**Muradyan Tigran Kostyantynovych** – Senior Lecturer, Department of descriptive geometry and computer modeling, National Aerospace University «KhAI», Kharkiv, e-mail: [t.muradjan@khai.edu](mailto:t.muradjan@khai.edu), tel.: +380504028142, Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=PWjrU7MAAAAJ>

**Perekhrest Nataliia Viktorivna** – Senior Lecturer, Department of descriptive geometry and computer modeling, National Aerospace University «KhAI», Kharkiv, e-mail: [n.perekhrest@khai.edu](mailto:n.perekhrest@khai.edu), tel.: +380506225767, Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=3rD7Xi0AAAAJ&hl=uk>