

Сергій САЄНКО

*кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна
e-mail: s.saienko@khai.edu
ORCID: 0000-0002-7607-0860*

Катерина МСАЛЛАМ

*кандидатка технічних наук, доцентка
доцентка кафедри нарисної геометрії та комп'ютерного моделювання
Національного аерокосмічного університету
ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна
e-mail: k.msallam@khai.edu
ORCID: 0000-0002-3923-0650*

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ КАБЕЛІВ РІДИНОЮ

Анотація: Системи охолодження кабелів рідиною відіграють важливу роль у забезпеченні надійної роботи високовольтних мереж та електрообладнання. У доповіді розглядаються конструктивні особливості таких систем, зокрема їхні компоненти, принципи роботи та оптимізація процесу охолодження. Аналізуються різні типи охолоджувальних рідин, їх властивості та вплив на ефективність теплообміну. Особлива увага приділяється підбору матеріалів для трубопроводів, що забезпечують циркуляцію охолоджувальної рідини. Розглядаються також питання технічного обслуговування і заходи щодо забезпечення довговічності систем. Отримані результати можуть бути корисними для вдосконалення конструкцій охолодження кабелів, що підвищує безпеку та ефективність експлуатації електричних мереж.

Ключові слова: кабель, система охолодження, рідинна система охолодження, охолоджуюча рідина.

CONSTRUCTIVE FEATURES OF LIQUID COOLING SYSTEMS FOR CABLES

Abstract: Liquid cooling systems for cables play a crucial role in ensuring the reliable operation of high-voltage networks and electrical equipment. This report examines the constructive features of these systems, including their components, working principles, and cooling process optimization. Various types of cooling fluids are analyzed, along with their properties and impact on heat exchange efficiency. Special attention is given to selecting materials for pipelines that facilitate the circulation of the cooling fluid. Maintenance considerations and measures to ensure system longevity are also discussed. The findings may be useful for improving cable cooling designs, thereby enhancing the safety and efficiency of electrical network operations.

Keywords: cable, cooling system, liquid cooling system, cooling fluid.

У доповіді обговорюються поточні тенденції розвитку систем охолодження для високонавантажених кабелів. Висвітлюються перспективи впровадження нових матеріалів та

технологій з метою оптимізації теплового режиму. Аналізується вплив інноваційних рішень на забезпечення ефективної передачі електроенергії до кінцевого споживача. Проводить аналіз різних типів охолоджуючих рідин та їх переваг. Особлива увага приділяється вивченню інноваційних технологій, які дозволяють підвищити ефективність систем охолодження та забезпечити стабільну роботу кабельних мереж у різних умовах експлуатації.

Аналіз існуючих 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 охолоджуючі рідини.

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

Недоліком такої системи є не велика ефективність відводу теплоти від кабелю.

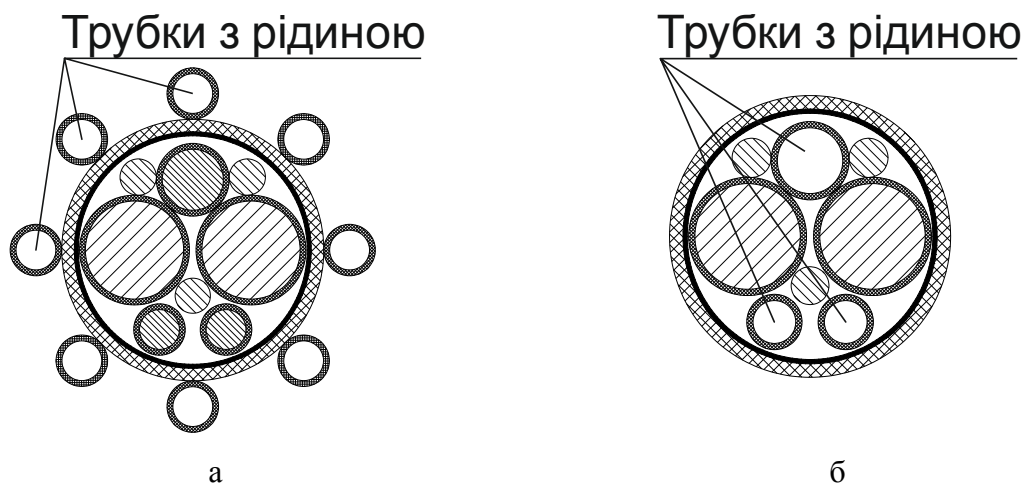


Рис. 1. Система охолодження кабелю з трубками:

а – на зовнішній поверхні; б – у середині

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

Перевагою такої системи є велика ефективність тепловідведення.

Недоліком, неможливість застосування у побутових умовах.

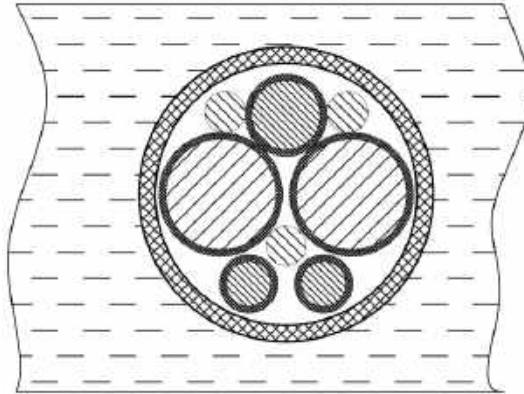


Рис. 2. Схема поглибленої системи охолодження

Системи імерсійного охолодження. При цьому типі систем кабель погружається повністю в охолоджуючу 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. У таких системах охолоджуюча рідина повинна бути діелектричною та відповідати вимогам зовнішньої безпеки.

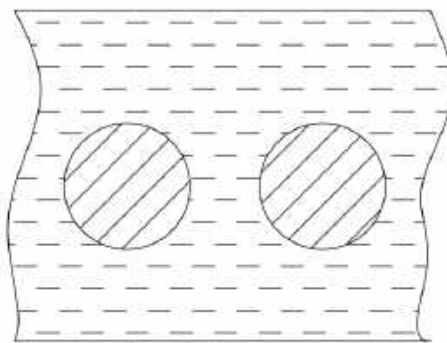


Рис. 3. Схема імерсійної системи охолодження

Система охолодження з розміщенням струмопровідних жил у середині трубок з охолоджуючою рідиною [4](рис. 4).

Перевагами такої системи є:

- висока ефективність тепловідведення;
- технологічна доступність;

Недоліками такої системи є:

- використання діелектричної рідини;

– складна система подачі рідини до кабелю.

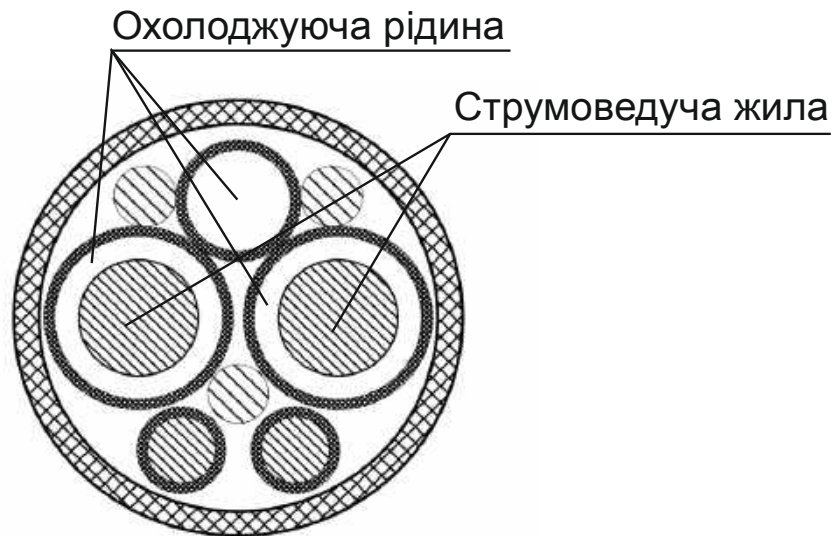


Рис. 4. Схема кабелю з розміщенням струмопровідних жил у середині трубок з охолоджуючою рідиною

З наведених вище конструкцій систем охолодження, на нашу думку, найефективнішою є система що показана на рис. 4.

Огляд діелектричних рідин, що можуть використовуватися у системі охолодження.

Силіконові рідини. Вони мають добру теплопровідність, низьку в'язкість та стабільність при високих температурах. Також, вони часто мають хороші діелектричні властивості.

Тут наведено деякі типові силіконові діелектричні рідини, які можуть бути використані:

- фенілметилсилоксани (PMPS) [2];
- полідиметилсилоксани (PDMS) [1];
- функціоналізовані силіконові рідини [3];
- силіконові гелі;
- фторові рідини;
- Galden®;
- Fluorolube®;
- FC-40 (DuPont);
- Novec™ (3M).

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 вимагати уваги до вибору матеріалів у системі.

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

- Dibasic Ester (DBE);
- Trimethylolpropane (TMPTE);
- Trimethylolpropane Trioleate (TMPTO);
- Neopentyl Glycol Dioleate (NPGDO);
- Diethylene Glycol Dibenzoate (DEGDB).

В результаті дослідження різних типів рідинних систем охолодження для кабелів встановлено, що конструктивні особливості, вибір охолоджуючих рідин та їх ефективність є ключовими аспектами, які впливають на надійність і безпечність роботи електричних мереж.

1. Системи охолодження з циркуляцією рідини забезпечують можливість використання різних типів охолоджуючих рідин і дозволяють підтримувати оптимальний тепловий режим для кабелів. Проте вони мають обмежену ефективність тепловідведення.

2. Поглиблені та іммерсійні системи охолодження демонструють високу ефективність відведення тепла і є перспективними для застосування у високонавантажених електромережах. Однак їх використання обмежене через специфічні вимоги до умов експлуатації, що ускладнює їх застосування в побутових умовах.

3. Найбільш ефективною виявилася система з розміщенням струмопровідних жил усередині трубок з охолоджуючою рідиною. Вона поєднує високу ефективність тепловідведення з технологічною доступністю, хоча потребує використання діелектричної рідини та складної системи подачі рідини до кабелю.

4. Аналіз діелектричних рідин показав, що для ефективного відведення тепла можуть використовуватися як силіконові, так і фторовмісні рідини. Проте вибір конкретного типу рідини залежить від вимог системи охолодження, фінансових обмежень та екологічних факторів.

Дослідження підтверджує, що використання рідинних систем охолодження є перспективною стратегією для підвищення надійності і безпечності кабельних мереж у високонавантажених умовах. Подальша робота у цій сфері може бути спрямована на розробку нових конструкцій систем охолодження з поліпшеними матеріалами та більш

ефективними рідинами, що дозволить забезпечити тривалу і безпечну експлуатацію електричних мереж.

Список використаних джерел.

1. Jiang, J., Wang, Y., Yang, J., Zhang, J., & Liu, C. (2017). A review on silicone rubber dielectric elastomers. *Polymer Reviews*, 57(1), 68-107.
2. 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.
3. Pandey, A., Anand, S., & Saroha, S. (2018). Liquid cooling for electronics: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 393-412.
4. Yue Wu, He Yu, Jinhao Zhang, Xixia Xu, Ruoyu Dai, Wenzhi Liu, He Lv, Yiming Xu, Qinfeng Wang, Hongzhou He, Jieqing Zheng, Optimal design of liquid cooling structures for superfast charging cable cores under a high current load, *Case Studies in Thermal Engineeri*