

О.О. Тимофєєва

Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, Сєвєродонецьк, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРНИХ ФАКТОРІВ НА БЕЗПЕКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАГЛИБНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Безпека на виробництві досі залишається актуальною темою для України, а особливо, коли на заміну старим приходять більш ефективні та ресурсозберігаючі технології. У даній статті розглядається побудова математичної моделі теплового поля заглибного електромеханічного перетворювача для встановлення впливу температур на безпеку та безаварійність при його експлуатації.

Ключові слова: безпека, теплове поле, моделювання, заглибний електромеханічний перетворювач.

Постановка проблеми

Новітні технології у техніці спонукають до розвитку інші суміжні галузі, серед яких безпека та охорона праці. Найважливішим елементом подальшого розвитку об'єктів економіки країни є створення сприятливих умов для безперервного підвищення ефективності трудового процесу. Ефективність трудового процесу визначається сукупністю факторів виробничого середовища, які впливають на здоров'я і працездатність людей, що займаються трудовою діяльністю.

Заглибний електромеханічний перетворювач відноситься до нового класу поліфункціональних електромеханічних пристроїв (ПЕМП), при створенні яких виникає комплекс теоретичних і практичних проблем, пов'язаних із безпекою праці. Необхідно проаналізувати шкідливі й небезпечні фактори та ризики, що мають вплив на обслуговуючий персонал під час експлуатації ПЕМП. Одним із небезпечних факторів у заглибних ПЕМП слід вважати робочі температури обмотки, корпусу та навантажувального середовища, останнє, зазвичай, має високі пожежонебезпечні властивості. Перевищення граничнодопустимих температур у такому середовищі може призвести до аварійного стану, що несе небезпеку для здоров'я та життя технічного персоналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існує багато досліджень щодо технічних характеристик ПЕМП, основні з яких авторів М.М. Заблюдського, В.Є. Плюгіна, В.Ю. Грицюка та ін. [1–5]. Нечисленні питання з безпеки ПЕМП представлені у роботах [6–8]. Тож дослідження безпечності ПЕМП, визначення та аналіз шкідливих та небезпечних факторів під час їх експлуатації, актуальні.

Метою роботи виступає дослідження впливу температурних факторів на безпеку при експлуатації заглибного ПЕМП шляхом моделювання теплового поля.

Виклад основного матеріалу

Заглибний електромеханічний перетворювач спрямований на забезпечення реалізації основних операцій технологічних процесів, що здійснюються над в'язкою субстанцією різної природи (нафтопродукти, біомаса, різноманітні сипкі матеріали при різній вологості тощо) і з різними цілями (завантаження і вивантаження цистерн і бункерів, транспортування в межах технологічного простору тощо) [3]. Основний перелік технологічних операцій із застосуванням заглибних ПЕМП зображено на рис. 1.



Рис. 1. Технологічні процеси при застосуванні заглибних електромеханічних перетворювачів

У даній статті розглядається побудова математичної моделі теплового поля заглибного ПЕМП для встановлення впливу температур на безпеку та безаварійність при його

експлуатації. Для побудови означеної моделі запропоновано застосування концепції ступінчастості, відповідно до якої в процесі формування базових рівнянь та їх розв'язку послідовно враховується взаємний вплив електромагнітних і теплових процесів, що відбуваються в аналізованій структурі.

Конструктивна особливість структури розгляданого ПЕМП полягає у суміщенні приводу з виконавчим механізмом. При цьому в якості приводу застосовується структура, яка за своєю суттю є силовою обертовою асинхронною електричною машиною з порожнистим ротором.

Вказана властивість розгляданого обладнання дозволяє суттєво покращити його показники у порівнянні з аналогічним за призначенням обладнанням, яке побудоване за роздільною схемою, де привід і виконавчий механізм розділені.

Високої ефективності ПЕМП, побудованого за суміщеною схемою, можна досягти за умови застосування у його структурі обмоток кільцевого типу [9]. При цьому лобові фрагменти таких обмоток не тільки створюють умови для формування електромагнітного моменту, але й є додатковими джерелами теплової енергії, які розміщуються у торцевій зоні перетворювача.

На рис. 2 наведено схематичне зображення активної частини заглибного ПЕМП при застосуванні кільцевої обмотки статора.

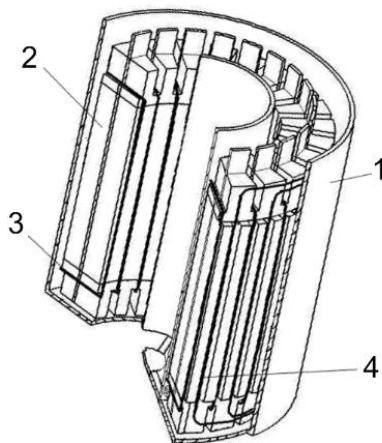


Рис. 2. Активна частина структури заглибного ПЕМП із кільцевою статорною обмоткою:

- 1 – ротор; 2 – статор;
- 3 – кільцева обмотка; 4 – зовнішня обмотка

Як видно з рис. 2 у структурі розгляданого ПЕМП використовується порожнистий ротор (1), який виконаний суцільним з феромагнітного матеріалу. Ротор має коаксіальну форму.

На статорі (2) розміщені дві обмотки: кільцева (3) та зовнішня (4).

За такої схеми побудови ПЕМП, його ротор виявляється пристосований до одночасної реалізації декількох функцій, а саме

- функції ротора асинхронного двигуна;
- функції нагрівача в'язкої субстанції, яка в процесі функціонування стикається із зовнішньою поверхнею ротора;
- функції складової приводу (тобто функції виконавчого механізму);
- функції захисного корпусу (гільзи герметизації), що перешкоджає проникненню в'язкої субстанції до обмоток.

Характерною особливістю побудованого за суміщеною схемою ПЕМП є те, що в'язка субстанція, яка піддається обробленню виконує дві функції, а саме

- механічне навантаження ротора за рахунок сил тертя, які неминуче виникатимуть в місцях стикання ротора з в'язкою субстанцією (власне з робочою речовиною);

- охолодження елементів структури, тобто являє собою охолоджуючу рідину, адже у процесі функціонування ПЕМП в'язка субстанція (робоча речовина) омиватиме ротор, відбираючи визначену частку «генерованої» ним теплової енергії.

Інформація щодо вказаних характеристик може бути отримана за результатами математичного моделювання структури активної частини даного виду електроенергетичного обладнання. При цьому слід враховувати, що у розгляданому ПЕМП, побудованому за суміщеною схемою, існує тісний (органічний) зв'язок між електромагнітним і тепловим полями. Саме означений зв'язок і забезпечує переваги даного обладнання у порівнянні з обладнанням, побудованим за роздільною схемою. Отримана математична модель надає змогу детальніше розглянути теплове поле, як джерело виникнення небезпечних факторів, серед яких, наприклад, перегрів ізоляції, а у зв'язку із цим, її прискорене руйнування, що може призвести до короткого замикання. З огляду на те, що робоче середовище у заглибному ПЕМП може бути легкозаймистим, коротке замикання може призвести до вибуху.

Загальний алгоритм побудови математичної моделі заглибного ПЕМП складається з наступних кроків:

- визначаємо характеристики електромагнітного поля (вирішуємо відповідну крайову задачу відносно векторного магнітного потенціалу);
- визначаємо повне поточкозчеплення обмотки статора;
- визначаємо питомі втрати в кожній точці поверхні ротора, які, власне, й стають у подальших розрахунках джерелами теплоти;

- визначаємо характеристики теплового поля (вирішуємо відповідну крайову задачу відносно температури на поверхні ротора).

Для вирішення крайових задач відносно векторного потенціалу і температури на поверхні ротора застосовуватимемо метод кінцевих елементів [10].

Наведене рішення зокрема обумовлено тим, що:

- аналізована структура розміщена в обмеженому, відповідними межами, просторі;

- конфігурація меж розділу середовищ із різними електрофізичними властивостями достатньо складна;

- існує нагальна потреба врахування нелінійних ефектів, що проявляються у матеріалах аналізованої структури внаслідок їх нагрівання.

Зазначимо, що робоча область досліджуваного ПЕМП, яка утворена коаксіальним ротором, має осесиметричну форму, а отже аналіз заданої структури можна проводити у двовимірному просторі.

Відносно векторного магнітного потенціалу диференціальне рівняння, яким описується розподілення електромагнітного поля, в узагальненому вигляді можна представити як

$$\frac{1}{\mu} \Delta \mathbf{A} - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \gamma (\mathbf{v} \times \text{rot} \mathbf{A}) = -\mathbf{J}_{\text{стор}}, \quad (1)$$

де μ – магнітна проникність матеріалів відповідних фрагментів аналізованої структури, розміщених в просторі аналізу;

γ – електропровідність матеріалів фрагментів аналізованої структури, розміщених в просторі аналізу;

$\mathbf{J}_{\text{стор}}$ – вектор густини сторонніх струмів, розподілених на фрагментах аналізованої структури (у даному випадку як сторонні виступають вихрові струми, що наводяться у роторі);

\mathbf{v} – вектор швидкості руху фрагменту (електропровідного) аналізованої структури по відношенню до джерела магнітного поля.

Для визначення густини індукованого в роторі аналізованого ПЕМП вихрового струму $\mathbf{J}_{\text{стор}}$ скористаємось першим рівнянням системи Максвелла та осесиметричним характером досліджуваної структури.

Матимемо

$$J_z = \text{rot}_z \mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right), \quad (2)$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля в розрахунковій області;

B_x, B_y – проекції вектора магнітної індукції на осі x та y відповідно.

Для визначення питомих втрат індукованого вихрового струму у кожній точці ротора необхідно враховувати температурну варіативність у вказаній точці електропровідності матеріалу, з якого цей ротор виготовлений. У цьому, серед іншого, проявлятиметься взаємний нерозривний зв'язок електромагнітних і теплових явищ, які супроводжують функціонування заглибного ПЕМП та впливають на формування його функціональних характеристик і відповідних показників.

З урахуванням наведеного шукана величина питомих втрат може бути подана як

$$Q = \frac{J_z^2}{\gamma(T)}, \quad (3)$$

де $\gamma(T)$ – функція залежності від температури електропровідності матеріалу ротора.

Функціональну залежність $\gamma(T)$, як було прийнято вище, представимо лінійною функцією

$$\gamma(T) = \gamma_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0)), \quad (4)$$

де γ_0 – електропровідність у відповідній точці ротора не працюючого ПЕМП (тобто «холодного» ротора);

T_0 – температура навколишнього середовища;

T – температура ротора у відповідній точці його поверхні в процесі функціонування ПЕМП;

α – деякий температурний коефіцієнт, що може бути встановлений, наприклад, емпіричним шляхом.

Зазначимо, що визначені на підставі (3), (4) питомі втрати вихрових струмів за своєю суттю є розміщеними в просторі аналізованої структури джерелами теплової енергії. Це дає змогу перейти до визначення характеристик теплового поля (температурного портрету), притаманного аналізованій структурі.

Відповідне диференціальне рівняння має вигляд

$$\lambda \cdot \Delta T - c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q, \quad (5)$$

де λ – теплопровідність матеріалу ротора;

c – теплоємність матеріалу ротора;

ρ – густина матеріалу ротора;

Q – джерело теплової енергії у структурі – питомі теплові втрати, пов'язані з розподіленням індукованого у роторі вихрового струму (обчислюються згідно (3), (4)).

Зважаючи на двовимірний (осесиметричний) характер аналізованої структури, рівняння (5) можна переписати у вигляді

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - c_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q. \quad (6)$$

Граничні умови, які є необхідним елементом для визначення структури і характеристик теплового поля на підставі (6), можна встановити аналізуючи особливості охолодження ротора досліджуваного ПЕМП під час його функціонування.

Механізм передачі тепла від ротора до в'язкої субстанції, яка в даній схемі є навантажувально-охолоджуючим середовищем, залежить від параметрів (зокрема в'язкості) цієї субстанції. При малій в'язкості субстанції основний вклад у вказаний процес передачі тепла вноситься конвекція. Однак при високій в'язкості субстанції (яка зазвичай характерна для початкових етапів роботи ПЕМП, особливо при низькій температурі навколишнього середовища) суттєвий вклад до вказаного процесу вноситься і кондукція. Крім означеного, враховані ефекти теплопередачі (кондуктивного типу) крізь товщу ротора.

Наявність кондуктивного теплообміну в активній частині аналізованого ПЕМП (який може характеризуватися високою ефективністю) дозволяє сформулювати відповідні граничні умови. При цьому без втрати цінності математичної моделі для інженерної практики можна прийняти припущення щодо передачі в'язкої субстанції усього виділеного, у матеріалі ротора за рахунок вихрових струмів, тепла у вигляді відповідного теплового потоку, який проходить крізь поверхню циліндрів суцільного феромагнітного коаксіального ротора.

У процесі реалізації обчислювальних процедур були враховані залежності характеристик матеріалів, що знаходяться в активній зоні аналізованої структури, від різних факторів.

Зокрема були враховані

- температурна залежність електропровідності матеріалу ротора (феромагнетик, зазвичай сталь);
- температурна залежність електропровідності матеріалу обмоток (міди);
- залежність магнітної проникності матеріалів ротора і статора від величини магнітної індукції;
- температурна залежність коефіцієнту теплопровідності матеріалу ротора;
- температурна залежність показників (параметрів) навантажувально-охолоджуючого середовища (в'язкої субстанції).

Зважаючи на симетрію активної зони досліджуваного ПЕМП, геометрія структури, яка піддавалася математичному моделюванню, була обмежена і представляла собою чверть поперечного перерізу реальної активної зони, яка відображалася правильним восьмикутником.

На рис. 3–4 представлено картину теплового поля поля заглибного ПЕМП та розподіл температури вздовж радіальної лінії активної частини заглибного ПЕМП відповідно, що свідчить про досягнення високої інтенсивності тепловиділення в активній області.

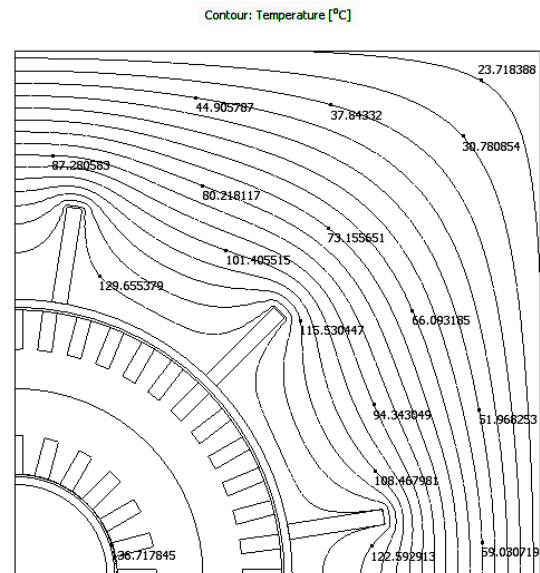


Рис. 3. Картина теплового поля заглибного ПЕМП

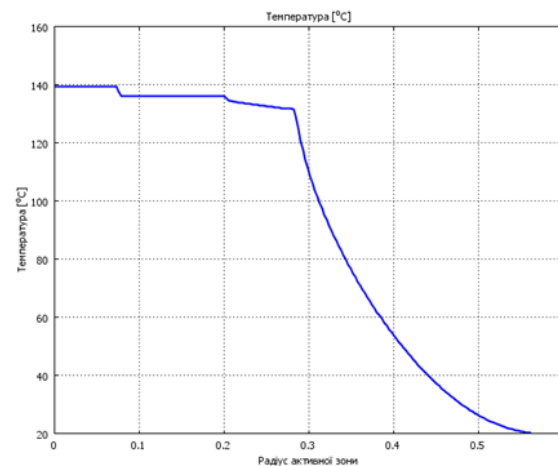


Рис. 4. Розподіл температури вздовж радіальної лінії активної частини заглибного ПЕМП

Висновки

З наведених матеріалів видно, що головними джерелами тепла, обумовленого індуктованими струмами, є обидва циліндри ротора. Температура на поверхні цих циліндрів у режимі стоянки під струмом досягає 135 °С, що забезпечує швидке нагрівання в'язкої субстанції, високі показники процесу її перекачування, а отже і відсутність такої серйозної причини виникнення аварійної ситуації, як заштібовування.

У якості навантажувально-охолоджувального середовища було використано бітум марки БНД 200/300. Температура спалаху даної марки бітуму становить 220 °С і характеризує ступінь вогнебезпечності бітуму при його розігріванні. Гранично допустимої температури бітум у результаті нагрівання за допомогою ПЕМП не досягає, що створює безпечний температурний коридор у технологічному ланцюзі при його переробці. Температура зовнішньої поверхні заглибного ПЕМП, з якою може контактувати обслуговуючий персонал, не перевищує 20 °С (рис. 3), що є цілком безпечним і не несе загрози здоров'ю чи життю працівників. Також, отримані значення температур входять у допустимі межі класу нагрівостійкості електроізоляційного матеріалу обмотки (Н – 180 °С), що також сприяє безпечній експлуатації ПЕМП.

Предметом подальших досліджень безпеки ПЕМП можуть бути напружено-деформований стан, вібрації, поверхнево-розподілені структури тощо.

Література

1. Заглибний електротепломеханічний перетворювач. Патент на корисну модель 95853 Україна, МПК Н 05 В 6/10. – Заявл. 10.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1.
2. Заблодский Н.Н. и др. Полифункциональные электромеханические преобразователи энергии технологического назначения // *Электротехника*. – 2016. – №. 3. – С. 24–29.
3. Математичне моделювання електротермомеханічного обладнання обробки в'язких і сипких речовин : монографія : у 2 кн. / М.М. Заблодський, Г.О. Мірських, В.Ю. Грицюк. – Київ : Ямчинський О. В. [вид.], 2019. Кн. 2. – 2019. – 270 с.
4. Zablodskiy M. et al. Analysis of 3D eddy current distribution in a hollow rotor of an electromechanical converter // *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. – IEEE, 2020. – С. 561–564.
5. Zablodskiy M., Pliuhin V., Chuenko R. Simulation of induction machines with common solid rotor // *Технічна електродинаміка*. – 2018. – №. 6. – С. 42–45.
6. Заблодский Н.Н. Научно-технические основы создания полифункциональных электромеханических преобразователей технологического назначения [Рукопис] : дис. ... д-ра техн. наук : 05. 09. 01 / Н.Н. Заблодский ; конс. В.Ф. Шинкаренко ; ДонГТУ. - Алчевск : ДГТУ, 2007. – 479 с.
7. Иванов С.Н. Электротехнические перекачивающие устройства на основе электромеханических теплогенерирующих преобразователей : диссертация доктора техн. наук : 05.09.03 / С.Н. Иванов. – С-Пб, 2010. – 367 с.
8. Заблодский Н.Н., В.Е.Плюгин, Т.П.Заблодская. Обеспечение безопасных свойств погруженных электромеханических нагревателей // *Вестник МАНЭБ*, 1999. - № 10 (22). – С. 76–77.

9. Olga V. Tikhonova, Anatolij T. Plastun, "Electromagnetic calculation of induction motor by "ANSYS Maxwell"", *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2018 IEEE Conference of Russian*, pp. 822–826, 2018.
10. Silberman Z. J. Novel Methods to Determine and Use the Magnetic Vector Potential in Numerical General Relativistic Magnetohydrodynamics. – 2018.

References

1. Zablodskiy M. et al. (2015). Submersible electromechanical converter. Patent 95853. Ukraine.
2. Zablodskiy, N., Plyugin, V., Gritsyuk, V. & Grin, G. (2016). Polyfunctional electromechanical energy converters for technological purposes. *Electrical Engineering*, (3), 24–29.
3. Zablodskiy, M., Mirsky, G., Hrytsiuk, V. (2019) Mathematical modeling of electrothermomechanical equipment for processing viscous and bulk substances. Kyiv: Yamchynsky O.V.
4. Zablodskiy, M., Gritsyuk, V., Rudnev, Y., Brozhko, R., & Tymofieieva, O. (2020, April). Analysis of 3D eddy current distribution in a hollow rotor of an electromechanical converter. In *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 561–564). IEEE.
5. Zablodskiy, M., Pliuhin, V., & Chuenko, R. (2018). Simulation of induction machines with common solid rotor. *Tekhnichna elektrodynamika*, (6), 42–45.
6. Zablodskiy, M. (2007). Scientific and technical bases of polyfunctional electromechanical converters for technological purpose creation (Doctor's thesis). Donbas State Technical University, Alchevs'k.
7. Ivanov S. (2010). Electrical pumping devices based on electromechanical heat-generating converters. (Doctor's thesis). Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg.
8. Zablodskiy, M., Pliuhin, V., & Zablodskaya, T. (1999). Ensuring the safe properties of submersible electromechanical heaters. *Vestnik MANEB*, 10 (22), 76–77.
9. Tikhonova, O. V., & Plastun, A. T. (2018, March). Electromagnetic calculation of induction motor by "ANSYS Maxwell". In *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)* (pp. 822–826). IEEE.
10. Silberman, Z. J. (2018). Novel Methods to Determine and Use the Magnetic Vector Potential in Numerical General Relativistic Magnetohydrodynamics.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Антощенко, Східноукраїнський національний університет імені В. Даля, Україна.

Автор: ТИМОФЄЄВА Ольга Олександрівна аспірант

Східноукраїнський національний університет імені В. Даля

E-mail – o.a.tymofieieva@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6302-4427>

**INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE FACTORS INFLUENCE ON OPERATING SAFETY
THE SUBMERSIBLE ELECTROMECHANICAL CONVERTER**

O. Tymofieieva

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine

The article presents a mathematical model of the thermal field for determining the values of temperatures during the submersible electromechanical converter operation. The influence of obtained temperature values on the safety and reliability of the submersible electromechanical converter is analyzed.

In a submersible electromechanical converter the windings temperature has great importance. On the one hand, the windings temperature must be such as to transfer a sufficient amount of heat to the viscous loading environment for its processing (movement, transportation, etc.) to begin. On the other hand, the windings temperature must not exceed the limit values for the corresponding insulation class, since this can cause an emergency (fire, short circuit, etc.)

The obtained results shows, that temperature on the surface of rotor's cylinders reaches 135 ° C, which provides rapid heating of a viscous substance, and therefore high performance of the pumping process.

In this work, the bitumen BND 200/300 was used as the loading and cooling environment. The flash point of this brand of bitumen is 220 ° C and characterizes the degree of flammability of bitumen when it heated. Bitumen does not reach the maximum allowable temperature as a result of heating by means of submersible electromechanical converter that creates a safe temperature corridor in a technological chain at its processing. The temperature of the outer surface of the submersible electromechanical converter, with which the service technical staff may have a contact, does not exceed 20 ° C (Fig. 3), which is completely safe and does not endanger the workers health or life. Also, the obtained temperatures values are within the permissible limits of the heat resistance class of a winding electrical insulating material (H - 180 ° C), which also contributes to the safe submersible electromechanical converter operation.

Keywords: *safety, thermal field, modeling, submersible electromechanical converter.*