DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2.2020.36>
УДК 621.31:537

І. В. Богданюк,

кандидат юридичних наук, старший дослідник, завідувач лабораторії інженерно-технічних, екологічних, військових досліджень та досліджень відео-, звукозапису Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4782-9986>,

e-mail: bogdanyuk.hniise@gmail.com

С. В. Рогалін,

старший науковий співробітник лабораторії інженерно-технічних, екологічних, військових досліджень та досліджень відео-, звукозапису Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1934-8977>, e-mail: rohlin@i.ua

В. С. Супрун,

науковий співробітник лабораторії інженерно-технічних, екологічних, військових досліджень та досліджень відео-, звукозапису Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», м. Харків, Україна,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8830-0267>, e-mail: valeriy.suprun@hniise.gov.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КРОКОВОГО ДВИГУНА ПРИЛАДІВ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПІД ВПЛИВОМ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ, УТВОРЕНОГО З МЕТОЮ БЕЗОБЛІКОВОГО СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

За конструктивною будовою крокового двигуна електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку (далі — ПО) електричної енергії побудовано дослідницьку модель. Механізм втручання в роботу крокового двигуна приладу обліку від дії зовнішнього магнітного поля, штучно утвореного з метою безоблікового споживання електричної енергії, досліджено на моделі порівняння штатного режиму роботи та роботи під дією зовнішнього магнітного поля. Проаналізовано розподілення силових магнітних ліній у магнітопроводі та магнітному екрані крокового двигуна від дії зовнішнього магнітного поля, утвореного від наближення до приладу обліку зовнішнього постійного магніту з високими значеннями максимальної питомої енергії. Визначено механізм перешкоджання штатній роботі крокового двигуна рахункового механізму.

Ключові слова: постійне магнітне поле, індикатор магнітного поля, індукція магнітного поля, кроковий двигун, імпульсне керування, магнітна система, магнітне екранування, постійний магніт, розподілення силових магнітних ліній, граничне значення індукції блокування.

Постановка наукової проблеми. Дослідження фактів та обставин безоблікового споживання електричної енергії у практиці проведення електротех-

нічних судових експертиз належить до найпоширеніших. Проведений аналіз виконаних експертиз за цим напрямом свідчить, що не всі випадки перешкодження відповідній (штатній) роботі приладу обліку (далі — *ПО*), визначений виробником, знайшли широке відображення у спеціальній літературі. Дослідження впливу постійного магнітного поля на роботу електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії є одним із напрямів електротехнічних досліджень, адже науково-практичне опрацювання відсутнє у судовій електротехнічній експертизі. Практика досліджень за цим напрямом спирається на загальнотеоретичні засади. Дослідження механізму втручання в роботу крокового двигуна електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії від дії зовнішнього магнітного поля, штучно утвореного з метою безоблікового споживання електричної енергії, є актуальним.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Завдання, які розв'язує судова електротехнічна експертиза приладів обліку, що зазнали втручання в їхню роботу через вплив зовнішнього постійного магнітного поля, фахівці до сьогодні вирішують опосередковано — переважно шляхом дослідження стану індикаторів впливу магнітного поля (далі — *ІМП*). У випадках, коли за результатом дослідження стану ІМП зроблено висновок про його спрацювання, експерт визначається щодо наявності постійного магнітного поля, що, зі свого боку, дає підстави вважати існування впливу постійного магнітного поля на електромеханічний рахунковий механізм приладу обліку. Експертні дослідження, що проводяться за цим алгоритмом, концентруються на дослідженні будови ІМП та спроможності магнітної суспензії ІМП змінювати свою форму (попередній стан). Спеціальна література з дослідження станів ІМП та їх зміни відсутня. Дослідження спрацювання ІМП спирається на наукову й інженерну довідкову літературу з дослідження чи розрахунку магнітних полів. Загальні питання у дослідженні магнітних полів опрацьовано широким загалом математиків та інженерів на підставі законів фізики та, насамперед, узагальнень, які зробив Джеймс Максвелл і звів у систему рівнянь — відому, як система рівнянь Максвелла ¹. Поміж авторів, які створювали математичні моделі, що відтворюють фізичні процеси, що відбуваються в магнітних полях, слід згадати Дж. А. Стреттона та його «Теорію електромагнетизму» ², Л. Д. Ландау та Є. М. Ліфшица («Теорія поля») ³, Л. Д. Гольдштейна та М. В. Зернова («Електромагнітні поля та хвилі») ⁴, Ю. А. Гольдфайна («Векторний аналіз і теорія поля») ⁵. Тобто за відсутності спеціальних досліджень приладів обліку, що зазнали втручання від дії зовнішнього магнітного

¹ Максвелл Дж. К. Трактат об електричестві і магнетизм: в 2 т; пер. Б. М. Болотовського, И. Л. Бурштейна, М. А. Миллера, Е. В. Суворова. Москва, 1989. Т. 1. 417 с. Т. 2. 442 с.

² Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма; пер. М. С. Рабинович и В. М. Харитонов; под ред. проф. С. М. Рытова. Москва; Ленинград, 1948. 539 с.

³ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 4: Теория поля. Москва; Ленинград, 1941. 284 с.

⁴ Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва, 1971, 664 с.

⁵ Гольдфайн И. А. Векторный анализ и теория поля. Москва, 1968. 128 с.

поля, вплив цього поля на прилади обліку вирішується як дослідження спрацювання ІМП, яке, зі свого боку, спирається на органолептичний метод і (у разі застосування загальних відомостей про магнітне поле) опосередковано вирішує питання про роботу електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії під впливом магнітного поля.

Мета статті: дослідження роботи крокового двигуна електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії на побудованій дослідницькій моделі із застосуванням програмних засобів і математичного апарата (методу кінцевих елементів) для визначення механізму перешкоджання штатній роботі крокового двигуна під впливом дії на нього зовнішнього постійного магнітного поля, утвореного з метою безоблікового споживання електричної енергії.

Викладення основного матеріалу дослідження. ГОСТ 30207-94 ¹ передбачає можливість застосування електронних (статичних) лічильників ватт-годин з різною будовою лічильного механізму — як з електронною, так і з електромеханічною. Для виробників електронних лічильників встановлено певні вимоги, що мають бути реалізовані у конкретному конструктивному виконанні для уникнення впливу від зовнішніх чинників. Вимоги щодо електромагнітної сумісності, що пред'являють до лічильників, передбачають відсутність впливу електромагнітних завад поміж інших і від магнітного поля постійного та змінного струму. Зокрема, галузевим стандартом СОУ-Н МПЕ 40.1.35.110-2005 ² визначено такі вимоги: *«Лічильники повинні бути стійкими до впливу постійного магнітного поля, яке створюється постійним магнітом із поперечним перерізом не менше 5,0 см² та магнітною індукцією не менше 300 мТл на його полюсі»*. Наявність наведених нормативних вимог створює певні складнощі, що виникають під час виконання електротехнічних досліджень з визначення існування впливу постійного магнітного поля на досліджувані прилади обліку. У практиці судових електротехнічних експертиз визначення існування впливу постійного магнітного поля на досліджувані прилади обліку вирішують як дослідження спрацювання ІМП, що спирається на органолептичний метод і під час застосування загальних відомостей про магнітне поле опосередковано вирішує питання про роботу електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії під впливом магнітного поля. Проте, щодо ІМП існують інші нормативні вимоги Правил роздрібного ринку

¹ ГОСТ 30207-94 (МЭК 1036-90). Статические счетчики ватт-часов активной энергии переменного тока (классы точности 1 и 2). Чинний від 01.07.2001 р. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=56701 (дата звернення: 20.02.2020).

² СОУ-Н МПЕ 40.1.35.110-2005. Додаткові вимоги до засобів обліку електроенергії, спрямовані на запобігання несанкціонованому втручання в їх роботу. Чинний від 12.09.2005 р. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=28386 (дата звернення: 20.02.2020).

електричної енергії¹: *«Індикатори мають бути сертифіковані (атестовані у разі визначення лічильників із вмонтованим індикатором) в установленому порядку та мають фіксувати вплив на лічильник полів, силові характеристики яких перевищують такі порогові значення:*

- *для постійних магнітних полів — 100 мТл;*
- *для змінних магнітних полів — 30 мТл;*
- *для електричних полів — 5 кВ».*

Тобто в дослідженні (в частині існування впливу постійного магнітного поля на електромеханічний рахунковий механізм приладу обліку) не повинно застосовуватися значення силової характеристики постійного магнітного поля 100 мТл — вимоги, визначеної для ІМП. Виробники лічильників з електромеханічними рахунковими механізмами для уникнення впливу постійного магнітного поля з індукцією на поверхні корпусу цих лічильників у межах до 300 мТл від постійного магніту з площею полюса не менше ніж 5 см² застосовують принцип магнітного екранування, роль якого (як запобіжного конструктивного елемента) виконує кожух з феромагнітного матеріалу, що захищає кроковий двигун. У різних моделях приладів обліку для убезпечення впливу від дії інших джерел магнітного поля виробники вдаються до різних конструктивних рішень (зокрема, збільшення товщини магнітного екрана, застосування подвійного екранування крокового двигуна тощо). Необхідність магнітного екранування крокового двигуна від дії зовнішнього магнітного поля впливає з його будови та принципу роботи у складі приладу обліку.

Дослідження будови крокового двигуна приладу обліку та його роботи є важливим для подальшого дослідження механізму втручання в його роботу від дії зовнішнього магнітного поля, штучно утвореного з метою безоблікового споживання електричної енергії.

Крокові двигуни — це синхронні мікродвигуни, що перетворюють імпульсні електричні сигнали на механічне переміщення, пропорційне кількості імпульсів (звідси інша назва крокових двигунів — імпульсні двигуни). За конструкцією крокові двигуни мало чим відрізняються від синхронних двигунів. Загалом, будь-який синхронний двигун може працювати у кроковому режимі, але виробни, які випускають як крокові двигуни, оптимізовані під певні умови експлуатації та характеристики. М. П. Ермолін зазначає: *«У практиці застосування крокових двигунів використовують різні їх типи: трьох- і однофазні двигуни із зосередженими й розподіленими обмотками керування, з реактивним явнополюсним ротором без обмотки збудження й активним ротором з постійними магнітами»*².

¹ Правила роздрібного ринку електричної енергії: затв. Постановою НКРЕКП України від 14.03.2018 р. № 312 (зі змін та допов.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18> (дата звернення: 20.02.2020).

² Ермолін Н. П. Электрические машины малой мощности. Москва, 1967. С. 246.

Кроковий двигун з активним ротором, що збуджується постійними магнітами, має певні переваги, тому що дає змогу фіксувати та зберігати положення валу двигуна у вимкненому стані чи у стані тимчасової відсутності імпульсного сигналу.

О. А. Усольцев зазначає: *«Живлення обмоток статора може бути або однополярним, або двополярним. За однополярного живлення напруга на обмотках змінюється від 0 до $+U$, а за двополярного — від $-U$ до $+U$. Керування двигуном може здійснюватися короткими імпульсами з вимкненням живлення між командами на переміщення. Таке керування називається імпульсним. Воно вимагає фіксування положення ротора в інтервалі між імпульсами. Можливо також потенційне керування, за якого живлення статора зберігається між командами і ротор перебуває в певному фіксованому положенні. Необхідним елементом крокового двигуна є електронний комутатор, який перемикає обмотки за певним алгоритмом. Якщо в будь-яких двох сусідніх інтервалах між комутаціями до джерела живлення підключається однакова кількість обмоток статора, то такий алгоритм називається симетричним керуванням. В іншому разі керування називається несиметричним»¹.*

Із будови статичних ПО відомо, що вимірювання активної електричної енергії здійснюють шляхом аналого-цифрового перетворення електричних сигналів, що поступають від первинних перетворювачів сили струму і напруги ПО на вхід вбудованого аналого-цифрового перетворювача (далі — АЦП) мікроконтролера, який перетворює сигнали на послідовність цифрових імпульсів.

Подачу цих імпульсів здійснює керування кроковим двигуном, унаслідок чого відбувається дискретне обертання, тобто послідовне почергове повертання ротора на певний кут. Залежно від частоти імпульсів керування, відбувається фіксування цього обертання механічним суматором на декадних барабанах рахункового механізму ПО.

У приладах обліку електричної енергії застосовують крокові двигуни, які мають спрощену конструкцію та у своєму складі мають тільки одну обвитку (фазу). Наведене вимагає застосування складнішого несиметричного імпульсного керування. Дискретну форму сигналу керування обвиткою крокового двигуна наведено на осцилограмі, яку зафіксовано у фотозображенні (див. Рис. 1).

Як зазначає Н. П. Єрмолін, максимальний електромагнітний момент дискретного обертання або повороту ротору крокового двигуна на певні кути, які залежать від форми та частоти сигналу (імпульсу) електричного струму (що ми зазначали раніше) є величина, пропорційна добутку діючого значення електричного струму та значення магнітного потоку.

¹ Усольцев А. А. Электрические машины автоматических устройств: учеб. пособ. Санкт-Петербург, 2011. С. 155.

Рис. 1. Форма сигналу керування кроковим двигуном приладу обліку типу НІК 2102-02 за певного рівня споживання електричної енергії

Зрозуміло, що підсилення сигналу керування (величини електричного струму або магнітного потоку) шляхом застосування ротора з матеріалу, який має більше значення залишкової індукції, є неприйнятними заходами, адже значення динамічного моменту для крокового двигуна приладу обліку не має бути значним і практично цілком урівноважуватися моментом механічного супротиву у будь-яких режимах обрахування спожитої електричної енергії. Нехтування цією умовою та надмірне збільшення електромагнітного моменту, з одного боку, підвищує чутливість лічильного механізму, з другого — збільшує похибку приладу обліку під час обрахування обсягу спожитої електричної енергії за умови значного електричного навантаження в електроустановці споживача або в перехідних режимах (коли змінюється потужність навантаження) через значний вплив інерційності електромеханічної системи електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії.

Це, зі свого боку, вимагає застосування іншого, складнішого алгоритму керування кроковим двигуном із застосуванням імпульсів, що створюють гальмівний момент, а також збільшують споживання електричної енергії приладом обліку на власні потреби. Тобто значення електромагнітного моменту крокового двигуна не має бути надмірно великим і певним чином узгоджуватися зі значенням моменту механічного супротиву. Зазначене залишає єдиним прийнятним способом для запобігання втручання у роботу статичного приладу обліку з електромеханічним рахунковим механізмом від дії зовнішнього постійного магнітного поля застосування магнітного екрана. Втручання в роботу крокового двигуна електромеханічних

рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії шляхом штучного утворення зовнішнього постійного магнітного поля під час наближення до крокового двигуна постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії полягає у появі сили одностороннього магнітного тяжіння, прикладеної до полюса ротора крокового двигуна, яка діє в напрямку зовнішнього постійного магніту.

Відомо, що сила магнітного тяжіння постійного магніту до феромагнітних матеріалів пропорційна добутку квадрату магнітної індукції та площі (перерізу) полюса постійного магніту¹. Саме тому ці параметри нормативно обмежені галузевим стандартом СОУ-Н МПЕ 40.1.35.110-2005. Результатом утворення зовнішнього постійного магнітного поля під час наближення до крокового двигуна постійного магніту з високим значенням залишкової індукції є виникнення порівняно великої за значенням сили тяжіння.

Зазначена сила тяжіння, що прикладена до ротора крокового двигуна ПО, є односторонньою та додатковою складовою загального моменту супротиву, подолання якого не передбачено штатною роботою крокового двигуна, наслідком чого є невідповідний облік спожитої електричної енергії чи навіть неможливість виконання обліку через повне блокування роботи (обертання) електромеханічної системи електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії.

Принцип роботи за конструктивною будовою крокового двигуна електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії досліджено на прикладі крокового двигуна приладу обліку моделі НІК 2102-02 виробника *Nik* та приладу обліку моделі Ф 68700В виробника «Енергомера».

Рис. 2. Електромеханічний рахунковий механізм і кроковий двигун ПО НІК 2102-02 (фронтальне та бокове зображення конструктивного виконання)

¹ Сливинская А. Г. Электромагниты и постоянные магниты. Москва, 1972. С. 152—156.

Рис. 3. Електромеханічний рахунковий механізм і кроковий двигун
ПО Ф 68700В (фронтальне та бокове зображення
конструктивного виконання)

Загальний вигляд електромеханічних рахункових механізмів і крокових двигунів цих моделей ПО наведено на малюнках (Рис. 2 та 3 відповідно). У подальшому дослідженні кроковий двигун ПО Ф 68700В під час лабораторних досліджень розібрали. Конструктивні розміри виміряли із застосуванням вимірювальних приладів з ціною поділки 0,01 мм.

Рис. 4. Складові деталі та вузли крокового двигуна ПО Ф 68700В

Рис. 5. Комп'ютерна тривимірна модель крокового двигуна ПО Ф 68700В
(полімерні деталі корпусних елементів не показано)

Застосовуючи графічний редактор, виконали креслення й побудували тривимірну модель крокового двигуна у реальному масштабі. Зовнішній вигляд деталей крокового двигуна ПО Ф 68700В та тривимірної моделі наведено на Рис. 4 та 5.

Існує обґрунтування можливості розв'язання завдань судової експертизи, які пов'язані з необхідністю визначення параметрів електромагнітного поля методом моделювання із застосуванням програмного забезпечення *Finite Element Method Magnetics (FEMM)*, магнітні розрахунки методом

кінцевих елементів). Програмний пакет *FEMM* є пакетом для аналізу кінцевих елементів з відкритим початковим кодом для розв'язання саме електромагнітних завдань¹. У програмі можна вирішувати двовимірні плоскі й тривимірні симетричні вздовж вісі лінійні й нелінійні гармонійні низькочастотні магнітні та магнітостатичні завдання, лінійні електростатичні завдання тощо. Це простий, точний програмний продукт, поширюваний безкоштовно (наприклад, з освітньою метою або для використання у складі некомерційних пакетів програмного забезпечення). *FEMM* має вільну громадську ліцензію *Aladdin (Aladdin Free Public License)*. Ця ліцензія не допускає стягування плати за поширення й забороняє комплектувати програми, що випускаються на її умовах, із будь-чим, за що стягується плата (доступ для завантаження з офіційного сайту: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>)².

Суть методу кінцевих елементів (далі — *МКЕ*) впливає з його назви. Область, у якій винаходиться рішення диференціальних рівнянь, розбивають на кінцеву кількість підобластей (елементів). У кожному з елементів довільно обирають вид апроксимуючої функції, що дає змогу визначити точність розрахунку. Поза своїм елементом вибрана до застосування функція апроксимації дорівнює нулю. Значення функцій на межі елементів та у вузлах, що утворено цими межами, є розв'язанням задачі. Коефіцієнти функцій апроксимації слід шукати, наприклад, з умови рівності значення сусідніх функцій на межах між елементами чи вузлами. На наступному етапі зазначені коефіцієнти виражають через значення функцій у вузлах елементів. Складають систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах, на яких визначено розв'язання системи, прямо пропорційно кількості елементів і обмежено тільки можливостями комп'ютера. Оскільки кожен з елементів пов'язаний з обмеженою кількістю сусідніх, система лінійних алгебраїчних рівнянь також є обмеженою у кількості, що істотно спрощує рішення, тому що воно пов'язане з поділом на елементи. Розміром елементів визначено точність розв'язання поставленої задачі.

Дослідницька задача з визначення механізму втручання в роботу кротокового двигуна електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії шляхом штучного утворення зовнішнього постійного

¹ Роголін С. В. Математичне моделювання вихрового поля та визначення його характеристик методом кінцевих елементів програмними засобами обчислення у дослідженні індикаторів магнітного поля при вирішенні діагностичних завдань судової експертизи розрахункових приладів обліку, що зазнали втручання від впливу постійного або повільно змінного магнітного поля//*Актуальні питання судової експертизи і криміналістики*: зб. мат-лів Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 150-річ. з дня народж. Засл. проф. М. С. Бокаріуса (Харків, 18—19.04.2019). Харків, 2019. С. 346—348.

² Finite Element Method Magnetics/Website Aladdin Enterprises. URL: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (дата звернення: 29.02.2020).

магнітного поля від наближення до ПО постійного магніту вирішують методом кінцевих елементів у двовимірній постановці задачі на базі відтвореної тривимірної геометричної моделі крокового двигуна ПО типу Ф 68700В із застосуванням програмного комплексу *FEMM*. Механізм втручання визначають під час порівняння результатів чисельно-польового аналізу розподілення силових магнітних ліній магнітостатичного поля в умовах відсутності зовнішнього постійного магнітного поля, коли існує тільки робоче магнітне поле крокового двигуна, та в умовах, коли робоче магнітне поле крокового двигуна зазнає впливу через існування постійного магнітного поля, утвореного наближенням постійного магніту з високими значеннями максимальної питомої енергії.

У досліджуваній моделі таким постійним магнітом, що створює зовнішнє магнітне поле, обрано постійний магніт зі сплаву Неодим-Залізо-Бор марки $NdFeB_{40}MGOe$. За результатами вимірювання магнітної індукції на поверхні ротора крокового двигуна, узятото за аналог у дослідженні, визначено марку постійного магніту, що створює робочий магнітний потік. У дослідницькій моделі марку постійного магніту *Alnico 6* ротора крокового двигуна вибрано завдяки збігу значення індукції магнітного поля на поверхні ротора крокового двигуна зі сплаву *Alnico 6*, визначеного розрахунковим шляхом у розімкненому контурі (вільному розташуванні в повітряному просторі), та значення індукції магнітного поля на поверхні ротора крокового двигуна ПО Ф 68700В, отриманого шляхом вимірювання в лабораторних умовах.

У досліджуваній моделі постійний магніт марки $NdFeB_{40}MGOe$, що створює зовнішнє магнітне поле, має такі характеристики: магнітна проникність постійного магніту за координатними осями $\mu_x = 1,049$ Гн/м, $\mu_y = 1,049$ Гн/м; коерцитивна сила $H_C = 979000$ А/м; індукція залишкової намагніченості $B_R = 1,2$ Тл. Розміри постійного магніту — 30×15 мм. Магнітна вісь постійного магніту має спрямування за товщиною постійного магніту (за розміром 15 мм).

Постійний магніт марки *Alnico 6*, що створює робочий магнітний потік крокового двигуна, має такі характеристики: магнітна проникність постійного магніту за координатними осями $\mu_x = 3,3$ Гн/м, $\mu_y = 3,3$ Гн/м; коерцитивна сила $H_C = 59907$ А/м; індукція залишкової намагніченості $B_R = 0,9$ Тл¹. Розміри постійного магніту — діаметр 6,65 мм. Ротор крокового двигуна дво полюсний. Вал ротора з магнітом'якої сталі виконує також функцію ярма, через яке замикаються силові магнітні лінії робочого магнітного потоку.

Геометричні моделі для чисельно-польового аналізу крокового двигуна ПО типу Ф 68700В для двох порівняльних задач в умовах відсутності зовнішнього постійного магнітного поля, коли існує тільки робоче магнітне

¹ Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. Постоянные магниты: справочник/под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 1980. 488 с.

поле крокового двигуна, і в умовах, коли робоче магнітне поле крокового двигуна зазнає втручання через існування постійного магнітного поля, утвореного наближенням постійного магнітного магніту, наведено на Рис. 6 і 7 відповідно.

Геометричну модель Рис. 7 побудовано для випадку, коли перешкоджання відповідній роботі крокового двигуна має найбільший вплив на його роботу, а саме для випадку наближення зовнішнього постійного магніту з боку ротора крокового двигуна.

На Рис. 6 і 7 позначено мітки блоків цих моделей, а саме: повітряний простір, магнітопровід крокового двигуна, постійний магніт ротору крокового двигуна, обвитку крокового двигуна, магнітний екран та зовнішній постійний магніт.

Рис. 6. Геометрична модель крокового двигуна для чисельно-польового аналізу

Блокам, позначеним на рисунках, задано певні фізичні властивості шляхом внесення параметрів застосованих матеріалів для проведення розрахунків (зокрема, для повітря, марки сталі магнітопроводу крокового двигуна та магнітного екрана, марки постійного магніту ротору крокового двигуна та зовнішнього постійного магніту, міді обвитки крокового двигуна). Задано миттєве значення та напрямок електричного струму обвитки, напрямок намагнічування для зовнішнього постійного магніту та миттєве значення напрямку намагнічування ротора крокового двигуна.

Рис. 7. Геометрична модель крокового двигуна для чисельно-польового аналізу за умови наближення зовнішнього постійного магніту

У зазначених геометричних моделях задано контури розділу середовищ (матеріалів) та обмежені граничні умови для магнітостатичної задачі (застосовано граничні умови Діріхле). Останнє означає, що за заданих зовнішніх меж моделі у площині симетрії за умови, що силові лінії магнітного поля так би мовити обтікають перешкоду (зовнішні межі, розмір яких визначив дослідник для вирішення завдання шляхом розв'язання систем диференціальних рівнянь) у разі нульової граничної умови Діріхле, $\epsilon B_n = 0$, тобто нормальна складова індукції дорівнює нулю. На Рис. 7 геометричну модель крокового двигуна для чисельно-польового аналізу під час наближення зовнішнього постійного магніту наведено збільшено без зовнішніх меж.

Під час роботи вирішувача FEMM в автоматичному режимі обчислено параметри моделі й побудовано сітку кінцевих елементів. Для випадку штатної роботи крокового двигуна побудовано сітку із 24 189 елементів для 12 244 вузлів. Після закінчення розрахунків і запуску в роботу постпроцесора створено картину стаціонарного магнітного поля у вигляді силових ліній робочого магнітного потоку моделі крокового двигуна досліджуваного ПО. На Рис. 8 наведено картину розподілення індукції магнітного поля робочого магнітного потоку під час роботи крокового двигуна у штатному режимі. Картину поля на малюнку відображено у кольорі. Силові параметри поля за кольором слід оцінювати кількісно за наведеною на малюнку градієнтною шкалою. Кольори градієнтної шкали відносні та застосовані тільки для Рис. 8.

Рис. 8. Картина розподілення індукції магнітного поля робочого магнітного потоку під час роботи крокового двигуна у штатному режимі

Для випадку роботи крокового двигуна під час наближення до нього зовнішнього постійного магніту побудовано сітку з 25355 елементів для 12836 вузлів.

Після завершення розрахунків і запуску в роботу постпроцесора створено картину стаціонарного магнітного поля у вигляді силових ліній магнітного поля моделі крокового двигуна досліджуваного ПО, який зазнав втручання в роботу під дією магнітного поля постійного магніту під час його наближення.

На Рис. 9 наведено картину розподілення індукції магнітного поля сумарного магнітного потоку від ротора крокового двигуна (робочий магнітний потік збудження) і магнітного потоку зовнішнього постійного магніту з високим значенням питомої енергії. Картину поля на малюнку відображено в кольорі.

Силові параметри поля за кольором слід оцінювати кількісно за наведеною на малюнку градієнтною шкалою. Кольори градієнтної шкали відносні та застосовані тільки для Рис. 9.

За результатами чисельно-польового аналізу розподілення силових магнітних ліній магнітостатичного поля виконано порівняння двох досліджуваних випадків в умовах відсутності зовнішнього постійного магнітного поля, коли існує тільки робоче магнітне поле крокового двигуна, і в умовах, коли робоче магнітне поле крокового двигуна зазнає втручання від дії постійного магнітного поля, утвореного наближенням постійного магніту з високими значеннями максимальної питомої енергії з площею полюса понад 5 cm^2 та зі значенням індукції магнітного поля понад 300 мТл на поверхні його полюса.

Рис. 9. Картина розподілення індукції магнітного поля сумарного магнітного потоку від робочого магнітного потоку збудження крокового двигуна та магнітного потоку зовнішнього постійного магніту з високим значенням питомої енергії

Визначено механізм втручання у роботу крокового двигуна, а також силові характеристики магнітного поля у конструктивних елементах крокового двигуна ПО для обох порівняльних випадків. Дослідження проміжного випадку, коли робоче магнітне поле крокового двигуна зазнає втручання від дії постійного магнітного поля, утвореного наближенням постійного магніту з площею полюса до 5 cm^2 та зі значенням індукції магнітного поля до 300 мТл на поверхні його полюса, наведено тільки у висновках.

Висновки. Підсумовуючи, за проведеним дослідженням можемо дійти таких висновків.

У штатному режимі роботи крокового двигуна силові магнітні лінії робочого магнітного потоку практично повністю замикаються за магнітопроводом крокового двигуна. Певна частина силових магнітних ліній робочого магнітного потоку збудження замикається в магнітному екрані крокового двигуна приладу обліку. Середнє значення індукції магнітного поля у стінках екрана становить приблизно $0,45 \text{ Тл}$, максимальне значення індукції в екрані не перевищує значення $0,7 \text{ Тл}$. У зовнішньому просторі, за межами магнітного екрана крокового двигуна, магнітне поле можна вважати відсутнім.

Під дією постійного магнітного поля, утвореного наближенням до крокового двигуна приладу обліку постійного магніту з площею полюса до 5 cm^2 та зі значенням індукції магнітного поля до 300 мТл на поверхні його полюса, у магнітному екрані крокового двигуна відбувається розділення магнітного потоку на два окремі. Перший — робочий магнітний потік —

практично без змін замикається в межах магнітопроводу крокового двигуна та частково в межах магнітного екрана. Другий магнітний потік, утворений від зовнішнього постійного магніту з означеними параметрами, проходить у тілі магнітного екрана та далі замикається у повітрі. Незначна частина силових магнітних ліній проходить магнітною системою крокового двигуна. При цьому робота крокового двигуна є відповідною до форми та величин імпульсного сигналу керування. Похибка визначення обсягу спожитої енергії ПО може збільшуватися, але не перевищує гранично допустимого значення. У цьому разі може відбуватися магнітне насичення окремих ділянок сторони екрана крокового двигуна з боку наближення зовнішнього постійного магніту до максимальних значень 1,7—1,9 Тл та обов'язкове спрацювання індикатора магнітного поля за умови досягнення величини індукції магнітного поля значення понад 100 мТл. Центральна ділянка сторони екрана крокового двигуна з боку наближення зовнішнього постійного магніту залишається ненасиченою. Розподілення індукції магнітного поля під полюсами залишається симетричним.

Під дією постійного магнітного поля, утвореного наближенням до крокового двигуна приладу обліку постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії з площею полюса понад 5 см^2 та зі значенням індукції магнітного поля понад 300 мТл, на поверхні його полюса картина силових магнітних ліній поля змінюється.

Робоче магнітне поле крокового двигуна спотворюється. Розподілення силових магнітних ліній поля за сторонами магнітного екрана нерівномірне. Розподілення силових магнітних ліній поля за наконечниками полюсів, за полюсами та сторонами ярма протилежної полярності у магнітній системі крокового двигуна втрачає симетрію. Під час порівняння значень індукції магнітного поля в окремих відповідних ділянках протилежної полярності у магнітопроводі крокового двигуна спостерігається відмінність симетрії від 10 до 200 %. Несиметрія магнітного поля у магнітній системі крокового двигуна зменшує значення електромагнітного моменту.

Напрямки намагнічування ротора крокового двигуна та зовнішнього постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії збігаються, коли наближення зовнішнього постійного магніту відбувається за нормаллю до поверхні приладу обліку.

Під час наближення до крокового двигуна постійного магніту з високим значенням залишкової індукції, виникає порівняно велика за значенням сила тяжіння, яка залежить від площі полюса (поперечного перерізу) постійного магніту та квадрату індукції магнітного поля на його поверхні. Зазначена сила тяжіння, що прикладена до ротора крокового двигуна ПО, є односторонньою та є додатковою складовою загального моменту супротиву, подолання якого не передбачено штатною роботою крокового двигуна для значень площі полюса ПМ понад 5 см^2 та значення індукції магнітного поля понад 300 мТл на його поверхні.

Наслідком зменшення електромагнітного моменту крокового двигуна та виникнення одностороннього магнітного тяжіння є невідповідний облік спожитої електричної енергії чи навіть неможливість виконання обліку через повне блокування роботи (обертання) електромеханічної системи електромеханічних рахункових механізмів приладів обліку електричної енергії. Конструктивно подолати явище зазначеного впливу неможливо шляхом збільшення максимального моменту крокового двигуна приладу обліку, а тільки шляхом магнітного екранування і/або збільшення відстані від корпусу ПО до крокового двигуна.

Центральна ділянка сторони магнітного екрана крокового двигуна, що є наближеною до полюса постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії, є ненасиченою та створює сприятливі умови для проходження магнітного потоку від цього постійного магніту до магнітопроводу (полюсів) і ротору крокового двигуна. Під час віддалення від центральної частини цієї сторони магнітного екрана, насичення екрана збільшується до значень, що можуть перевищувати значення 2 Тл. Бічні сторони магнітного екрана крокового двигуна насичуються нерівномірно та у зворотній залежності до насичення бічних сторін магнітної системи крокового двигуна. Збільшення магнітного потоку впливу призводить до подальшого магнітного насичення окремих ділянок магнітного екрана — до появи явища витиснення частини магнітного потоку у повітряний простір, але не сприяє насиченню центральної ділянки сторони магнітного екрана крокового двигуна, що є наближеною до полюса постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії, що підтримує умови існування сили одностороннього тяжіння ротора крокового двигуна та його фіксування (залипання).

Фіксування положення ротора крокового двигуна (залипання) залежить від орієнтування у просторі наближеного до приладу обліку зовнішнього постійного магніту з площею полюса понад 5 см^2 зі значенням індукції магнітного поля понад 300 мТл, та не залежить від частоти, форми й величини імпульсного сигналу керування кроковим двигуном. Зміна імпульсного сигналу керування кроковим двигуном, що залежить від величини споживання електричної енергії, не призводить до кутового повороту валу крокового двигуна, тобто роботу крокового двигуна приладу обліку блокує постійне магнітне поле, штучно утворене від наближеного до приладу обліку зовнішнього постійного магніту з високим значенням максимальної питомої енергії з метою безоблікового споживання електричної енергії.

References

- Altman, A. B., Gerberg, A. N., Gladyshev, P. A. i dr. (1980). *Postoiannye magnity: spravochnik*. Iu. M. Piatin (ed.). 2-e izd., pererab. i dop. Moscow [in Russian].
- Ermolin, N. P. (1967). *Elektricheskie mashiny maloi moshchnosti*. Moscow [in Russian].
- Finite Element Method Magnetics*/Website Aladdin Enterprises. Menlo Park, California, USA. URL: <http://www.femm.info/wiki/HomePage> (data zvernennia: 29.02.2020).
- Goldfain, I. A. (1968). *Vektorny analiz i teoriia polia*. Moscow [in Russian].

- Goldshtein, L. D., Zernov, N. V. (1971). *Elektromagnitnye polia i volny*. Izd. 2-e, pererab. i dop. Moscow [in Russian].
- GOST 30207-94 (MEK 1036-90). *Staticheskie schetchiki vatt-chasov aktivnoi energii peremennogo toka (klassy tochnosti 1 i 2)*. Chinnii vid 01.07.2001 r. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=56701 (data zvernennia: 20.02.2020) [in Russian].
- Landau, L. D., Lifshits, E. M. (1941). *Teoreticheskaia fizika*. T. 4: Teoriia polia. Moscow; Leningrad [in Russian].
- Maksvell, Dzh. K. (1989). *Traktat ob elektrichestve i magnetizme*: v 2 t; per. B. M. Bolotovskogo, I. L. Burshteina, M. A. Millera, E. V. Suvorova. Moscow. T. 1. T. 2. [in Russian].
- Pravyly rozdrubnogo rynku elektrychnoi enerhii*: zatv. Postanovoioi NKREKP Ukrainy vid 14.03.2018 r. № 312 (zi zmin. ta dopov.). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18> (data zvernennia: 20.02.2020) [in Ukrainian].
- Rohalin, S. V. (2019). Matematychni modeliuvannia vykhrovoho polia ta vyznachennia yoho kharakterystyk metodom kintsevykh elementiv prohramnymy zasobamy obchyslennia u doslidzhenni indykatoriv mahnitnoho polia pry vyrishenni diahnostychnykh zavdan sudovoi ekspertyzy rozrakhunkovykh prykladiv obliku, shcho zaznaly vtruchannia vid vplyvu postiinoho abo povilno zminnoho mahnitnoho polia. *Aktualni pytannia sudovoi ekspertyzy i kryminalistyky*: zb. materialiv Mizhnar. nauk.-prakt. konf., prysviach. 150-richchiu z dnia narodzhennia Zasl. prof. M. S. Bokariusu (Kharkiv, 18—19.04.2019). Kharkiv [in Ukrainian].
- Slivinskaia, A. G. (1972). *Elektromagnity i postoiannye magnity*. Moscow [in Russian].
- SOU-N MPE 40.1.35.110-2005. *Dodatkovy vymohy do zasobiv obliku elektroenerhii, spriamovani na zapobihannia nesanktsionovanomu vtruchanniu v yikh robotu*. Chynnyi vid 12.09.2005 r. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=28386 (data zvernennia: 20.02.2020) [in Ukrainian].
- Stretton, Dzh. A. (1948). *Teoriia elektromagnetizma*; per. M. S. Rabinovich i V. M. Khari-tonova; pod red. prof. S. M. Rytova. Moscow; Leningrad [in Russian].
- Usoltcev, A. A. (2011). *Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroistv*: ucheb. posob. Sankt-Peterburg [in Russian].

И. В. Богданюк, С. В. Рогалин, В. С. Супрун

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИБОРОВ УЧЁТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СОЗДАННОГО С ЦЕЛЮ БЕЗУЧЁТНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Исследование фактов и обстоятельств безучётного потребления электрической энергии в практике проведения электротехнических судебных экспертиз относится к наиболее распространённым. Исследование влияния постоянного магнитного поля на работу электромеханических счётных механизмов приборов учёта электрической энергии является одним из направлений электротехнических исследований, где отсутствует научно-практическая проработка в судебной электротехнической экспертизе. Задачи, которые решает судебная электротехническая экспертиза

приборів учёта, подвергшихся вмешательству в их работу из-за влияния внешнего постоянного магнитного поля, до сих пор решается опосредованно, преимущественно путём исследования состояния индикаторов воздействия магнитного поля.

Цель статьи заключается в исследовании механизма вмешательства в работу шагового двигателя электромеханических счётных механизмов приборов учёта электрической энергии при воздействии внешнего магнитного поля, искусственно созданного с целью безучётного потребления электрической энергии.

В статье исследовано строение шагового двигателя электронно-механических приборов учёта электрической энергии. Построена исследовательская модель шагового электродвигателя. Выполнен анализ распределения силовых магнитных линий в магнитной системе и магнитном экране шагового двигателя от действия внешнего магнитного поля, искусственно созданного с целью безучётного потребления электрической энергии, и в условиях отсутствия такого влияния на основании моделирования с применением программных средств и математического аппарата — метода конечных элементов. Определён механизм вмешательства в штатную работу шагового двигателя счётного механизма при приближении к прибору учёта внешнего постоянного магнита с высоким значением максимальной удельной энергии с целью безучётного потребления электрической энергии.

Ключевые слова: постоянное магнитное поле, индикатор магнитного поля, индукция магнитного поля, шаговый двигатель, импульсное управление, магнитная система, магнитное экранирование, постоянный магнит, распределения силовых магнитных линий, предельное значение индукции блокировки.

I. Bohdaniuk, S. Rohalin, V. Suprun

**RESEARCH ON WORK OF A STEPPER MOTOR
OF ELECTRICITY METERS UNDER THE INFLUENCE
OF AN EXTERNAL PERMANENT MAGNETIC FIELD CREATED
WITH THE PURPOSE OF UNCOUNTED CONSUMPTION
OF ELECTRIC ENERGY**

*Research on facts and circumstances of electrical energy uncoun-
ted consumption in the practice of conducting electrical engineering forensic
examination is one of the most common. Study of the influence of a permanent
magnetic field on operation of the electromechanical electricity meters is one
of the areas of electrical engineering research, where scientific and practical
analysis is absent in electrical engineering forensic examination. The tasks solved
by electrical engineering forensic examination of electricity meters subjected to
interference in their work due to the influence of an external permanent magnetic
field are still being solved indirectly, mainly by examining the state of indicators
of the effect of a magnetic field.*

The Article purpose is to determine the mechanism of interference in the operation of a stepper motor of electromechanical electricity meters of energy accounting meters under the influence of an external magnetic field artificially developed to disregard the consumption of electric power.

The article examines the structure of a stepper motor of electronic-mechanical devices metering electric power. A research model of a stepper motor is built. The analysis of distribution of force magnetic lines in the magnetic system and in the magnetic shield of a stepper motor as a result of influence of an external magnetic field artificially created for the purpose of uncounted consumption of electric power in the absence of such an effect on the basis of modeling with the use of software and a mathematical apparatus: the finite element method. The mechanism of interference in the regular operation of a stepper motor of electricity meter is determined when approaching the metering device of an external permanent magnet with a high value of maximum specific energy in order to consume electric power negligently.

Keywords: permanent magnetic field, magnetic field indicator, magnetic field induction, stepper motor, pulse control, magnetic system, magnetic shielding, permanent magnet, distribution of force magnetic lines, limiting value of blocking induction.

Надійшла до редколегії 06.07.2020

Богданюк І. В., Роголін С. В., Супрун В. С. Дослідження роботи крокового двигуна приладів обліку електричної енергії під впливом дії зовнішнього постійного магнітного поля, утвореного з метою безоблікового споживання електричної енергії. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики* : зб. наук. пр. / редкол.: О. М. Ключев, В. Ю. Шепітько та ін. Харків : Право, 2020. Вип. 22. С. 442—460. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2.2020.36>.