

В.І. Міліх, В.П. Шайда, О.Ю. Юр'єва

Аналіз теплового стану індуктора електромагнітного млина з охолодженням оливою у стаціонарних режимах роботи

Проблема. Досліджується електромагнітний млин (ЕММ) для технологічної обробки різних речовин, який виконано на базі статора трифазного асинхронного двигуна. Обмотка статора має підвищену густину струму, тому для млина передбачена система примусового охолодження трансформаторною оливою. Наразі робіт з розрахунку теплового стану ЕММ з наданою конструкцією і охолодженням оливою не представлено. Тому дослідження теплового стану таких ЕММ є актуальним, бо сприятиме підвищенню надійності та ефективності їх роботи. **Метою** статті є формування математичної моделі теплового стану індуктора електромагнітного млина та аналіз його нагріву у стаціонарних режимах роботи з охолодженням трансформаторною оливою. **Задача** розрахунку теплового стану, а саме – розподілу температури в основних частинах індуктора електромагнітного млина, розв'язується методом еквівалентних теплових схем. Конструкція ЕММ надана у достатньо повному обсязі і на цій основі сформована відповідна еквівалентна теплова схема заміщення, яка доповнена еквівалентною гідравлічною схемою шляхів проходження оливи. Надано пояснення щодо складання та розв'язання алгебраїчної системи рівнянь, які описують розподіл температур по складовим елементам індуктора ЕММ. **Результати** теплового розрахунку індуктора ЕММ показали, що максимальна температура нагріву значно менша за допустиму для обраного класу нагрівостійкості ізоляції. За гідравлічною схемою індуктора визначено необхідні витрати оливи, її середню швидкість і відповідний тиск на вході у впускний патрубок, які знаходяться на допустимому рівні. Зазначено, що досить помірного температурного стану індуктора і гідравлічним параметрам тракту оливи сприяють такі нововведення в конструкцію ЕММ, як двошарова скорочена петльова обмотка статора і аксіальні вентиляційні канали в осерді статора. Натепер були представлені теплові еквівалентні схеми ЕММ лише з повітряним охолодженням. Тому розроблена теплова схема індуктора з охолодженням оливою є новою і дає можливість оцінки режимів роботи ЕММ. Бібл. 34, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: електромагнітний млин, примусове охолодження індуктора оливою, аналіз теплового стану млину, метод еквівалентних теплових схем, аналіз гідравлічних параметрів.

Вступ. Апарати з вихровим шаром феромагнітних елементів або, скорочено, апарати вихрового шару (АВШ), англійською vortex layer device (apparatus), доволі відомі та знаходять застосування в різних галузях промисловості, сільському та комунальному господарстві [1-5].

Незважаючи на доволі значну кількість АВШ, виготовлених до кінця минулого століття, їх впровадження у промислове виробництво стримувалося низкою причин. Серед них – відсутність чіткої методики проектування АВШ [6, 7] та необхідність врахування призначення конкретного апарату, що змушувало проектувати кожний апарат окремо. Істотною перешкодою є циклічний режим роботи устаткування, що потребує автоматизації процесу подачі та вивантаження сировини, що оброблюється [3].

В останні два десятиріччя напрямок розробки та впровадження АВШ отримав потужний стимул через актуальність світових тенденцій розвитку виробництва. По-перше, підвищення вартості енергоносіїв, а впровадження АВШ замість традиційних млинів дозволяє зменшити витрати електроенергії [2, 6].

По-друге, конкуренція серед світових виробників призвела до вимоги підвищення якості продуктів виробництва та ефективності існуючих технологічних процесів. Тут також у нагоді стали АВШ [5, 8-11].

По-третє, вимоги до захисту навколишнього середовища у виробництві і побуті. Застосування АВШ для обробки стічних вод з органічним або промисловим забрудненням дозволяє суттєво підвищити якість очищення та зменшити його вартість.

У теперішній час найпоширенішими є АВШ для подрібнення речовин, які через своє призначення отримали назву електромагнітних млинів (ЕММ), один з варіантів яких розглядається і у даній роботі.

Існують декілька великих компаній, що виготовляють АВШ різного призначення, і малих підприємств, що спеціалізуються на АВШ тільки одного призначення. Прикладом великих підприємств є відома компанія

«Globecore» (Німеччина), один із філіалів якої розміщено у м. Полтава. Найбільш поширеним виробом цієї компанії є ЕММ типу AVS-100 [12]. Також відомий ЕММ для подрібнення мідної руди [13], створений Project SYSMEL, який має автоматизовану систему завантаження/розвантаження та систему охолодження.

Залежно від призначення ЕММ, виникають особливості функціонування таких апаратів, їх побудови і методики проектування. Тому дослідження ЕММ, з урахування специфіки їх застосування, є актуальним питанням.

Аналіз попередніх досліджень. Робота [1], присвячена теорії функціонування та будови АВШ, і досі вважається базовою для їх проектування [4, 5].

Наразі існують декілька десятків наукових колективів у різних країнах світу, що проводять дослідження ЕММ, галузі застосування яких відрізняються. Фактично більшість цих наукових груп проходять однакові етапи дослідження ЕММ, починаючи з його проектування, виготовлення зразка і завершуючи поліпшенням його параметрів. Доволі показовою, у цьому сенсі, є група польських вчених, які займаються дослідженням ЕММ для подрібнення мідної руди [10]. У своїх публікаціях [3, 6, 13-15] за останнє десятиріччя вони презентували результати досліджень ЕММ, починаючи від розробки конструкції млина, системи завантаження/вивантаження, системи контролю якості обробки сировини і системи керування роботою установок.

Основною частиною ЕММ є індуктор, що живиться від трифазної мережі змінного струму та створює обертове магнітне поле [4, 7]. Під дією цього магнітного поля феромагнітні елементи, що розташовані у робочій камері, здійснюють хаотичний рух [1, 2, 7]. Індуктор разом з робочою камерою і жорновими (феромагнітними) елементами є активними частинами, що забезпечують процес обробки. Будова цих частин безпосередньо впливає на ефективність роботи

ЕММ [3, 7], тому дослідженню їх впливу присвячено найбільшу кількість робіт.

Натепер виробники ЕММ використовують два варіанти конструктивного виконання індуктора: перший варіант, традиційний, з явноозначеними полюсами [3]; другий – з неявноозначеними полюсами на базі статора асинхронного двигуна [16].

Незважаючи на різні побудови індуктора, більшість з них виготовляється двополюсними ($2p = 2$) з частотою обертання магнітного поля 3000 об/хв. З самого початку [1] і надалі вважається, що для забезпечення рівномірності руху жорнових елементів оптимальним є однорідне магнітне поле в робочій камері. Цьому сприяє синусоїдний розподіл магніторушійної сили (МРС) за розточенням осердя статора. Достатньо близько це забезпечує неявнополюсна структура з трифазною обмоткою, як в асинхронних двигунах, що прийнято у низці розробок. Приклад такої розробки показано у [17], де виконано теоретично-експериментальне дослідження індуктора – запозиченого статора звичайного асинхронного двигуна.

У [1] наведено аналітичну методику визначення розмірів та параметрів індуктора ЕММ, але вона не забезпечує необхідної точності розрахунків через прийняті спрощення [6, 7]. В [4, 7] проблема достатньо точного визначення магнітного поля і електромагнітних параметрів індуктора ЕММ вирішується їх розрахунками чисельними методами з застосуванням сучасних програмних комплексів.

У [4] виконувався чисельно-польовий аналіз індуктора ЕММ з використанням програми FEMM. Отримані розрахункові взаємозалежності електромагнітних величин і відповідних характеристик індуктора ЕММ. Але це зроблено при допущенні, що феромагнітні елементи розміщені у робочій камері рівномірно, як це вимушено робилось ще у [1].

Насправді жорнові елементи у робочій камері рухаються хаотично, бо вони постійно зіштовхуються один з одним та внутрішньою поверхнею робочої камери. Розробкою математичної моделі траєкторії руху жорнових елементів у робочій камері ЕММ займалися у [7, 18], де встановлено, що складний характер залежності електромагнітної сили, що діє на жорнові елементи від різних факторів, виключає можливість отримання аналітичного рішення.

Значна частка робіт [4, 6-8] присвячена визначенню кількості та оптимального співвідношення розмірів жорнових елементів, а також коефіцієнта заповнення робочої камери. Дослідження впливу розмірів робочої камери на ефективність подрібнення сировини зроблено у [6].

Ще одним напрямком досліджень ЕММ є оцінка впливу режиму роботи індуктора та її контролю [4, 6, 7, 19] та часу обробки сировини на параметри якості її обробки [9, 14, 20, 21]. Дослідження ефективності ЕММ проводилися у [7, 9, 10].

Для забезпечення ефективного процесу подрібнення індуктор ЕММ повинен створити у робочій камері магнітне поле з доволі високими параметрами. Приміром, у [9] вказано, що середнє значення магнітної індукції у робочій камері дослідного зразка ЕММ становить 0,153 Тл, а в [4] розглядається значення 0,2 Тл. Щоб забезпечити такі параметри магнітного

поля в робочій камері, у обмотці індуктора повинно бути високе значення густини струму. Відповідно для відведення тепла необхідно створити ефективне охолодження індуктора [6, 7].

На практиці застосовують три види охолодження: повітряне, оливне та водяне.

У ЕММ для подрібнення мідної руди [3, 9] індуктор охолоджується повітрям за допомогою вентиляторів. У [16] також досліджується ЕММ з традиційним повітряним охолодженням, притаманним для статора асинхронного двигуна.

Але найрозповсюдженим є охолодження оливою, її використовує у своїх ЕММ як компанія «Globecore», так і значна кількість малих виробників [4, 7, 10].

Питанням охолодження індуктора приділялася дещо менша увага у порівнянні з іншими дослідженнями, що пояснюється циклічністю роботи значної кількості ЕММ. Тобто завдяки короткочасному режиму його роботи, він встигав охолонути.

Дослідження теплового стану ЕММ, створеного на базі статора асинхронного двигуна, з повітряним охолодженням виконано у [16, 22].

У [22] порівнювалися результати розрахунку розподілу температури, отримані методом еквівалентних теплових схем, з експериментальними даними, отриманими раніш при термографії ЕММ [23].

Але в цілому, на жаль, робіт, пов'язаних з дослідженням теплового стану ЕММ, що охолоджуються оливою, наразі не представлено. Це може бути пов'язано як із підвищенням складності теплових розрахунків, у порівнянні з ЕММ, що охолоджуються повітрям, так і значними витратами часу. Також нема чіткого критерію вибору способу охолодження для ЕММ, що дозволив би проектувальнику чітко визначитися при його розробці.

На відміну від ЕММ, методики теплового аналізу електричних машин добре розроблені, а вибір системи охолодження структурований [24]. Також досить інтенсивно досліджуються та застосовуються системи водяного охолодження електричних машин для автомобілів, по типу водяної «сорочки» [25].

Тому можна вважати, що завдання дослідження теплового стану ЕММ, що має примусове охолодження оливою, є актуальним, бо дозволить підвищити надійність та ефективність роботи ЕММ.

Для такого дослідження вже є перспективна удосконалена конструкція ЕММ на базі статора трифазного асинхронного двигуна, яку було сформовано в процесі еволюції розробок і надано в роботах [19, 26].

Метою статті є формування математичної моделі теплового стану індуктора електромагнітного мли-на та аналіз його нагріву у стаціонарних режимах роботи з охолодженням трансформаторною оливою.

Об'єкт дослідження. Електромагнітна система удосконаленого ЕММ, що надана у [19, 26], тут зображена на рис. 1. Індуктор живиться від трифазної мережі з фазною напругою 100 В та частотою 50 Гц.

Вихідним параметром на проектування є магнітна індукція 0,12 Тл у центрі пустої робочої камери. Такий стан ЕММ вважається ідеальним неробочим ходом. У інших режимах, які надано в [19] і розглядаються далі в статті, камера містить феромагнітні елементи, і коефіцієнт її заповнення ними вважався таким, що дорівнює 0,1.

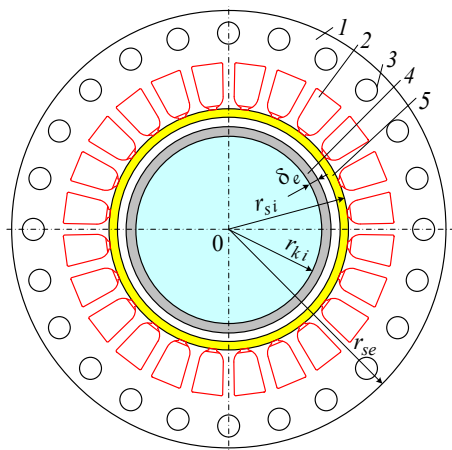


Рис. 1. Електромагнітна система індуктора обертового магнітного поля: 1 – шихтоване осердя статора; 2 – трифазна обмотка; 3 – вентиляційні канали; 4 – оболонка робочої камери товщиною $\delta_e=5$ мм; 5 – ізоляційна труба

Електромагнітний розрахунок індуктора виконано за аналогією з методиками, наданими у [4, 19, 26].

З міркувань технологічного процесу задані радіус внутрішньої поверхні камери $r_{ki} = 0,047$ м і аксіальна довжина осердя статора $l_a = 0,25$ м. Розрахунком встановлені радіуси розточчення осердя $r_{si} = 0,06$ м і зовнішньої його поверхні $r_{se} = 0,109$ м.

Ізоляційна труба 5 (рис. 1) виконана з пластика, а через повітряний проміжок у 4 мм від неї розташована оболонка робочої камери 4 з нержавіючої сталі. Ця труба утримує та ізолює обмотку індуктора в пазах, а також заважає потраплянню оливи у проміжок. Ще труба разом з повітряним проміжком віддаляють робочу камеру від зони зубців осердя статора з нерівномірним розподілом магнітного поля, що сприяє рівномірному розподілу феромагнітних елементів в камері.

У тепловому сенсі ізоляційна труба та повітряний проміжок практично виключають теплопередачу між оливою та робочою камерою, тому цей шлях в тепловому розрахунку індуктора не враховується.

Для удосконалення експлуатаційних властивостей індуктора зроблено два ще досі не випробувані кроки. Замість звичайної концентричної діаметральної обмотки статора введена петльова укорочена обмотка, що дозволяє виключити несиметрію фазних обмоток та забезпечити підвищення однорідності магнітного поля в робочій камері індуктора – це показано в [26]. Окрім того, в осерді статора передбачені аксіальні вентиляційні канали, що спрямовано на покращення охолодження електромагнітної системи індуктора. Цьому ж одночасно сприяє більш «розріджена» структура більш тонких лобових частин петльової обмотки статора, що збільшує поверхню їхнього охолодження.

Отже, таким чином і виникла задача оцінки теплового стану індуктора ЕММ і здатності забезпечити його прийнятний рівень охолодженням трансформаторною оливою.

Для повноти сприйняття роботи ЕММ і пояснення його електромагнітної складової, на рис. 2 надана структура індуктора за [19, 26], який власне і забезпечує роботу млина, хоча це і не є основною темою статті. Тут показані миттєвий розподіл струмів в трифазній обмотці, відповідний напрямок дії її МРС F_s і картина двовимірного магнітного поля у робочому режимі з присутністю феромагнітних елементів.

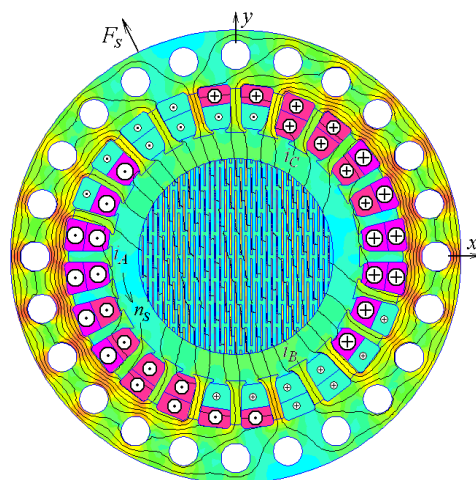


Рис. 2. Магнітне поле в поперечному перерізі індуктора при номінальному навантаженні

Для розрахунку магнітного поля використовувалася, як це зазначено в [4, 19], загальновідома програма ФЕММ, побудована на методі скінченних елементів.

Магнітне поле є обертовим, і разом з ним рухаються феромагнітні елементи, забезпечуючи необхідну обробку речовини в робочій камері.

Відомо [4, 19, 26], що для електромагнітних розрахунків індуктора достатньо його електромагнітної системи, яка надана на рис. 2.

Проте, для розрахунку теплового стану індуктора потрібно враховувати всю його тривимірну конструкцію. Будову ЕММ разом із основними розмірами наведено на рис. 3 у його повздовжньому перерізі. Разом з поперечним перерізом на рис. 1 це надає достатньо повне уявлення про всю структуру індуктора.

Методи та результати дослідження. Тепловий розрахунок індуктора ЕММ з примусовим охолодженням потоком трансформаторної оливи має враховувати підігрівання оливи по довжині індуктора. Отже, бажано застосовувати тривимірне моделювання температурного поля, приміром, методом скінченних елементів. Відомо, що для цього розрахункова модель розбивається на окремі елементи у вигляді тетраєдрів. При складній структурі та доволі великих габаритах конструкції індуктора ЕММ, особливо лобових частин його обмотки, кількість елементів моделі має бути дуже великою. Досвід розрахунків навіть двовимірної осесиметричної моделі електричної машини [27] свідчить, що тривалість розрахунку буде надмірною, як і необхідні ресурси комп'ютера.

У такому разі єдиним можливим рішенням для розв'язання сформульованої задачі є застосування методу еквівалентних теплових схем (ЕТС).

Тепловий розрахунок електричних машин методом ЕТС забезпечує достовірність результатів з похибкою до 5-10 % [28, 29]. Він дозволяє врахувати зміну температури в тонкому шарі ізоляції та отримати розподілення температури за довжиною індуктора та у всьому об'ємі ЕММ. Такий метод був застосований для розрахунку теплового стану аналогічного ЕММ, але з відмінностями у конструкції та при повітряному охолодженні [22].

Необхідні довідникові дані для теплового розрахунку отримано з сучасних довідників [30, 31]. Такими даними є коефіцієнти теплопровідності λ міді, електротехнічної сталі марки 2212, повітря, трансформаторної оливи, матеріалів корпусу та торцевих щитів – сталі

Ст35, внутрішньої труби статора – склопластику, пазової ізоляції класу нагрівостійкості В; питомих теплоємності

c і маси ρ ; кінематичні в'язкості ν повітря та трансформаторної оливи; динамічної в'язкості μ останньої.

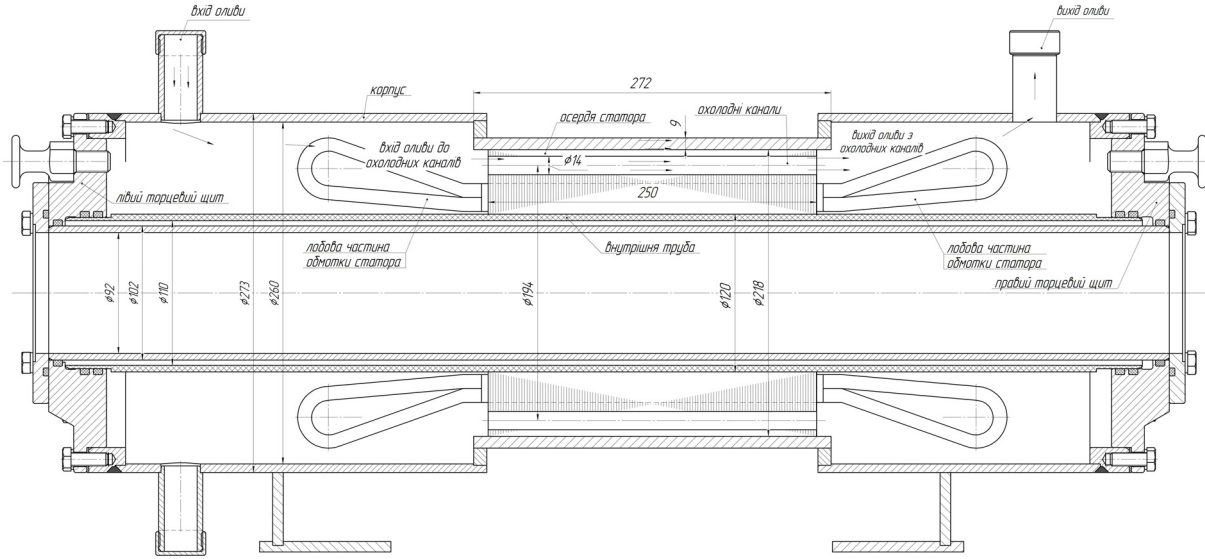


Рис. 3. Схема конструкції ЕММ з основними розмірами індуктора та робочої камери

Тепловий розрахунок індуктора виконувався для температур трансформаторної оливи на його вході $\theta_{oil} = 20^\circ\text{C}$, навколишнього середовища $\theta_{ens} = 20^\circ\text{C}$.

Рух теплового потоку для запропонованої конструкції індуктора (рис. 1 і 3) спрямовується від пазової частини обмотки до її лобових частин та до зубців і спинки осердя індуктора. Це тепло від осердя з додаванням магнітних втрат в ньому передається на корпус, а з торців осердя – до охолодної трансформаторної оливи. Частково тепло від осердя передається до внутрішньої ізоляційної труби (рис. 1), що виготовлена із пластику. Але через неї та повітряний проміжок тепло практично не передається, тому вплив тепла від жорнових елементів в робочій камері не враховується.

Від лобових частин обмотки тепло передається до охолодної оливи, яка надходить з вхідного патрубка, проходить крізь ліву лобову частину обмотки, охолодні канали всередині осердя індуктора, крізь праву лобову частину обмотки та виходить через вихідний патрубок. Тепло від трансформаторної оливи передається на торцеві щити, ділянки корпусу та ізоляційної труби, вільні від осердя. Через те, що трансформаторна олива при проході крізь індуктор підігрівується, тепла система є несиметричною. Тобто бік індуктора на вході трансформаторної оливи є холоднішим за бік на виході.

На підставі схеми руху теплового потоку складено ЕТС індуктора ЕММ (рис. 4).

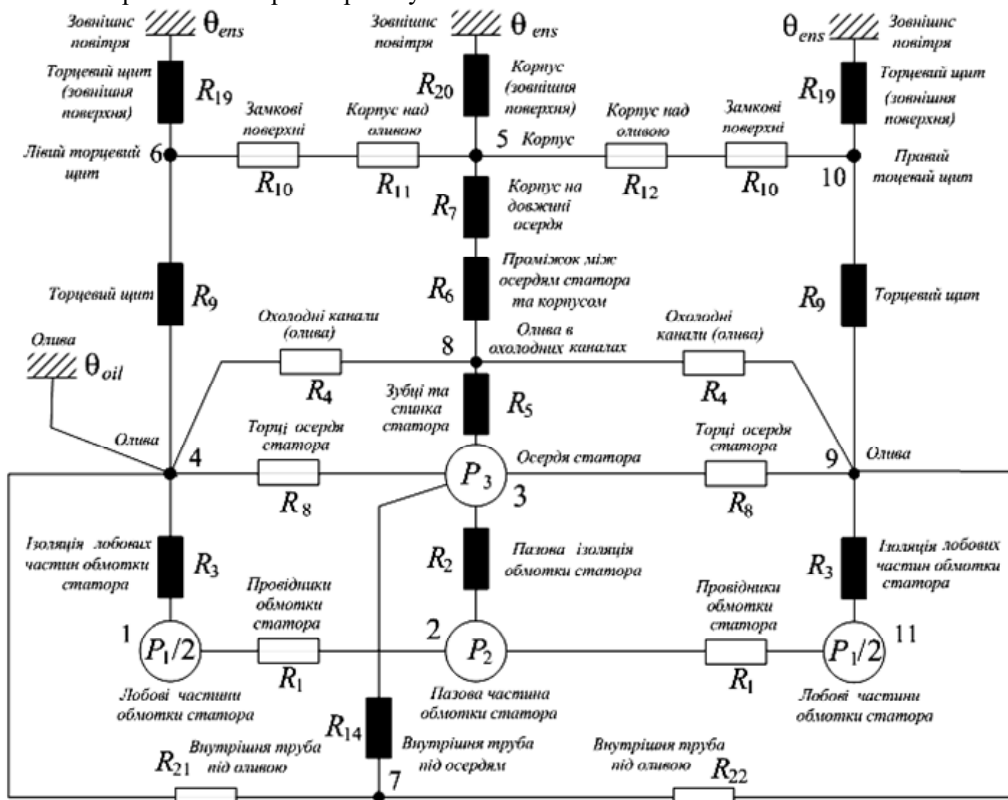


Рис. 4. Еквівалентна теплова схема індуктора ЕММ

В індукторі виділено окремі однорідні частини, які в ЕТС є вузлами 1 – 11: пазова та дві лобові частини обмотки, осердя статора, трансформаторна олива в просторі лобових частин та в охолодних каналах осердя індуктора, корпус, торцеві щити, внутрішня ізоляційна труба. Джерелами теплоти в індукторі ЕММ є його обмотка та осердя. Електричні та магнітні втрати в них визначалися за результатами електромагнітного розрахунку, як це викладено в [4, 19].

Електричні втрати поділяються між пазовою та лобовими частинами обмотки пропорційно довжинам цих частин і визначають потужності джерел теплоти P_1 та P_2 . Потужність джерела теплоти вузла 3 (зубці та спинка осердя статора) P_3 визначається магнітними та додатковими втратами. Решта вузлів не мають власних джерел теплоти, тому їх потужність дорівнює нулю. Принципи визначення зазначених втрат надані в роботах [4, 19, 26].

Еквівалентна тепла схема має два опорних вузлів – вузли з визначеною температурою. Це вузол зовнішнього повітря з температурою θ_{ens} та вузол трансформаторної оливи на вході з температурою θ_{oil} .

Теплові опори елементів конструкції визначаються за загальноприйнятими формулами, які залежать від елемента конструкції та умов його охолодження [29]. Розрахунковий вираз для теплового опору визначається характером теплообміну.

Кондуктивні теплові опори визначалися за допомогою довідникових коефіцієнтів теплопровідності λ за загальною формулою [29]:

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda \cdot S}, \quad (1)$$

де δ – товщина теплової стінки елемента конструкції ЕММ; S – площа поверхні стінки.

Конвективні теплові опори визначалися через коефіцієнти тепловіддачі α . Їхні значення обиралися за досвідом теплових розрахунків конструктивно подібних електричних машин. Загальна формула для розрахунку конвективного теплового опору [29]:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (2)$$

де S – площа поверхні тепловіддачі.

Наприклад, коефіцієнти тепловіддачі з поверхонь торцевих щитів та корпусу індуктора визначалися з [23] та становили 124 Вт/(м²·°C) і 87 Вт/(м²·°C). Решта коефіцієнтів тепловіддачі визначалися за досвідом теплових розрахунків асинхронних двигунів [32, 33].

Теплові зв'язки між вузлами еквівалентної теплової схеми визначаються тепловими опорами, які не залежать від температури. Визначення цих опорів між вузлами цієї схеми відбувалося за аналогією з правилами розв'язання задач розрахунку електричних кіл.

Для простішого розв'язку системи рівнянь, які характеризують тепловий стан кожного вузла, використовувались теплові провідності. Взаємні теплові провідності між вузлами є зворотними величинами до теплових опорів віток еквівалентної теплової схеми. Власні теплові провідності вузлів є сумою провідностей віток, що входять у вузол. Теплові провідності між вузлами, де немає прямого зв'язку, дорівнюють нулю.

Для систематизації позначень індекси при літерах відповідають номерам вузлів схеми.

Визначення температур вузлів еквівалентної теплової схеми відбувається за допомогою системи

алгебраїчних рівнянь, яка складається з рівнянь теплового балансу джерел теплоти.

Система рівнянь у матричних символах має вигляд:

$$A \times \theta + P = 0, \quad (3)$$

де A – матриця теплових провідностей; θ – матриця температур вузлів; P – матриця потужностей джерел теплоти.

Рівняння складаються для усіх вузлів еквівалентної теплової схеми, крім опорних. Для вузлів еквівалентної теплової схеми, які мають тепловий зв'язок з опорними вузлами, до потужності вузла додаються зведені втрати – добуток температури опорного вузла θ_{oil} або θ_{ens} та теплової провідності між вузлом та опорною точкою Λ_{4oil} , Λ_{5ens} , Λ_{6ens} або Λ_{10ens} :

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 + \theta_{oil} \cdot \Lambda_{4oil} \\ P_5 + \theta_{ens} \cdot \Lambda_{5ens} \\ P_6 + \theta_{ens} \cdot \Lambda_{6ens} \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} + \theta_{ens} \cdot \Lambda_{10ens} \\ P_{11} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Розв'язком системи рівнянь є значення температур елементів конструкції індуктора – вузлів еквівалентної теплової схеми (див. рис. 4): лобової частини з боку входу трансформаторної оливи (вузол 1); пазової частини (вузол 2); осердя статора (вузол 3); трансформаторної оливи на вході (вузол 4); корпусу (вузол 5); торцевого щита з боку входу трансформаторної оливи (вузол 6); внутрішньої труби (вузол 7); оливи в охолодних каналах (вузол 8); трансформаторної оливи на виході (вузол 9); торцевого щита з боку виходу трансформаторної оливи (вузол 10); лобової частини обмотки з боку виходу трансформаторної оливи (вузол 11).

Для здійснення теплового розрахунку розроблено програмне забезпечення в середовищі з вільним доступом SMath Studio [34]. Розрахунок виконувався для чотирьох стаціонарних режимів роботи індуктора: ідеального неробочого ходу (ІНХ); «робочого» неробочого ходу (РНХ), коли феромагнітні елементи завантажені, а сировини, що оброблюється, немає; режиму номінального навантаження (РНН), коли є і елементи, і сировина; режиму максимального навантаження (РМН) [19]. Значення струму обмотки статора I_s , вхідної потужності P_{in} , вихідної потужності P_{out} , електричних втрат P_{els} , магнітних втрат P_{mags} , необхідних для теплового розрахунку, зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Значення величин, необхідних для теплового розрахунку

Режим	I_s , А	P_{in} , Вт	P_{out} , Вт	P_{els} , Вт	P_{mags} , Вт
ІНХ	66,5	4142	–	4101	41
РНХ	35,0	1190	0	1139	51
РНН	36,0	3074	1827	1206	47
РМН	46,0	5727	3715	1969	43

Результати розрахунків наведено в табл. 2. Перевищення температури оливи на виході над температурою оливи на вході в режимах ІНХ становить 22 °С, РНХ – 6 °С, РНН – 7 °С, РМН – 11 °С.

Таблиця 2
Порівняння результатів теплового розрахунку для чотирьох режимів роботи індуктора з оливним охолодженням

Режим	Номери вузлів схеми та їх температура, °С					
	1	2	3	4	5	6
ІНХ	62	71	44	31	30	30
РНХ	32	34	27	23	23	23
РНН	32	35	27	23	23	23
РМН	40	45	31	26	25	25
	Номери вузлів схеми та їх температура, °С					
	7	8	9	10	11	
ІНХ	41	36	53	46	77	
РНХ	26	25	29	27	36	
РНН	26	25	30	28	37	
РМН	30	28	36	32	47	

Як і передбачалося в [19], режим ідеального неробочого ходу є найбільш напруженим як з точки зору струмового навантаження, так і за нагрівом елементів конструкції індуктора. Тому є дуже небажаним тривале знаходження індуктора у цьому режимі, тобто без феромагнітних елементів в робочій камері.

В інших режимах, і насамперед у режимі номінального навантаження, температурний стан індуктора є досить помірний. Цьому сприяли такі фактори:

1) обґрунтований вибір напруги обмотки статора щодо заданого рівня магнітної індукції в робочій камері;

2) застосування двошарової скороченої петльової обмотки статора зі стоншеними і розрідженими лобовими частинами, яка до того ж забезпечує симетрію трифазної системи індуктора і покращений розподіл магнітного поля в осердді статора та робочій камері;

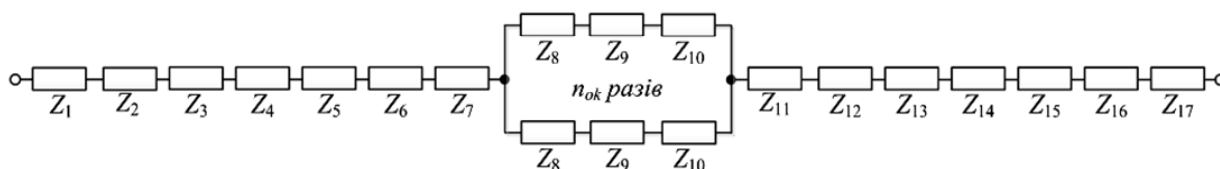


Рис. 5. Еквівалентна гідравлічна схема індуктора ЕММ

Визначення необхідної витрати оливи Q_v потрібно у ході теплового розрахунку:

$$Q_v = \frac{k \cdot \Delta P}{C_{oil} \cdot \rho_{oil} \cdot \Delta \theta}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, який враховує, що не все тепло відводиться оливою, $k = 0,8$; ΔP – сумарні втрати в індукторі (приймаємо «найнавантаженіший» тепловий режим), $\Delta P = 4142$ Вт; C_{oil} – питома теплоємність трансформаторної оливи; $C_{oil} = 1666$ Дж/(кг·К); ρ_{oil} – питома маса трансформаторної оливи; $\rho_{oil} = 880$ кг/м³; $\Delta \theta$ – допустиме перевищення температури оливи при її русі по гідравлічному тракту, $\Delta \theta = 22$ °С.

Підставляємо значення $\Delta \theta$ у формулу (5) і маємо витрати оливи $Q_v = 1,03 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

Швидкість руху оливи залежить від витрати оливи Q_v та поперечного перерізу відповідної ділянки гідравлічного тракту S_i . Визначимо середню швидкість оливи на вході у впускний патрубок

$$V_{in} = \frac{Q_v}{S_{in p}}, \quad (6)$$

3) застосування в осердді статора аксіальних вентиляційних каналів.

Зазначимо, що якщо прийняти температури навколишнього середовища та трансформаторної оливи на рівні 40 °С, як це робиться для електричних машин, то всі температури в табл. 2 відповідно збільшуються. Найбільша температура лобової частини тоді сягає майже 100 °С, і це вже вимагає серйозної уваги.

Для доповнення теплового розрахунку паралельно з ним звичайно і тут теж виконується гідравлічний розрахунок. Відповідна еквівалентна гідравлічна схема індуктора ЕММ, що показана на рис. 5, є лінійною і складається з послідовно з'єднаних ділянок. Вона містить ділянки з такими гідравлічними опорами: впускний патрубок (шляховий опір Z_1), вихід у простір під корпусом (раптове розширення каналу Z_2), простір під корпусом до лобових частин (шляховий опір Z_3), вхід до простору лобових частин (раптове звуження каналу Z_4), простір над лобовими частинами (шляховий опір Z_5), вхід під кільце осердя (раптове звуження каналу Z_6), кільце осердя (шляховий опір Z_7), вхід до охолодних отворів (раптове звуження каналу Z_8), охолодні отвори (шляховий опір Z_9), вихід з охолодних отворів (раптове розширення каналу Z_{10}), кільце осердя (шляховий опір Z_{11}), вихід з-під кільця осердя (раптове розширення каналу Z_{12}), простір над лобовими частинами (шляховий опір Z_{13}), вхід до простору під корпусом (раптове розширення каналу Z_{14}), простір під корпусом до впускного патрубка (шляховий опір Z_{15}), вхід до впускного патрубка (раптове звуження каналу Z_{16}), впускний патрубок (шляховий опір Z_{17}).

В осердді 24 охолодні канали розміщено паралельно один одному. Їхні гідравлічні опори Z_8 , Z_9 та Z_{10} складають паралельні вітки гідравлічної схеми кількості $n_{ok} = 24$ штуки.

де $S_{in p}$ – площа поперечного перерізу вхідного патрубка, $S_{in p} = 491$ мм².

Підставляємо значення $S_{in p}$ у формулу (6) і отримуємо швидкість руху оливи $V_{in} = 0,21$ м/с.

Гідравлічний опір i -ї ділянки гідравлічного тракту визначається за формулою з [29]:

$$z_i = \xi_i \cdot \frac{\rho}{2 \cdot S_i^2}, \quad (7)$$

де ξ_i – коефіцієнт гідравлічного опору i -ї ділянки гідравлічного тракту; ρ – питома маса охолодного середовища; S_i – площа поперечного перерізу i -ї ділянки гідравлічного тракту.

Після розрахунку гідравлічних опорів окремих ділянок встановлено сумарний гідравлічний опір еквівалентної схеми z_{Σ} за рис. 5, а саме:

$$z_{\Sigma} = 5,46 \cdot 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{с}^2\text{)/м}^8.$$

Сумарні витрати тиску при такому гідравлічному опорі визначаються за формулою

$$\Delta P_{G\Sigma} = z_{\Sigma} \cdot Q_v^2, \quad (8)$$

і становлять 57,9 Па, або 0,0006 атм.

Зважаючи на виявлені резерви температурного стану млина, а також гідравлічного стану шляху проходження оливи, можна зробити прогноз щодо переходу від його охолодження оливою до повітряного охолодження. Для цього виконані оцінні теплові та гідравлічні розрахунки при повітряному охолодженні за тими схемами, що і на рис. 4 і 5. Вони показали, що застосування повітря як охолодженого середовища при збереженні будови індуктора ЕММ і близького рівня температур, технічно є дуже складним, і тому цей варіант недоцільно реалізовувати.

У підсумку, розвиваючи у подальшому тему переходу на повітряне охолодження млина, можна дозволити підвищення температури елементів його індуктора у межах допустимого наявного резерву, а також використання повністю або частково відкритої конструкції індуктора, тобто значної зміни конструкції його корпусу.

Висновки.

1. Електромагнітні млини (ЕММ) знаходять нові застосування як у промисловості, так і сільському господарстві. Завдяки впровадженню досліджень науковців, ЕММ все більш переходять від лабораторного до промислового застосування. Але ще залишаються недостатньо досліджені питання створення та розрахунку систем охолодження оливою індуктора ЕММ.

2. Сформована математична модель теплового стану індуктора ЕММ у стаціонарних режимах роботи з його охолодженням трансформаторною оливою. Модель містить у собі його еквівалентну теплову схему і відповідну систему рівнянь теплового балансу, та доповнена еквівалентною гідравлічною схемою шляхів руху оливи разом з формулами відповідних параметрів.

3. За сформованою моделлю виконано тепловий розрахунок індуктора ЕММ для чотирьох режимів його роботи. Отримані дані температур складових елементів індуктора показують, що вони знаходяться на рівні, достатньо далекому від критичного для застосованого класу ізоляції В, і в прийнятній конструкції індуктора ЕММ забезпечується надійне його охолодження.

4. Відповідно оцінному розрахунку зроблено прогноз, що використання повітря для охолодження індуктора ЕММ потребує використання відкритої будови його корпусу, тобто значної зміни конструкції.

5. Подальша робота буде присвячена як удосконаленню системи охолодження індуктора ЕММ оливою, так і конструкторсько-розрахунковим дослідженням системи його повітряного охолодження.

Конфлікт інтересів. Автори статті заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – К.: Техника, 1976. – 144 с.
2. Voitovich V.A., Kart M.A., Zakharychev E.A., Tarasov S.G. Vortex-layer devices as import-substituting equipment to produce paints and adhesives. *Polymer Science, Series D*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 153-155. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421217020253>.
3. Wołosiewicz-Głąb M., Foszcz D., Gawenda T., Ogonowski S. Design of an electromagnetic mill. Its technological and control system structures for dry milling. *E3S Web of Conferences*, 2016, vol. 8, art. no. 01066. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801066>.
4. Milykh V.I., Shilkova, L. V. Characteristics of a cylindrical inductor of a rotating magnetic field for technological purposes when it is powered from the mains at a given voltage. *Electrical*

- Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 13-19. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.02>.
5. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 82, no. 6, pp. 191-198. doi: <https://doi.org/10.18720/MCE.82.17>.
6. Wołosiewicz-Głąb M., Foszcz D., Saramak D., Gawenda T., Krawczykowski D. Analysis of a grinding efficiency in the electromagnetic mill for variable process and feed parameters. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 18, art. no. 01012. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171801012>.
7. Calus D., Makarchuk O. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95, no. 12, pp. 64-69. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2019.12.12>.
8. Wołosiewicz-Głąb M., Pięta P., Foszcz D., Niedoba T., Gawenda T. Adjustment of limestone grinding in an electromagnetic mill for use in production of sorbents for flue gas desulphurization. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 779-791. doi: <https://doi.org/10.5277/ppmp19011>.
9. Ogonowski S., Wołosiewicz-Głąb M., Ogonowski Z., Foszcz D., Pawelczyk M. Comparison of Wet and Dry Grinding in Electromagnetic Mill. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 138. doi: <https://doi.org/10.3390/min8040138>.
10. Zhakirova N., Salakhov R., Sasykova L., Khamidullin R., Deberdeev T., Yalyshev U., Khamidi A., Seilkhanov T. Increasing the Yield of Light Distillates by Wave Action on Oil Raw Materials. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 125-132. doi: <https://doi.org/10.18321/ectj1083>.
11. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S., Litt Y.V. The vortex layer apparatus as a source of low-grade heat in the process of pretreatment of the substrate before anaerobic digestion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 938, no. 1, art. no. 012004. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/938/1/012004>.
12. *Mixing machine AVS-100. Electromagnetic mill.* Режим доступу: <https://globecore.com/products/magnetic-mill/mixing-machine-avs-100/> (Дата звернення 20.02.2022).
13. Ogonowski S., Ogonowski Z., Pawelczyk M. Multi-Objective and Multi-Rate Control of the Grinding and Classification Circuit with Electromagnetic Mill. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 506. doi: <https://doi.org/10.3390/app8040506>.
14. Krawczykowski D., Foszcz D., Ogonowski S., Gawenda T., Wołosiewicz-Głąb M. Analysis of the working chamber size influence on the effectiveness of grinding in electromagnetic mill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 427, art. no. 012033. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012033>.
15. Ogonowski S. On-Line Optimization of Energy Consumption in Electromagnetic Mill Installation. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, art. no. 2380. doi: <https://doi.org/10.3390/en14092380>.
16. Styła S., Mańko M. A reluctance model of an electromagnetic mill using the stator of an asynchronous motor as an inductor. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, vol. 96, no. 1, pp. 254-257. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.01.58>.
17. Міліх В.І., Шилкова Л.В. Чисельно-експериментальний аналіз магнітного поля індуктора магнітного сепаратора на базі асинхронного двигуна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії, 2018, № 5 (1281). С. 104-109.
18. Makarchuk O., Calus D., Moroz V. Mathematical model to calculate the trajectories of electromagnetic mill operating elements. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 2, pp. 26-34. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.026>.
19. Milykh V.I., Shilkova L.V. Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 12-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.

20. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Shuyskiy A. Improvement of Strength and Strain Characteristics of Lightweight Fiber Concrete by Electromagnetic Activation in a Vortex Layer Apparatus. *Applied Sciences*, 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 104. doi: <https://doi.org/10.3390/app12010104>.

21. Krauze O., Buchczik D., Budzan S. Measurement-Based Modelling of Material Moisture and Particle Classification for Control of Copper Ore Dry Grinding Process. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 2, art. no. 667. doi: <https://doi.org/10.3390/s21020667>.

22. Styła S. Analysis of temperature distribution in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, vol. 92, no. 3, pp. 103-106. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2016.03.25>.

23. Власов А. Б., Мухин Е. А. Методика расчёта температуры обмоток электрической машины на основе количественной термографии. *Вестник МГТУ*, 2011, т. 14, № 4, С. 671-680.

24. Yang Y., Bilgin B., Kasprzak M., Nalakath S., Sadek H., Preindl M., Cotton J., Schofield N., Emadi A. Thermal management of electric machines. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 104-116. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0050>.

25. Lundmark S.T., Acquaviva A., Bergqvist A. Coupled 3-D Thermal and Electromagnetic Modelling of a Liquid-cooled Transverse Flux Traction Motor. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2640-2646. doi: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506835>.

26. Milykh V.I., Tymin M.G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 12-18. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.02>.

27. Остапешевский Н.А., Шайда В.П., Петренко А.Н. Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя с помощью метода конечных элементов. *Электротехника і електро механіка*, 2011, № 5, С. 39-42.

28. Kazi S.N. (Ed.) *Heat Transfer Phenomena and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/3391>.

29. Остапешевський М.О., Петренко О.М., Юр'єва О.Ю. Теплові розрахунки електричних машин : навч. посібник. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. – 450 с.

30. *The Engineering Toolbox*. Режим доступу : <https://www.engineeringtoolbox.com> (Дата звернення 20.02.2022).

31. *Materials Thermal Properties Database*. Режим доступу: <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database> (Дата звернення 20.02.2022).

32. Duong M.T., Chun Y.-D., Park B.-G., Kim D.-J., Choi J.-H., Han P.-W. Thermal analysis of a high speed induction motor considering harmonic loss distribution. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, vol. 12, pp. 1503-1510. doi: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.4.1503>.

33. Shams Ghahfarokhi P., Podgornovs A., Kallaste A., Cardoso A.J.M., Belahcen A., Vaimann T., Asad B., Tiismus H. Determination of Heat Transfer Coefficient from Housing Surface of a Totally Enclosed Fan-Cooled Machine during Passive Cooling. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 6, art. no. 120. doi: <https://doi.org/10.3390/machines9060120>.

34. *SMATH Studio*. Режим доступу: <https://smath.com> (Дата звернення 20.02.2022).

REFERENCES

1. Logvinenko D.D., Sheljakov O.P. *Intensifikacija tehnologicheskikh processov v apparatah s vihrevym sloem* [Intensification of technological processes in apparatus with a vortex layer]. Kiev, Tehnika Publ., 1976. 144 p. (Rus).

2. Voitovich V.A., Kart M.A., Zakharychev E.A., Tarasov S.G. Vortex-layer devices as import-substituting equipment to produce paints and adhesives. *Polymer Science, Series D*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 153-155. doi: <https://doi.org/10.1134/S1995421217020253>.

3. Wołosiewicz-Głąb M., Foszcz D., Gawenda T., Ogonowski S. Design of an electromagnetic mill. Its technological and control sys-

tem structures for dry milling. *E3S Web of Conferences*, 2016, vol. 8, art. no. 01066. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160801066>.

4. Milykh V.I., Shilkova L. V. Characteristics of a cylindrical inductor of a rotating magnetic field for technological purposes when it is powered from the mains at a given voltage. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 2, pp. 13-19. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.2.02>.

5. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Kayumov R.A., Deberdeev T.R., Leksin V.V., Sprince A. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, vol. 82, no. 6, pp. 191-198. doi: <https://doi.org/10.18720/MCE.82.17>.

6. Wołosiewicz-Głąb M., Foszcz D., Saramak D., Gawenda T., Krawczykowski D. Analysis of a grinding efficiency in the electromagnetic mill for variable process and feed parameters. *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 18, art. no. 01012. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171801012>.

7. Calus D., Makarchuk O. Analysis of interaction of forces of working elements in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019, vol. 95, no. 12, pp. 64-69. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2019.12.12>.

8. Wołosiewicz-Głąb M., Pięta P., Foszcz D., Niedoba T., Gawenda T. Adjustment of limestone grinding in an electromagnetic mill for use in production of sorbents for flue gas desulphurization. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 779-791. doi: <https://doi.org/10.5277/ppmp19011>.

9. Ogonowski S., Wołosiewicz-Głąb M., Ogonowski Z., Foszcz D., Pawełczyk M. Comparison of Wet and Dry Grinding in Electromagnetic Mill. *Minerals*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 138. doi: <https://doi.org/10.3390/min8040138>.

10. Zhakirova N., Salakhov R., Sassykova L., Khamidullin R., Deberdeev T., Yalyshev U., Khamidi A., Seilkhanov T. Increasing the Yield of Light Distillates by Wave Action on Oil Raw Materials. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 125-132. doi: <https://doi.org/10.18321/ectj1083>.

11. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S., Litt Y.V. The vortex layer apparatus as a source of low-grade heat in the process of pretreatment of the substrate before anaerobic digestion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 938, no. 1, art. no. 012004. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/938/1/012004>.

12. *Mixing machine AVS-100. Electromagnetic mill*. Available at: <https://globecore.com/products/magnetic-mill/mixing-machine-avs-100/> (Accessed 20.02.2022).

13. Ogonowski S., Ogonowski Z., Pawełczyk M. Multi-Objective and Multi-Rate Control of the Grinding and Classification Circuit with Electromagnetic Mill. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 4, art. no. 506. doi: <https://doi.org/10.3390/app8040506>.

14. Krawczykowski D., Foszcz D., Ogonowski S., Gawenda T., Wołosiewicz-Głąb M. Analysis of the working chamber size influence on the effectiveness of grinding in electromagnetic mill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 427, art. no. 012033. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/427/1/012033>.

15. Ogonowski S. On-Line Optimization of Energy Consumption in Electromagnetic Mill Installation. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, art. no. 2380. doi: <https://doi.org/10.3390/en14092380>.

16. Styła S., Mańko M. A reluctance model of an electromagnetic mill using the stator of an asynchronous motor as an inductor. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, vol. 96, no. 1, pp. 254-257. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2020.01.58>.

17. Milykh V.I., Shilkova L.V. Numerical-experimental analysis of the magnetic field of a magnetic separator inductor on the basis of an asynchronous motor. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Electric machines and electromechanical energy conversion*, 2018, no. 5 (1281), pp. 104-109. (Ukr).

18. Makarchuk O., Calus D., Moroz V. Mathematical model to calculate the trajectories of electromagnetic mill operating elements. *Technical Electrodynamics*, 2021, no. 2, pp. 26-34. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.026>.

19. Milykh V.I., Shilkova L.V. Control current method of the concentration of ferromagnetic elements in the working chamber of the technological inductor of magnetic field during its operation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2020, no. 5, pp. 12-17. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.5.02>.
20. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Shuyskiy A. Improvement of Strength and Strain Characteristics of Lightweight Fiber Concrete by Electromagnetic Activation in a Vortex Layer Apparatus. *Applied Sciences*, 2021, vol. 12, no. 1, art. no. 104. doi: <https://doi.org/10.3390/app12010104>.
21. Krauze O., Buchczik D., Budzan S. Measurement-Based Modelling of Material Moisture and Particle Classification for Control of Copper Ore Dry Grinding Process. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 2, art. no. 667. doi: <https://doi.org/10.3390/s21020667>.
22. Styła S. Analysis of temperature distribution in electromagnetic mill. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2016, vol. 92, no. 3, pp. 103-106. doi: <https://doi.org/10.15199/48.2016.03.25>.
23. Vlasov A.B., Mukhin E.A. Methodology for calculating the temperature of the windings of an electric machine based on quantitative thermography. *Vestnik of MSTU*, 2011, vol. 14, no. 4, pp. 671-680. (Rus).
24. Yang Y., Bilgin B., Kasprzak M., Nalakath S., Sadek H., Preindl M., Cotton J., Schofield N., Emadi A. Thermal management of electric machines. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 104-116. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-est.2015.0050>.
25. Lundmark S.T., Acquaviva A., Bergqvist A. Coupled 3-D Thermal and Electromagnetic Modelling of a Liquid-cooled Transverse Flux Traction Motor. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2640-2646. doi: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8506835>.
26. Milykh V.I., Tymin M.G. A comparative analysis of the parameters of a rotating magnetic field inductor when using concentric and loop windings. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 4, pp. 12-18. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.4.02>.
27. Ostashevskiy N.A., Shayda V.P., Petrenko A.N. Research into thermal state of a frequency-controlled asynchronous motor by means of a finite element method. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2011, no. 5, pp. 39-42. (Rus).
28. Kazi S.N. (Ed.) *Heat Transfer Phenomena and Applications*. London, United Kingdom, IntechOpen, 2012. doi: <https://doi.org/10.5772/3391>.
29. Ostashevskiy N.A., Petrenko A.N., Yurieva O.Yu. *Teplovi rozrakhunky elektrychnykh mashyn* [Thermal calculations of electric machines]. Kharkiv, O.M. Beketov NUUEKh Publ., 2020. 450 p. (Ukr).
30. *The Engineering Toolbox*. Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com> (Accessed 20.02.2022).
31. *Materials Thermal Properties Database*. Available at: <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database> (Accessed 20.02.2022).
32. Duong M.T., Chun Y.-D., Park B.-G., Kim D.-J., Choi J.-H., Han P.-W. Thermal analysis of a high speed induction motor considering harmonic loss distribution. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2017, vol. 12, pp. 1503-1510. doi: <https://doi.org/10.5370/JEET.2017.12.4.1503>.
33. Shams Ghahfarokhi P., Podgornovs A., Kallaste A., Cardoso A.J.M., Belahcen A., Vaimann T., Asad B., Tiismus H. Determination of Heat Transfer Coefficient from Housing Surface of a Totally Enclosed Fan-Cooled Machine during Passive Cooling. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 6, art. no. 120. doi: <https://doi.org/10.3390/machines9060120>.
34. *SMATH Studio*. Available at: <https://smath.com> (Accessed 20.02.2022).

How to cite this article:

Milykh V.I., Shaida V.P., Yurieva O.Yu. Analysis of the thermal state of the electromagnetic mill inductor with oil cooling in stationary operation modes. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2023, no. 3, pp. 12-20. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2023.3.02>

Надійшла (Received) 11.08.2022
 Прийнята (Accepted) 25.10.2022
 Опублікована (Published) 06.05.2023

Мілюх Володимир Іванович¹, д.т.н., проф.,

Шайда Віктор Петрович¹, к.т.н., доц.,

Юр'єва Олена Юр'ївна¹, к.т.н., доц.,

¹ Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут»,

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,

e-mail: mvikemkpi@gmail.com (Corresponding Author),

vpsh1520@gmail.com; ele6780@gmail.com

V.I. Milykh¹, V.P. Shaida¹, O.Yu. Yurieva¹

¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Analysis of the thermal state of the electromagnetic mill inductor with oil cooling in stationary operation modes.

Introduction. An electromagnetic mill (EMM) for the technological processing of various substances, which is based on the stator of a three-phase induction motor, is being studied. The stator winding has an increased current density, so the mill is provided with a system of forced cooling with transformer oil. **Problem.** Currently, there are no works on the thermal state calculation of the EMM with the given design and oil cooling. Therefore, the study of such EMMs thermal state is relevant, as it will contribute to increasing the reliability and efficiency of their work. **Goal.** Formation of a mathematical model of the thermal state of the electromagnetic mill inductor and the analysis of its heating in stationary modes of operation with cooling by transformer oil. **Methodology.** The problem of calculating the thermal state, namely the temperature distribution in the main parts of the electromagnetic mill, is solved by the equivalent thermal resistance circuit method. The design of the EMM is provided in a sufficiently complete volume, and on this basis, a corresponding equivalent thermal replacement circuit is formed, which is supplemented by an equivalent hydraulic circuit of oil passageways. An explanation is provided for the composition and solution of the equations algebraic system that describes the distribution of temperatures by the constituent elements of the EMM. **Results.** The thermal calculation results of the electromagnetic mill showed that the maximum heating temperature is much lower than the allowable one for the selected insulation class. According to the hydraulic scheme, the necessary oil consumption, its average speed and the corresponding pressure at the inlet of the intake pipe are determined, which are at an acceptable level. It is noted that the rather moderate temperature state of the inductor and the hydraulic parameters of the oil path are facilitated by such innovations in the design of the EMM as the loop double layer short chorded winding and axial ventilation channels in the stator core. **Originality.** Now EMM thermal equivalent circuits with air cooling only have been presented. Therefore, the developed thermal circuit of the oil-cooled inductor is new and makes it possible to evaluate the operating modes of the EMM. **Practical value.** The proposed technical solutions can be recommended for practical implementation in other EMMs. Taking into account the identified reserves of the EMM temperature state, a forecast was made regarding the transition from its oil cooling to air cooling. But the use of air cooling requires a change in the design of the EMM. References 34, tables 2, figures 5.

Key words: electromagnetic mill, forced cooling of the inductor with oil, analysis of the thermal state of the mill, method of equivalent thermal circuits, analysis of hydraulic parameters.