DOI: 10.33955/2307-2180(2)2020.13-21 УДК 621.318.25(088.8)

АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ДЛЯ НАМАГНІЧУВАННЯ ВИСОКОКОЕРЦИТИВНИХ МАГНІТІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРИВОДІВ

Automated Unit for Magnetization of Strong Magnets of Electromagnetic Drives

CC BY-SA

М. М. Сіренко, кандидат технічних наук,
професор кафедри комп'ютерних та
радіоелектронних систем контролю та діагностики,
e-mail: sirnn2@gmail.com
Б. М. Горкунов, доктор технічних наук,
професор кафедри інформаційно-вимірювальних
технологій і систем,
e-mail: b.gorkunov51@gmail.com
С. Г. Львов, кандидат технічних наук,
професор кафедри,
e-mail: sgl8ntu@gmail.com
В. В. Лисенко, доцент кафедри,
e-mail: v.v.lysenko.111@gmail.com
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», Україна

M. M. Sirenko, candidate of technical sciences,
professor of the computer and radio-electronic systems
for testing and diagnostics department,
e-mail: sirnn2@gmail.com
B. M. Gorkunov, doctor of technical sciences,
professor of the information and measuring technologies
and systems department,
e-mail: b.gorkunov51@gmail.com
S. G. Lvov, candidate of technical sciences,
professor of the department,
e-mail: sgl8ntu@gmail.com
V. V. Lysenko, docent of the department,
e-mail: v.v.lysenko.111@gmail.com
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

Статтю присвячено актуальній темі розроблення автоматизованої установки з оптимальними енергетичними і масо-габаритними параметрами для якісного намагнічування магнітів електромагнітних приводів зі збереженням цілісності їх обмоток.

Розроблено методику розрахунку амплітуди і тривалості імпульсу намагнічування. Визначено час наростання його переднього фронту, який задовольняє умовам повного промагнічування магнітопроводу привода та збереження при цьому цілісності його обмотки збудження.

Для формування імпульсу із заданими параметрами запропоновано електронний пристрій на основі зворотного зв'язку між обмоткою привода й імпульсним джерелом струму обмотки індуктора.

Запропоновано методику синтезу магнітної системи індуктора за критеріями: досягнення заданої напруженості магнітного поля в робочому об'ємі індуктора; мінімальні габарити джерела живлення і його споживана енергія за намагнічування. Її результатом є отримання профілю перерізу каркаса індуктора з конкретними розмірами і числом витків обмотки.

На основі комплексу отриманих результатів у роботі розроблено схему автоматизованої установки і запропоновано компоновку пульту управління і контролю необхідними пристроями та елементами.

The paper is about the development of an automated unit with optimum energy and mass-dimensional parameters for high-quality magnetization of magnets of electromagnetic drives, while preserving the integrity of their windings.

The authors develop an approach for calculating amplitude and width of magnetization pulse. The authors than estimate the rise time of leading edge of the pulse, with respect to conditions of complete magnetization of the electromagnetic drive's magnetic conductor and preservation of its excitation winding integrity.

For the formation of the magnetization pulse with given parameters, the authors propose an electronic device, which feedbacks bitween the drive winding and the pulse current source, which provides power to the inductor winding.

The authors propose a method of the inductor magnetic system synthesis by criteria of: given magnetic field strength in inductor's operating volume; power supply unit minimal dimensions and it power consumption while magnetizing. The final result is obtaining cross-section profile of the inductor electrical coil with certain dimensions and number of winding's turns of a wire of certain diameter.

In order to optimize the mass, size, magnetic and energy parameters of the inductor, the authors solve a problem of synthesizing its magnetic system in way of calculating the parameters of the magnetic field for operating volume of the inductor. It is determined by the characteristic overall dimensions of the NZTB type electromagnetic drives (brakes, 0.2 m in diameter), which were subject to magnetization in a field with strength of at least 400 A/m. The result is the determination of geometrical parameters and the cross-section profile of the inductor electrical coil. This profile ensures the uniformity of the magnetic field when magnetizing the electromagnetic drive of given overall dimensions.

On the basis of all these results, the authors develop the functional scheme of the automated unit and propose a structure of a panel for monitoring and management of devices and units involved.

Ключові слова: *електромагнітні приводи, намагнічування, індуктор, магнітопровід, магнітна система, імпульс намагнічування, автоматизована установка.*
Keywords: *electromagnetic drives, magnetization, inductor, magnetic conductor, magnetic system, magnetization impulse, automated unit.*

© Сіренко М. М., Горкунов Б. М., Львов С. Г., Лисенко В. В., 2020

2'2020 • МЕТРОЛОГІЯ ТА ПРИЛАДИ • ISSN 2307-2180

ВСТУП

Електромагнітні приводи (гальма, муфти) постійного струму отримали широке застосовування в електродвигунах та механізмах промислового призначення, що працюють в режимі частих зупинок або вимагають точного позиціонування, а також для забезпечення вимог безпеки та запобігання аваріям. Вони зазвичай мають дискову конструкцію. До неї входить корпус, магнітопровід (обойма постійного магніту) з обмоткою (котушкою) збудження, призначенням якої за живлення її постійним струмом є створення у магнітопроводі електромагнітного поля протидії постійному полю магніту.

Основною проблемою в технології виготовлення приводів є намагнічування їх висококоерцитивних магнітів у зборі з магнітопроводом і котушкою збудження без порушення цілісності її обмотки. Традиційні методи й установки намагнічування таких виробів (магнетизери) змушують намагнічувати окремо магніт (або його частини), а потім складати магніт з магнітопроводом у єдиний цілий виріб, що потребує створення особливих «чистих» умов складання, застосування немагнітного інструменту і значно ускладнює та затягує у часі технологічний процес їх виготовлення. Спроби намагнічувати привід з магнітом у зборі в сильному магнітному полі з напруженістю до 400 кА/м можуть внаслідок самоіндукції призвести до пробою ізоляції дроту його обмотки.

Тому актуальним практичним завданням стає розроблення автоматизованої установки для намагнічування висококоерцитивних магнітів приводів у зборі без порушення цілісності їх обмоток збудження. Для його виконання спочатку розглянемо більш детально методи й установки для намагнічування висококоерцитивних магнітів у складі електромагнітних приводів (гальм).

АНАЛІЗ НАЯВНИХ МЕТОДІВ, ТЕХНОЛОГІЙ І УСТАНОВОК НАМАГНІЧУВАННЯ

Відомі методи намагнічування магнітотвердих матеріалів у постійних, змінних та імпульсних магнітних полях [1—5].

За намагнічування постійним полем у виробі створюють поле з напруженістю, достатньою для насичення матеріалу. Перевагами такого способу є повне промагнічування виробу і відсутність впливу вихрових струмів. Однак цей спосіб дозволяє намагнічувати лише малогабаритні деталі або їх окремі ділянки і є найбільш енергоємним.

За намагнічування у змінних полях необхідно забезпечити вимикання струму індуктора в момент досягнення ним амплітудного значення, що є складним технічним завданням. Тому вирішують цю проблему двома шляхами: проводять багаторазове намагнічування, з вимиканням поля у випадковий момент часу і подальшою оцінкою ступеня намагніченості, або застосовують електронний ключ, що вимикає живлення індуктора в потрібну мить.

Імпульсний метод намагнічування поєднує переваги намагнічування постійним і змінним полями, хоча технічно він складний. Найчастіше намагнічування здійснюється імпульсом струму в результаті розряду конденсатора великої ємності. Потрібно мати на увазі, що, внаслідок впливу вихрових струмів під час дії імпульсу, намагнічування різних областей перерізу деталі відбувається неоднаково. Тому тривалість і амплітуда імпульсу напруженості магнітного поля повинні бути обрані такими, щоби за мінімальних енергетичних витрат і високої продуктивності забезпечити технічне насичення матеріалу. Завдяки відсутності магнітопроводу імпульсні установки мають відносно невелику масу і є більш економічними ніж магнетизери з тривалим намагнічуванням.

Магнетизери залежно від призначення відрізняються між собою конструкцією, розмірами, конфігурацією зони намагнічування, амплітудним значенням індукції магнітного поля в ній і поділяються на дві групи: з накопичувачами енергії і без них. Їх конструкція визначається маркою магнітів і формою виробів, у яких ці магніти застосовуються. Для намагнічування виробів з магнітами із фериту барію, стронцію або легованими рідкоземельними металами застосовуються магнетизери, які дозволяють отримувати поле з амплітудою магнітної індукції до 1 Тл у зоні намагнічування.

За серійного виробництва приводів здійснюється, як правило, намагнічування магнітів окремо від магнітних систем, складовими яких вони є. Також відома технологія намагнічування лише окремих частин (секторів) магніту, із яких потім складається магніт за допомогою обойми (магнітопроводу). Для цих операцій застосовуються установки з магнітопроводами (пермеаметри), в яких створюється постійне магнітне поле з напруженістю від 240 кАм/м до 400 кАм/м залежно від матеріалу об'єкта намагнічування [1—5], яке забезпечує повне промагнічування перерізу магніту. Але така технологія має суттєві недоліки. Насамперед, це трудощі складання постійного магніту із окремих секторів у обоймі, оскільки вони притягують найдрібніші феромагнітні частинки і у такий спосіб можуть утворюватися повітряні зазори між секторами, що значно

послаблює силові характеристики поля, яке створює магніт. Також ця технологія характеризується низькою продуктивністю.

З іншого боку, для намагнічування магнітів найпоширеніших діаметрів (0,1—0,2) м потрібні спеціальні високоенергоємні установки, які мають достатньо великі масо-габаритні параметри, що різко збільшуються за збільшення розмірів об'єкта намагнічування. Окрім цього, ця технологія не дозволяє намагнічувати привід у зборі, оскільки в полях з таким значенням напруженості на затискачах обмотки приводу виникає напруга, яка перевищує допустиме значення напруги пробою ізоляції дроту обмотки і призводить до порушення її цілісності.

Ще одна технологія намагнічування заснована на використанні установок, які створюють імпульсне магнітне поле [1—5] достатньо малої тривалості імпульсу, яка обмежена енергетичними характеристиками обладнання (зазвичай ємнісних накопичувачів). Але, як відомо [2], імпульсне магнітне поле «згасає» у магнітопроводі й внаслідок поверхневого ефекту не забезпечує повного промагнічування матеріалу магніту. Окрім цього, короткотривалий імпульс намагнічування призводить до різкого зростання напруженості поля в індукторі, що не дозволяє намагнічувати привід у зборі разом з обмоткою без порушення її цілісності.

Технологія намагнічування достатньо габаритних магнітів на основі застосування відносно довготривалого імпульсу установками на базі розряду конденсаторної батареї застосовується, наприклад, в імпульсних установках світового лідера виробництва магнетизерів фірми *MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH* (Німеччина) [6]. Але подібні магнетизери не дозволяють намагнічувати приводи у зборі й характеризуються значними енергетичними витратами, достатньо великими габаритами, пов'язаними з використанням достатньо великої кількості конденсаторів. Дійсно, якщо навіть прийняти тривалість переднього фронту імпульсу розряду конденсаторної батареї близько 0,8 с за вказаних значень напруженості поля в індукторі, то розрахунки, з використанням результатів роботи [7], свідчать, що час затухання магнітного поля складе 3,7 с, а тривалість всього імпульсу — 4,5 с. Звідси випливає, що за заданої напруженості поля потрібен достатньо великий заряд для створення необхідного струму намагнічування в обмотці індуктора. А це, в свою чергу, потребує відповідної достатньо великої ємності конденсаторної батареї й значної напруги на ній. Для характерних параметрів індуктора (діаметр робочого об'єму 0,2 м; число витків обмотки 2000 мідним дротом з перерізом 10 мм^2) значення опору дроту цієї котушки складе 2,2 Ом, а її індуктивності — 3,5 Гн. За застосування оптимального режиму розряду [7] величина ємності конденсаторної батареї складе 2,9 Ф. За значення струму розряду 125 А, який забезпечить мінімально задане значення напруженості поля в індукторі, буде потрібна мінімальна напруга на конденсаторній батареї близько 375 В. Якщо використати як накопичувач електричної енергії конденсатори типу К50-3И 400 В 500 мкФ, то для створення батареї конденсаторів їх буде потрібно 5800 штук.

Ще одна проблема подібних магнетизерів пов'язана з тим, що значна частина енергії довготривалих магнітних імпульсів перетворюється в теплову енергію нагрівання індуктора з виробом. Тому, для підвищення продуктивності намагнічування, необхідно обмежити втрати енергії внаслідок зменшення тривалості циклу намагнічування і примусового охолодження індуктора. Отже, до тривалості імпульсу пред'являються достатньо жорсткі вимоги.

Як засвідчив аналіз відомих методів і промислових установок для намагнічування постійних магнітів, для кожного конкретного виробу і кожної марки магнітного матеріалу потрібно розробляти окремий магнетизер. Для цього потрібні універсальні методики синтезу магнітних систем таких установок. За їх проектування доцільно використовувати переваги технологій намагнічування постійним й імпульсним полями. Щоби рівномірно намагнітити переріз магніту приводу в зборі з обмоткою без порушення її цілісності, потрібно використати метод імпульсного магнітного поля з керованими параметрами (тривалістю і амплітудою) і нахилом переднього фронту. Таке поле можна створити шляхом керованої за заданим законом зміни напруги живлення в обмотці індуктора з виробом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ РОЗРОБЛЕННЯ

Для створення установки з оптимальними енергетичними і масо-габаритними параметрами для якісного намагнічування магнітів приводів із збереженням цілісності їх обмоток потрібно вирішити ряд задач. По-перше, необхідно розробити методику розрахунку параметрів імпульсу намагнічування із заданими параметрами. По-друге, для формування такого імпульсу потрібно запропонувати схему відповідного автоматичного пристрою. Також для забезпечення рівномірності магнітного поля у робочому об'ємі індуктора необхідно розробити методику синтезу магнітної системи індуктора, яка базується на розрахунку геометричних параметрів його

профілю. Для контролю якості намагнічування магніту і цілісності обмотки приводу потрібно запропонувати відповідний пристрій. Завершальним етапом є розроблення загальної функціональної схеми автоматизованої установки.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ НАМАГНІЧУВАННЯ

Тривалість і амплітуда імпульсу намагнічувального струму в обмотці індуктора повинні задовольняти двом умовам.

По-перше, це забезпечення повного промагнічування магнітних елементів привода в зборі. Це означає, що еквівалентна глибина δ проникнення магнітного поля у феромагнітний об'єкт (магніт з магнітопроводом приводу) повинна бути не менше характерного поперечного розміру a цього об'єкта (наприклад, радіальної ширини дискового магнітопроводу):

$$\delta \geq a \qquad (1)$$

По-друге, в процесі намагнічування напруга E на затискачах обмотки збудження приводу повинна бути менше значення $E_{\text{пр}}$ напруги пробою її ізоляції:

$$E < E_{\text{пр}}. \qquad (2)$$

Тривалість t переднього фронту імпульсу намагнічування потрібно попередньо розраховувати для конкретних типів електромагнітних приводів з урахуванням їх електромагнітних (магнітної проникності μ_r та питомої електропровідності σ) та геометричних (радіальної ширини, товщини тощо) параметрів. При цьому вона повинна бути не меншою від часу, необхідного для повного промагнічування магнітних елементів привода.

Відомо [2], що за аперіодичного намагнічування еквівалентна глибина δ розраховується за формулою:

$$\delta = 2\sqrt{\frac{t}{\pi\mu_0\mu_r\sigma}}, \qquad (3)$$

де μ_0 — магнітна константа, $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Звідси можна отримати формулу для визначення часу t:

$$t = \frac{\delta^2\pi\mu_0\mu_r\sigma}{4}. \qquad (4)$$

З урахуванням умови (1) це співвідношення можна представити у виді:

$$t = a^2\pi^2\mu_r\sigma\cdot 10^{-7}. \qquad (5)$$

З іншого боку, напруга E, яка наводиться в обмотці збудження приводу з числом витків W під час його імпульсного намагнічування, за законом електромагнітної індукції [1—3] буде визначатися за формулою:

$$E = -W\left(\Delta\Phi/\Delta t\right), \qquad (6)$$

де $\Delta\Phi/\Delta t$ — приріст магнітного потоку в об'єкті за час Δt наростання переднього фронту імпульсу намагнічування.

Ураховуючи, що $t = \Delta t$, тривалість імпульсу можна розрахувати, як

$$t = \left(W\Delta\Phi\right)/E. \qquad (7)$$

Потрібно відзначити, що для виконання умови (2) зручно визначити допустиме значення $E_{\text{доп}}$ напруги на затискачах обмотки збудження привода, яке не повинно перевищуватися поточними значеннями напруги E під час намагнічування. Тоді умову (2) можна переписати у виді:

$$E \leq E_{\text{доп}} < E_{\text{пр}}. \qquad (8)$$

Величину зміни магнітного потоку $\Delta\Phi$ можна представити у виді [1—3]:

$$\Delta\Phi = \mu_0\mu_r\Delta HS, \qquad (9)$$

де ΔH — приріст напруженості магнітного поля в індукторі за час Δt;

S — площа перерізу магнітопроводу електромагнітного привода.

Тоді на основі формул (7)—(9) час t можна розрахувати за формулою:

$$t = \frac{W\mu_0\mu_r\Delta HS}{E_{\text{доп}}}. \qquad (10)$$

Отже, за формулами (5) та (10) можна визначити час наростання переднього фронту імпульсу намагнічування, який повинен задовольняти двом умовам: повному промагнічуванню магнітопроводу електромагнітного привода (5) та збереженню при цьому цілісності його обмотки збудження (10). За порівняння двох отриманих значень обирається найбільше.

Потрібно зазначити, що попередньо можна розрахувати очікуване значення напруги $E_{\text{доп}}$, яке потім порівнюється із довідковим значенням $E_{\text{пр}}$ на виконання умови (8). Для цього потрібно скористатися відомими (або заданими) магнітними та геометричними параметрами привода та формулою, отриманою із виразів (5) і (10):

$$E_{\text{доп}} = \frac{4W\Delta HS}{a^2\pi\sigma}. \qquad (11)$$

Під час проектування установки для намагнічування електромагнітних гальм типу НЗТБ13-13 були проведені такі розрахунки. Дисковий магнітопровід цього виробу виконаний зі сталі 10 ($\mu_r = 100$, $\sigma = 6$ МСм/м) з радіальною шириною $a = 37{,}5\cdot 10^{-3}$ м, площею перерізу $S = 5{,}5\cdot 10^{-4}$ м^2 і числом витків $W = 900$ обмотки збудження. Було прийнято значення зміни напруженості поля $\Delta H = 400$ кА/м, що відповідає технології виготовлення постійних магнітів із магнітотвердих матеріалів типу 28СА250, і значення напруги $E_{\text{доп}} = 500$ В, яке дорівнювало напрузі пробою ізоляції дроту обмотки гальм НЗТБ13-13.

Спочатку за формулою (5) було розраховано значення $t = 830$ мс, а потім за виразом (10) отримано значення $t = 50$ мс. Очевидно, щоби виконати умову повного промагнічування магнітної системи привода, необхідно обрати найбільше значення тривалості імпульсу, тобто 830 мс.

Користуючись формулою (11), було розраховано очікуване значення напруги на затискачах обмотки збудження привода за його намагнічування у полі з напруженістю 400 кА/м, яке склало лише 30 В, що значно менше допустимого значення напруги 500 В пробою ізоляції дроту обмотки і гарантує цілісність обмотки.

БЛОК ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІМПУЛЬСУ НАМАГНІЧУВАННЯ

Для формування імпульсу намагнічування із заданими параметрами пропонується електронний пристрій [8], який здійснює зворотний зв'язок між обмоткою 7 привода й імпульсним джерелом струму 1, що забезпечує живлення обмотки індуктора 2 (рис. 1).

При цьому залежно від рівня сигналу E на затискачах обмотки 7 привода за допомогою цього пристрою формуються параметри імпульсного сигналу намагнічування в обмотці індуктора 2, який виробляє кероване джерело 1. До складу електронного пристрою входять амплітудний детектор 4 сигналу на затискачах обмотки 7 привода, формувач допустимої напруги 5, компаратор напруги 6 та програмований регулятор напруги 3 (рис. 1).

Уведення до схеми установки програмованого регулятора напруги зумовлено необхідністю формування сигналу управління імпульсним джерелом струму 1, яке, в свою чергу, повинно сформувати імпульс струму намагнічування із заданою амплітудою і тривалістю t переднього фронту. Цей імпульс струму з джерела 1 подається на обмотку індуктора 2 для створення в ньому магнітного поля із заданими параметрами. Тому вихід регулятора 3 напруги підключений до імпульсного джерела струму 1, а його вхід з'єднаний з виходом компаратора 6.

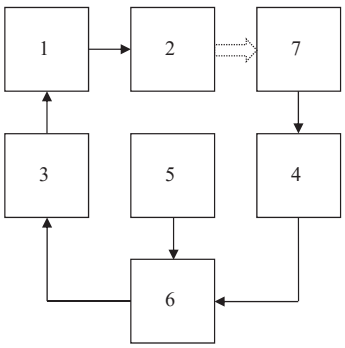

Рис. 1. Функціональна схема блоку формування параметрів імпульсу намагнічування
Fig. 1. Functional diagram of the block of formation of magnetization pulse parameters

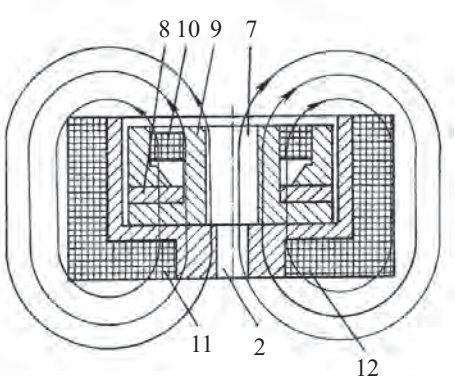

Рис. 2. Розміщення привода в зборі у внутрішній порожнині індуктора
Fig. 2. Arrangement of the drive assembly in the internal cavity of the inductor

На рис. 2 (у перерізі) показано приклад розміщення привода 7 в зборі з висококоерцитивним магнітом 8, магнітопроводом 9 і обмоткою збудження 10 у внутрішній порожнині каркаса 11 обмотки 12 індуктора 2.

У процесі намагнічування матеріалу магніту 8 здійснюється індуктивний зв'язок між обмотками 12 індуктора і 10 привода, внаслідок якого на затискачах обмотки 10 наводиться електрорушійна сила E, перевищення допустимого значення якої призводить до порушення цілісності цієї обмотки [8].

Протягом наростання переднього фронту імпульсу намагнічування сигнали, пропорційні миттєвим значенням напруги E_t, постійно подаються на вхід амплітудного детектора 4 (рис. 1). Далі їх потрібно порівнювати зі сигналом $E_{\text{доп}}$, який утворює формувач допустимої напруги 5 з урахуванням умови (8). Ця операція здійснюється компаратором напруги 6, на входи якого подаються відповідні сигнали з детектора 4 і формувача 5. У разі появи аварійної умови $E > E_{\text{доп}}$ з компаратора 6 подається відповідний сигнал на регулятор напруги 3, який, в свою чергу, формує сигнал управління імпульсним джерелом струму 1. Це кероване джерело зменшує нахил переднього фронту імпульсу намагнічування до моменту, коли значення напруги E_t на затискачах обмотки привода не перевищує значення сигналу $E_{\text{доп}}$ з формувача 5. У такий спосіб здійснюється процес автоматичного формування допустимих значень амплітуди і тривалості імпульсу намагнічування.

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ІНДУКТОРА

Кінцевим результатом цієї методики є отримання профілю перерізу каркаса індуктора з конкретними

геометричними розмірами і числом витків обмотки, нанесеної дротом визначеної площі перетину. Розрахунки проводяться для конкретних типів електромагнітних приводів, що випускаються серійно, з відомими електромагнітними і геометричними параметрами. Така методика повинна синтезувати магнітну систему індуктора за такими параметрами: досягнення заданої напруженості магнітного поля в робочому об'ємі індуктора (наприклад, 400 А/м); мінімальні габарити джерела живлення обмотки індуктора; мінімальна споживана енергія за намагнічування.

Спочатку потрібно розглянути теоретичну картину розподілу магнітного поля в робочому об'ємі індуктора з урахуванням принципу суперпозиції магнітних полів, які утворюються струмом кругових витків обмотки з радіусом a. Для цього скористуємось результатами роботи [9] і виберемо початок циліндричної системи координат r, φ, z у центрі кола. При цьому кут φ відраховується від площини, яка проходить через вісь z і точку спостереження характеристик магнітного поля (координату r). Векторний потенціал має тільки компоненту $A_\varphi = A(r,z)$. Тому цю компоненту обчислимо із формули [9]:

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\oint\frac{\cos\varphi dl}{R} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\int_0^\pi \frac{a\cos\varphi d\varphi}{\left(a^2+r^2+z^2-2ar\cos\varphi\right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

де I — струм у круговому витку;

dl — елементарна довжина витка обмотки індуктора:

R — радіус витка обмотки.

Якщо ввести змінну Θ, яка пов'язана з кутом φ рівнянням

$$\varphi = \pi + 2\Theta, \quad (13)$$

то формулу (12) можна привести до виразу

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{\pi k}\sqrt{\frac{a}{r}}\left[\left(1-\frac{k^2}{2}\right)K - E\right], \quad (14)$$

де

$$k^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2+z^2}, \quad (15)$$

а K та E — повні еліптичні інтеграли 1-го і 2-го роду, причому

$$K = \int_0^{\pi/2}\frac{d\Theta}{\sqrt{1-k^2\sin^2\Theta}}, \quad (16)$$

$$E = \int_0^{\pi/2}\sqrt{1-k^2\sin^2\Theta}d\Theta. \quad (17)$$

Потрібно відзначити, що значення повних еліптичних інтегралів K та E протабульовані у довіднику [10].

Також визначимо компоненти індукції B у циліндричній системі координат [9]:

$$B_\varphi = 0, \quad (18)$$

$$B_r = -\frac{dA_\varphi}{dz} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\cdot\frac{2z}{r\sqrt{(a+r)^2+z^2}}\left[-K+\frac{a^2+r^2+z^2}{(a-r)^2+z^2}E\right], \quad (19)$$

$$B_z = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(rA_\varphi\right) = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\cdot\frac{1}{\sqrt{(a+r)^2+z^2}}\left[K+\frac{a^2-r^2-z^2}{(a-r)^2+z^2}E\right]. \quad (20)$$

Потрібно також відзначити, що розподіл магнітного поля вздовж осі кругового витка розраховується за відносно простою формулою, яку можна отримати з виразів (19) та (20) за умови, що радіус витка r і компонента B_r у цьому випадку дорівнюють 0. Тоді компонента B_z буде дорівнювати

$$B_z = \frac{\mu_0 I a^2}{2\left(a^2+z^2\right)^{3/2}}. \quad (21)$$

Скориставшися отриманими результатами, з метою оптимізації маси, габаритних, магнітних і енергетичних параметрів індуктора, була вирішена задача синтезу його магнітної системи шляхом розрахунків параметрів магнітного поля для робочого об'єму індуктора. Він визначався характерними габаритними розмірами електромагнітних приводів (гальм) типу НЗТБ (діаметр 0,2 м), які підлягали намагнічуванню у полі з напруженістю, не меншою від 400 А/м. Результатом стало визначення геометричних параметрів і профілю перерізу електричної котушки індуктора (рис. 3). Такий профіль забезпечує рівномірність магнітного поля за намагнічування електромагнітного привода заданих габаритних розмірів.

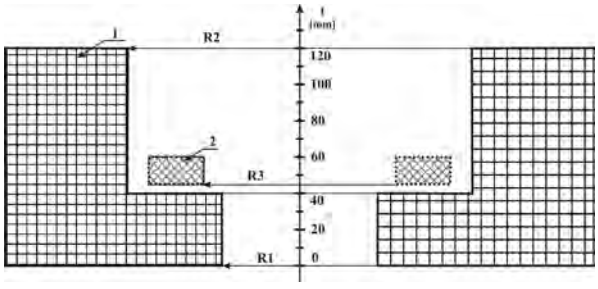

Рис. 3. Профіль перерізу електричної котушки індуктора (R1 — внутрішній радіус першої секції, R2 — внутрішній радіус другої секції, 1 — намагнічувальна обмотка, 2 — зона 15х30 мм розміщення магніту, R3 — внутрішній радіус магніту)

Fig. 3. Cross-section profile of the inductor electrical coil (R1 — inner radius of the first section, R2 — inner radius of the second section, 1 — magnetizing coil, 2 — 15x30 mm area of magnet arrangement, R3 — inner radius of the magnet)

Також були визначені число витків обмотки індуктора (2600), максимальне значення струму намагнічування від трифазної мережі (40 А) та максимальна електрична потужність в імпульсі (18 кВт). Виходячи з цих параметрів було розраховано діаметр d мідного дроту з ізоляцією для обмотки (2 мм) та його очікувана довжина l (1833 м) за рядової укладки. Отримана довжина мідного дроту дозволяє оцінити масу m проводу електричної котушки індуктора (без каркаса) за формулою

$$m = \left(l\pi d^2\rho\right)/4, \qquad (22)$$

де ρ — щільність міді, кг/м^3.

Так, наприклад, очікувана вага обмотки індуктора (без каркаса), синтез якого проводився, склала близько 41 кг.

Розрахунковий розподіл параметрів магнітного поля у робочому об'ємі індуктора наведено на рис. 4.

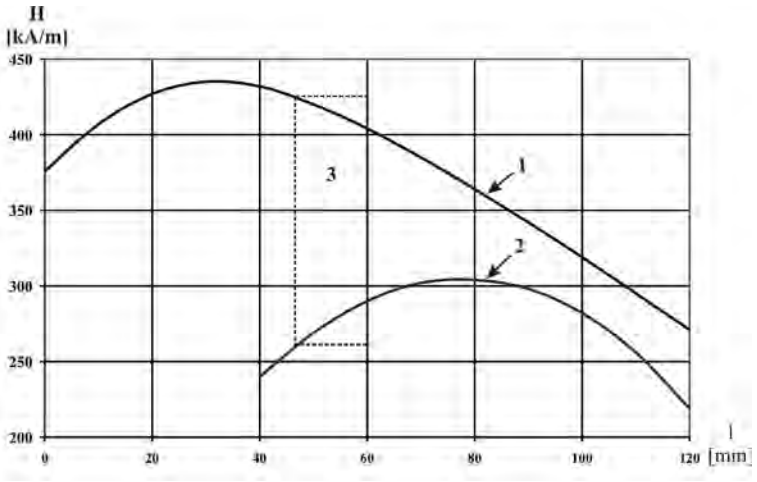

Рис. 4. Профіль розподілу параметрів магнітного поля у робочому об'ємі індуктора (1 — крива розподілу значень напруженості магнітного поля на осі котушки, 2 — крива розподілу значень напруженості магнітного поля на відстані 85 мм від осі котушки, 3 — зона розміщення магніту)

Fig. 4. Profile of magnetic field parameters distribution in inductor operating volume (1 — the curve of the distribution of magnetic field strength on the coil axis, 2 — curve of distribution of magnetic field strength at a distance of 85 mm from the axis of the coil, 3 — the magnet location area)

СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ

Функціональну схему установки, яка реалізує запропонований метод, наведено на рис. 5.

До її складу входять трифазний випрямляч ТВ, дросельно-конденсаторний (LC) фільтр КФ, індуктор І, блок датчиків контролю стану котушки БД, блок формування параметрів імпульсу намагнічування БФ, трифазний регулятор напруги РН, пульт управління і контролю ПУ, пристрій контролю якості намагнічування ПКН, блок охолодження індуктора БО.

Основою установки є індуктор І з обмоткою збудження. Він має змінний профіль перерізу та внутрішню порожнину, в якій фіксується привід.

Трифазна напруга 380 В промислової частоти 50 Гц подається на трифазний випрямляч ТВ, виконаний за схемою Ларіонова [11] з парною групою тиристорів. Випрямлена напруга подається на двоступеневий *LC*-фільтр, який нормує амплітуди пульсацій напруги для живлення котушки індуктора. Сенсори блоку датчиків БД контролю стану котушки виконують вимірювальні перетворення значень струму намагнічування у котушці та напруги на ній, а також температури обмотки котушки індуктора. Відповідні сигнали вимірювальної інформації з блоку датчиків БД подаються до блоку формування БФ параметрів імпульсу намагнічування, де формуються сигнали управління трифазним регулятором напруги РН, побудованим за схемою широкоімпульсного модулятора. Для цього цей блок має пристрій початкової установки програмно заданого сигналу (напруги) управління. Також до складу цього блоку входить пристрій контролю ПКН цілісності обмотки приводу, який формує сигнал блокування запуску циклу намагнічування у разі обриву обмотки привода, а також за перевищення температури обмотки котушки індуктора встановленого граничного значення.

Регулятор напруги РН призначений для перетворення програмно заданого рівня напруги імпульсу намагнічування у кут відкриття тиристорів випрямляча ТВ. У такий спосіб формується імпульс струму намагнічування із заданою тривалістю і кутом зростання його амплітуди до заданого рівня, який проходить

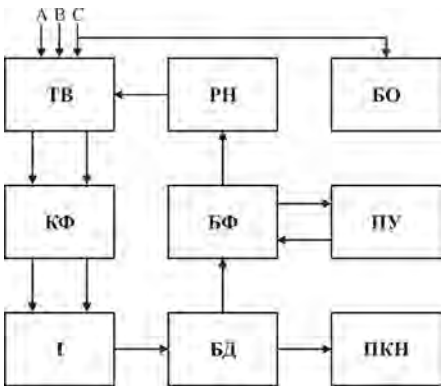

Рис. 5. Функціональна схема автоматизованої установки

Fig. 5. Functional diagram of automated unit

по обмотці котушки індуктора і створює в його об'ємі повільно зростаюче за заданим законом магнітне поле.

Пульт управління і контролю ПУ разом з пристроєм контролю якості намагнічування призначений для комутації різних режимів роботи установки, а також контролю якості намагнічування магніту і цілісності його обмотки з одночасною індикацією режимів роботи, рівня напруженості магнітного поля в індукторі й температурного режиму його обмотки, типу привода, відносної якості намагнічування магніту, несправності (обриву або короткого замикання) дроту його обмотки.

Для підтримання допустимого теплового режиму індуктора і блоків силової електроніки, а також для підвищення продуктивності намагнічування приводів за умов їх серійного виробництва в установці встановлено два вентилятори блоку охолодження БО, які автоматично вимикаються лише під час роботи індуктора для захисту їх від дії магнітного поля індуктора.

ОБЛАДНАННЯ УСТАНОВКИ

На основі попередніх досліджень і розроблень за участю авторів було створено автоматизовану установку для намагнічування висококоерцитивних магнітів заданої форми і розмірів у складі приводів разом з магнітопроводом та обмоткою збудження без порушення її цілісності. До її складу входять усі зазначенні вище складові блоки і пристрої.

На робочій панелі установки передбачені два гнізда фіксації привода. Одне призначено для фіксації привода у робочому об'ємі (порожнині) індуктора перед процесом намагнічування, а інше — для фіксації привода після нього. Загальний вид привода з пристроєм фіксації у внутрішній порожнині індуктора установки показано на рис. 6, де 1 — електромагнітний привід у зборі, 2 — фіксатор з притискною обоймою 3, пружиною 4 та фіксувальною пластиною 5.

Поряд з гніздами розміщені відповідні пари клем для підключення затискачів обмотки привода з метою контролю її цілісності (в процесі намагнічування) і вимірювання відносної якості магніту після намагнічування.

Також на панелі розміщено пульт управління і контролю. До його складу входять дві групи органів управління, контролю та індикації стану/режиму роботи блоків установки і вимірювальної інформації.

Першу групу органів призначено для управління режимами роботи установки. До її складу входять гніздо для встановлення ключа вмикання живлення установки; кнопки режимів роботи (включення/виключення роботи, початку циклу намагнічування), світлодіодні індикатори живлення установки та наявності напруги за фазами «*A*», «*B*», «*C*»; світлові міні-табло індикації готовності до роботи блоку формування параметрів імпульсу намагнічування і його пристрою початкової установки програмно заданого сигналу управління, індикації цілісності обмотки привода, індикації тривалості робочого режиму намагнічування, індикації перевищення допустимого температурного режиму індуктора; індикаторна світлодіодна лінійка зміни значень напруженості магнітного поля в індукторі у процесі намагнічування зі шкалою від 0 до 500 кА/м через 100 кА/м.

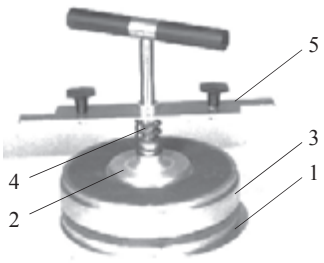

Рис. 6. Електромагнітний привід з пристроєм фіксації
Fig. 6. Electromagnetic drive with locking device

Призначенням пристрою контролю якості намагнічування і другої групи органів управління та індикації є вихідний контроль цілісності обмотки привода й якості намагнічування його магніту. Світлодіоди між клемами призначені для індикації полярності вимірювальної напруги, прикладеної до обмотки привода. Загорання світлового міні-табло сигналізує стосовно цілісності обмотки привода і готовності його до контролю або несправності (порушення її цілісності). Натисканням відповідної клавіші здійснюється автоматичне визначення типу контрольованого привода (НЗТБ13-11 або НЗТБ13-13), відносно чого сигналізують відповідне світлове міні-табло і запуск циклу вимірювання.

Принцип вимірювання ступеня відносної якості намагнічування базується на порівнянні індукцій постійного поля намагніченого магніту і протилежно спрямованого поля, яке створюється за подавання відповідного струму в обмотку привода, до моменту їх рівності за допомогою геркона. Цей пристрій замикає свої контакти за фіксації привода у відповідному гнізді й розмикає їх у момент указаної рівності. Далі вимірене в цей момент значення сили струму порівнюється з нормативним значенням для стандартного зразка привода, і результат цього порівняння відображається на цифровому відліковому пристрої, який має діапазон показів у межах від 0 до 150 (у відсотках). Ще одна клавіша необхідна

для обнулення показів цифрового відлікового пристрою і підготовки вимірювального пристрою до наступного вимірювання.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику розрахунку параметрів імпульсу намагнічування із заданими параметрами і схему відповідного автоматичного пристрою формування такого імпульсу. Запропоновано методику синтезу магнітної системи індуктора з рівномірним магнітним полем у його робочому об'ємі, яка базується на розрахунку геометричних параметрів його профілю. Розроблено пристрій контролю відносної якості намагнічування магніту і цілісності обмотки привода. На основі комплексу отриманих результатів розроблено функціональну схему автоматизованої установки. Викладені результати досліджень і розроблень мають бути корисними для розробників автоматизованих систем намагнічування електромагнітних приводів різних типів у зборі та виробників такої продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Кифер И.И. (1969) Испытания ферромагнитных материалов / И.И. Кифер // М.: Энергия (Kifer I.I. (1969) Ispytanija ferromagnitnyh materialov / I.I. Kifer // M.: Jenergija). — 360 с/р.
2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2 / М.: Машиностроение (Nerazrushajushhij kontrol: Spravochnik: 7 vol. / ed. V.V. Kljuev. V.2 / M.: Mashinostroenie), 2003. — 688 с/р.
3. Шихин А.Я. Автоматические магнитоизмерительные системы / А.Я. Шихин // Москва, «Энергия» Библиотека по автоматике. Выпуск 575. (Shihin AJa. Avtomaticheskie magnitoizmeritelnye sistemy / A.Ja. Shihin // Moskva, «Jenergija». Biblioteka po avtomatike. Vypusk 575), 1977.
4. Преображенский А.А. Магнитные материалы и элементы. Учебник. 3-е изд., перераб. и доп. / А.А. Преображенский, Е.Г. Бишард // М.: Высшая школа (Preobrazhenskij A.A. Magnitnye materialy i jelementy. Uchebnik. 3-e izd., pererab. i dop. / A.A. Preobrazhenskij, E.G. Bishard // M.: Vysshaja shkola), 1986. — 352 с/р.
5. Арнольд Р.Р. (1969) Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами / М.: Энергия (Arnold R.R. (1969) Raschet i proektirovanie magnitnyh sistem s postojannymi magnitami / M.: Jenergija). — 184 с/р.
6. Magnetisierer bei MAGNET-PHYSIK in Köln — Magnetisierung — 2020. (https://www.magnet-physik.de/magnetisiertechnik/magnetisierer.php)
7. Себко В.П. (1978) Расчет установки для импульсного намагничивания магнитных ловителей / В.П. Себко, Г.И. Ващенко, В.И. Бондаренко и др. // Нефть и газ (Sebko V.P. (1978) Raschet ustanovki dlja impulsnogo namagnichivanija magnitnyh lovitelej / V.P. Sebko, G.I. Vashhenko, V.I. Bondarenko i dr. // Neft i gaz), — № 4. — С/Р. 25—9.
8. Скляр В.С. Устройство для намагничивания высококоэрцитивных магнитов в составе электромагнитного привода / В.С. Скляр, В.П. Себко, Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, Н.Н. Сиренко, В.В. Лысенко // А.с. SU 1735923 А1. Бюл. №19 (Skljar V.S. Ustrojstvo dlja namagnichivanija vysokokojercitivnyh magnitov v sostave jelektromagnitnogo privoda / V.S. Skljar, V.P. Sebko, B.M. Gorkunov, A.A. Avramenko, N.N. Sirenko, V.V. Lysenko // A.s. SU 1735923 A1. Bjul. №19), 1992.
9. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц // Гос. Изд-во физ.-мат лит. — М. (Landau L.D. Jelektrodinamika sploshnyh sred / L.D. Landau, E.M. Lifshic // Gos. Izd-vo fiz.-mat lit. M.): 1959. — С/Р. 164-5.
10. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / М. Абрамовиц, И. Стиган (ред.) // М.: Наука (Abramovic M. Spravochnik po special'nym funkcijam s formulami, grafikami i tablicami / M. Abramovic, I. Stigan (red.) // M.: Nauka), 1979. — 832 с/р.
11. Борисов П.А. Расчет и моделирование выпрямителей. Учебное пособие по курсу «Элементы систем автоматики» (Часть I) / П.А. Борисов, В.С. Томасов // СПб: СПб ГУ ИТМО (Borisov P.A. Raschet i modelirovanie vyprjamitelej. Uchebnoe posobie po kursu «Jelementy sistem avtomatiki» (Chast I) / P.A. Borisov, V.S. Tomasov // SPb: SPb GU ITMO), 2009. — 169 с/р.

Отримано / received: 10.04.2020.
Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. С.Г. Буряковським (Україна).
Prof. S.G. Buryakovskiy, D. Sc. (Techn.), Ukraine, recommended this article to be published.