

# Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зуба колеса залежно від форми індуктора

О. Т. Дубініна<sup>1</sup> • В. В. Медведєв<sup>1</sup>

Received: 4 October 2024 / Revised: 2 December 2024 / Accepted: 12 December 2024

**Анотація.** Дослідження спрямовані на визначення оптимальної форми індуктора для обробки зубів великогабаритного зубчастого колеса магнітно-імпульсною обробкою. В роботі вивчається розподіл напруженості магнітного поля вздовж площі зуба колеса, залежно від типу індуктора. Це необхідно для того щоб спрогнозувати розподіл змін в структурі металу, викликаних МІО, та їх вплив на зносостійкість колеса. Головним завданням дослідження є встановлення залежності показників напруження магнітного поля від форми та довжини індуктора. Виявлення необхідності наявності або відсутності сердечника.

Розглянуто два типи індукторів: перший евольвентної форми одягається на зуб колеса, другий – розташовується у западині поміж зубів колеса. Розрахунок розподілу напруженості магнітного поля було проведено за допомогою програмного пакету ANSYS Maxwell.

В результаті проведених досліджень було виявлено, що найбільш ефективним для проведення магнітно-імпульсної обробки є індуктор першого типу, який надягається на зуб колеса. Середні значення величини напруженості магнітного поля становлять 330–380 кА/м, що є достатнім для структурних змін поверхневого шару металу по всій площі робочої поверхні зуба. Індуктор другого типу, довжина якого відповідає ширині зубчастого вінця є малоефективним. Оскільки величина напруженості магнітного поля згенерованого ним в робочій зоні колеса сягає лише 29–67 кА/м та не призводить до структурних змін поверхневого шару металу. Збільшення довжини, а також використання сердечників круглої та трикутної форм не дало суттєвих змін величини напруженості. Також визначено, що перспективним є використання укороченого індуктора другого типу. При подальших дослідженнях оптимальної довжини індуктора, рекомендується вивчити напрямок, та з'ясувати чи можна обробляти зубчасте колесо шляхом покрокового переміщення індуктора вздовж робочої поверхні зуба.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна обробка, індуктор, напруженість магнітного поля, зубчасте колесо, магнітна індукція.

## Вступ

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є одним з прогресивних методів обробки матеріалів в сучасному машинобудуванні. Порівняно з термічними методами такими як цементация, азотування, та інші це один з найдешевших методів зміцнення металу, оскільки обробка здійснюється за допомогою електричного струму, не потребує дорогого обладнання та оснастки. За допомогою МІО зміцнюють: різальний інструмент, різьбові з'єднання, муфти, пружини, зубчасті та черв'ячні передачі, та інші деталі [1], відносно невеликих розмі-

рів, які дозволяють розмістити їх у середині стандартного циліндричного індуктора. У зв'язку з цим більшість існуючих досліджень МІО зосереджені на обробці малогабаритних деталей. Разом з тим МІО великогабаритних деталей маловивчена, що підтверджує аналіз літературних джерел. Основною проблемою використання усталених методів МІО для зміцнення деталей великих розмірів є необхідність створення великогабаритних індукторів, які потребуватимуть великих енергетичних потужностей. Це викликає потребу у значних інвестиціях на етапі впровадження МІО у виробництво та призводить до здорожчання процесу обробки, що вже не робить МІО економічно вигіднішим методом у порівнянні з іншими.

Вирішенням цієї проблеми може стати обробка не всіх поверхонь великогабаритної деталі, а тільки тих її частин, які сприймають найбільші навантаження під час роботи.

✉ О. Т. Дубініна  
olhadubinina777@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Так, для зміцнення робочої поверхні зуба великогабаритного зубчастого колеса пропонується проводити обробку частинами, а саме, окремо кожен зуб, за допомогою експериментального індуктора евольвентної форми, який надягається на зуб, або одночасно дві сторони сусідніх зубів, коли індуктор розташовується у западині поміж зубів колеса.

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Зубчасті передачі відносяться до деталей машин, що піддаються значним циклічним навантаженням. В умовах високих окружних швидкостей і передатних потужностей зубчасті передачі повинні володіти відповідними властивостями міцності. Об'єктивним критерієм оцінки міцності є згинальна та контактна витривалість зубів [2].

Типові пошкодження робочих поверхонь зубчастих передач визначаються конструкцією та особливостями експлуатації. Сили, що діють на зуби, викликають вигин, стиск та тангенціальні деформації за рахунок тертя в зоні контакту. Циклічна зміна цих сил, а також згинальні та контактні напруги, викликані цими силами, є причиною поломки зубів і втомного викришування їх робочої поверхні. Тертя, що виникає в зоні контакту зубів, викликає знос та заїдання [3].

Для підвищення якості поверхневого шару та експлуатаційних характеристик зубчастих коліс у промисловості застосовують різні методи технологічного забезпечення якості: термічне загартування, пластичне деформування, напилення та комбіновані методи. Магнітно-імпульсна обробка представляє собою прогресивну технологію фінішної зміцнювальної обробки металів. Відмінною особливістю є дешевизна метода, однак обробка великогабаритних коліс майже не вивчена.

Наукова література містить описи методів підвищення якості поверхневого шару дрібно модульних коліс за допомогою магнітно-імпульсної обробки. В джерелі [4] наведені результати досліджень впливу МІО на показники зносостійкості зубчастого колеса зі сталі 40, з модулем 0,3 розташованими у порожнині соленоїда.

На (рис. 1 *a*) показана фотографія зуба зубчастого колеса до зносу, та після зносу (рис. 1 *б*).

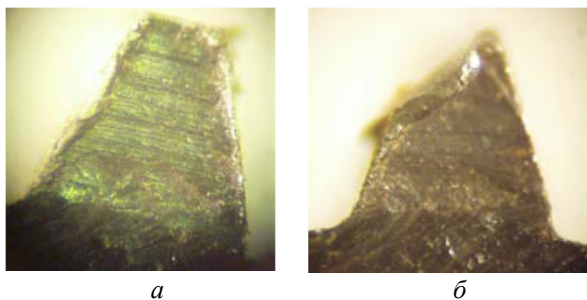


Рис. 1. Фотографія зуба до зносу (*a*), та після зносу (*б*) [4]

За результатами випробувань було відмічено, що профіль зуба змінився після 50 годин напрацювання (почала руйнуватися верхня кромка), а після 70 годин напрацювання зубчасте колесо стало непридатним для подальшої експлуатації.

На рис. 2 *a* показаний профіль зуба зубчастого колеса, обробленого імпульсним магнітним полем до зносу, та після 70 годин роботи (рис. 2 *б*). Як видно зі знімків, профіль зуба практично не змінився.

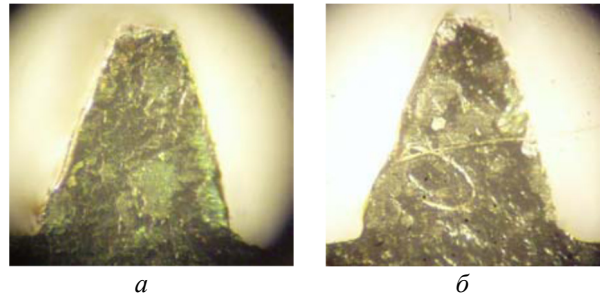


Рис. 2. Фотографія зуба зміцненого імпульсною магнітною обробкою до зносу (*a*), та після зносу (*б*) [4]

У роботі [5] наводяться відомості про обробку магнітно-імпульсним полем (МІП) зубчастих коліс та шестерень. Обробка проводилася за трьома схемами: при вільному переміщенні коліс у порожнині соленоїда, локальній обробці коліс по контуру, профільній обробці коліс великого діаметра. Сталеві колеса оброблялися при напруженості поля 300–650 кА/м та імпульсі 0,2–0,6 с, а зі сплавів міді та титану – 800–1500 кА/м та імпульсі 0,5–1,0 с. Досліди показали, що магнітно-імпульсна обробка підвищує стійкість зубчастих коліс у 1,2–2 рази.

Відомо про авторське свідоцтво СРСР № 1500683, кл. С 21 D 1/04, 1989, (54) спосіб магнітної обробки зубчастих коліс [6]. Свідоцтво містить інформацію про спосіб зняття залишкових внутрішніх напруг, що з'являються в зубчастих колесах, за допомогою впливу магнітним полем, обробка проводилася поетапно. Спочатку впливу магнітного поля двох полярностей піддали торцеві поверхні зубчастого вінця, потім впливу магнітного поля однієї полярності піддали бічні поверхні зубів, після цього колеса витримали на неметалевих стелажах.

Автори роботи [7] стверджують, що для обробки магнітно-імпульсним полем, яке зменшує обсяг дефектів суцільності, можна використовувати індуктори аналогічні індукторам, що застосовуються для листового штампування: універсальні багато виткові індуктори та універсальні плоскі багато виткові індуктори, але технологічні можливості даних індукторів для зміцнювальної обробки МІП будуть меншими. Найкращим рішенням для обробки МІП буде використання спеціальних індукторів.

Індуктори для МІО найчастіше виготовляються з міді чи алюмінію [8], [9]. Також застосовують бериліє-

ву бронзу, що має хорошу електропровідність та задовільні механічні характеристики. Спроби використовувати високоміцні алюмінієві сплави в конструкції індукторів не дали очікуваного результату через їхню низьку довговічність в умовах імпульсного навантаження. Можливе виготовлення струмопровідних елементів з вуглецевих та легованих сталей, однак такі індуктори мають низький ККД передачі енергії на заготовку [9].

В роботі авторів [10] описано використання спеціальних індукторів для гартування великогабаритних зубчастих коліс індукційним загартуванням. Індукційне загартування, так само як і МІО ґрунтується на властивостях вихрових струмів, тому можемо розглядати дані роботи [10] як приклад. В основному зубчасті колеса загартовуються методом індукційного нагріву за допомогою кругових індукторів або, для великих зубчастих коліс і ведучих шестерень, за допомогою індукторів, що вводяться в западину між зубами або надягаються на зуб (рис. 3) [10]–[12].

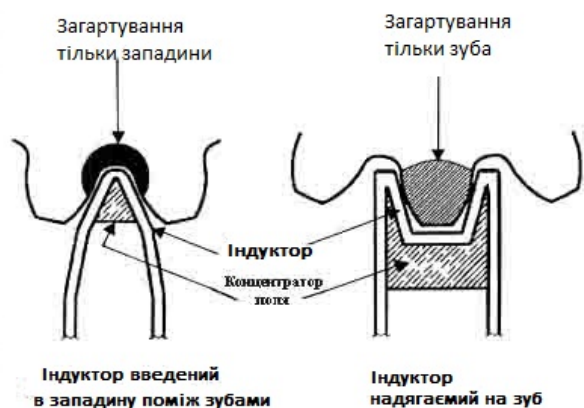


Рис. 3. Індуктор, що вводиться у западину між зубами, та індуктор, що одягається на зуб [10]

Технології застосування індукторів із введенням у западину та надяганням на зуб вимагають високої кваліфікації, знання та досвіду для отримання загартованого шару потрібної якості. Геометрія індуктора визначається формою зубів і необхідним варіантом загартування. При використанні технології індуктора, що одягається на зуб, індуктор оточує єдиний зуб або розташовується навколо нього (повторюючи або не повторюючи геометрію зуба). Така конструкція індуктора забезпечує реалізацію гартування робочої поверхні та тіла зуба.

Технологія використання індуктора, що вводиться у западину між зубами, вимагає симетричного розташування індуктора між робочими поверхнями двох сусідніх зубів. Такий індуктор може бути призначений для обробки тільки основи та/або бічної поверхні зуба; при цьому головка та серцевина зуба залишаються незагартованими. Існує багато варіантів конструкцій описуваних індукторів. Один із найпоширеніших варіантів форми індуктора наводиться на рис. 4.

Цей варіант був вперше розроблений у 50-х роках британською фірмою Delapena.

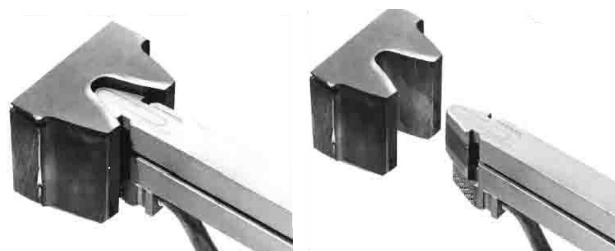


Рис. 4. Індуктор, що вводиться у западину між зубами та зубчасте колесо (фірма Inductoheat Inc.)

Як видно на рис. 5, максимальна щільність струму розташована в ділянці основ зубів. Для того, щоб збільшити питому щільність енергії, що вводиться в область основи зуба, застосовується магнітний концентратор поля. Зазвичай як концентратор магнітного потоку застосовується набір пластин з магнітного матеріалу, що орієнтуються впоперек зазору, або конструкція концентратора, виконана на основі порошкових магнітних матеріалів.

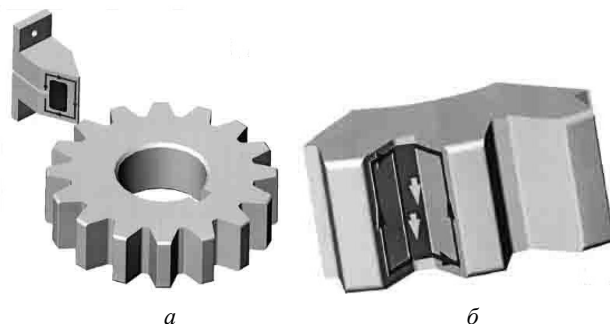


Рис. 5. а) розподіл струму в індукторі, що вводиться в западину між зубами; б) розподіл вихрових струмів у зубах, що гартуються

За допомогою індукторів, що вводяться в западину між зубами або надягаються на зуб, можна обробити зубчасті колеса великих розмірів – зовнішній діаметр 2,5 м і більше. Їх вага може досягати кількох тон. Така термообробка застосовується як для зовнішніх, так і для внутрішніх зубчастих коліс і ведених шестерень. Існують обмеження на діаметр внутрішніх зубчастих коліс, які можуть гартуватися із застосуванням цієї технології. Мінімальний внутрішній діаметр має бути 200–250 мм.

Проаналізувавши вище описані роботи, можна зробити висновок, що магнітно-імпульсна обробка зубчастих коліс великого діаметру мало вивчена, та є перспективним напрямком для дослідження. Орієнтиром при проектуванні індукторів для МІО можуть бути індуктори, що надягаються на зуб, або вводяться в западину між зубами колеса при індукційному загартуванні.



### Мета і задачі дослідження

Метою представленої роботи є дослідження розподілу напруженості магнітного поля вздовж площі зуба колеса, залежно від типу індуктора. Це необхідно для того щоб спрогнозувати розподіл змін в структурі металу, викликаних МІО, та їх вплив на зносостійкість колеса. Для цього необхідно провести розрахунок величини напруженості магнітного поля, згенерованого індукторами різних типів, та її розподілення вздовж робочої поверхні зуба В науковій літературі вплив складних за конструкцію індукторів на напруженість магнітного поля вивчено не достатньо. Тому головним завданням дослідження є встановлення залежності показників напруження магнітного поля від форми та довжини індуктора, виявлення необхідності наявності або відсутності сердечника.

### Матеріали та методи дослідження

В рамках дослідження, для генерування магнітного поля, було використано два типи індукторів, виготовлених з мідної проволочки. Індуктор першого типу – евольвентної форми надягався на зуб. Індуктор другого типу – вводився у западину між зубами колеса. Для проведення розрахунку розподілу магнітного поля вздовж поверхні зуба колеса, створено 3D моделі індукторів першого та другого типів різної конфігурації, а також 3D моделі колеса та сердечника з розмірами що відповідають розмірам серійного зубчастого колеса з виробництва. 3D моделі було розроблено за допомогою графічного пакету AutoCad.

Розрахунок розподілу напруженості магнітного поля, згенерованого індукторами першого та другого типів, вздовж поверхні зуба зубчастого колеса, було проведено за допомогою програмного пакету ANSYS Maxwell. Для цього створені 3D моделі було по чергово імпортовано в програмний пакет ANSYS Maxwell. Для кожної моделі було задано попередньо розраховані електричні параметри.

Всі розрахунки проводились для сталого магнітного поля при частоті струму  $f = 60$  Гц. Дана частота

була вибрана, через те, що низькочастотна обробка забезпечує найбільшу глибину проникнення (скін-шар) електромагнітного поля в оброблювану деталь. Уточнені дані по впливу довжини імпульсу будуть наведені у наступних роботах, після проведення експерименту на лабораторній установці.

### Результати дослідження

Для розрахунку величин напруженості магнітного поля згенерованого індукторами обох типів було задано наступні параметри: матеріал індуктора – мідна проволочка діаметром 1,5 мм, матеріал зубчастого колеса – сталь, сила струму 1 кА. Діаметр проволочки обрано за рекомендаціями джерела [13], сила струму визначена попередніми розрахунками.

На рис. 6 показана 3D модель збірки індуктора першого типу і зубчастого колеса. Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором першого типу показані на рис. 7 та рис. 8.

Розрахунок показує, що максимальна напруженість магнітного поля сягає 526 кА/м рис. 7 та чинить найбільший вплив на торці зуба рис 8. Середнє значення напруженості магнітного поля вздовж робочої поверхні зуба варіюється в межах 330–380 кА/м.

На рис. 8 відображається направлення векторів напруженості магнітного поля всередині зуба колеса, які співпадають з векторами магнітної індукції. Зуб колеса грає роль сердечника та знаходиться всередині котушки індуктивності. Тому вектори магнітної індукції проходять скрізь зуб створюючи потужне магнітне поле.

Отримані данні дозволяють зробити висновок, що у разі використання котушки індуктивності евольвентної форми, напруженість магнітного поля розподіляється не рівномірно. Магнітне поле з найвищим показником напруженості впливає на торці зуба, та на ділянки розташовані ближче до країв. На ділянку поверхні зуба, яка сприймає найбільші навантаження в процесі роботи – пляму контакту, впливає магнітне поле з середнім показником напруженості. Однак, як зазначено в роботі [14], цієї напруженості достатньо для магнітно-імпульсної обробки, оскільки вона входить в рекомендований діапазон – від 300 кА/м до 1000 кА/м [13].

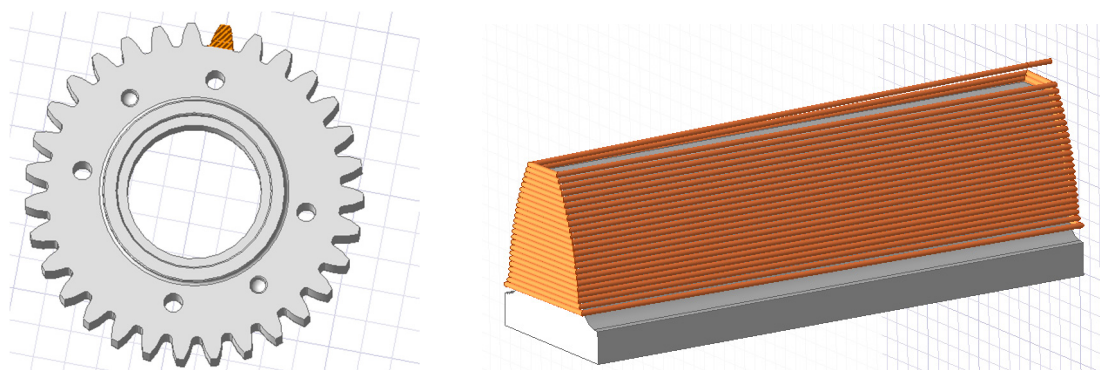


Рис. 6. 3D модель котушки індуктивності евольвентної форми

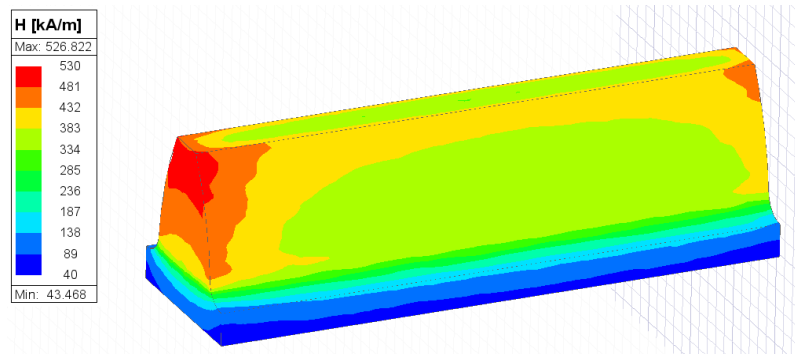


Рис. 7. Розрахунок напруженості магнітного поля вздовж поверхні зуба в ANSYS Maxwell

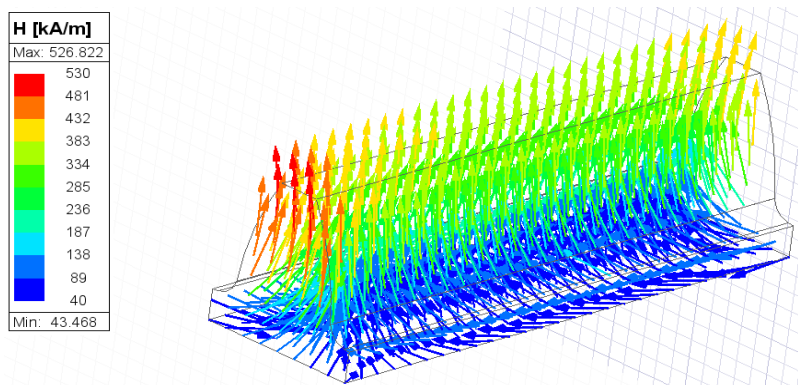


Рис. 8. Направлення векторів напруженості магнітного поля відносно зуба колеса

На рис. 9 показана 3D модель збірки індуктора другого типу і зубчастого колеса. Намотка індуктора виконана перпендикулярно осі колеса. Довжина індуктора відповідає ширині зубчастого вінця. Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу показані на рис. 10.

Максимальні значення напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу становлять 192 кА/м, та чинять найбільший вплив на кути перетину торцьової поверхні колеса та робочій поверхні зуба. На робочій поверхні зубів значення варіюються в діапазоні 29–67 кА/м.

Вектори магнітної індукції виходять з індуктора з південного полюсу, а входять з північного полюсу. Їх найбільша щільність знаходиться всередині індуктора, тому всередині напруженість магнітного поля найбільша. Але з усіх боків індуктора магнітне поле також генерується, хоч і з меншою щільністю. Тому на рис. 10 ми спостерігаємо, як розташовані бокові лінії магнітної індукції в тілі зуба. Через те, що на зуби впливає напруженість магнітного поля розрядженої щільності, показники напруженості в поверхні зубів значно менші ніж при використанні індуктора першого типу.

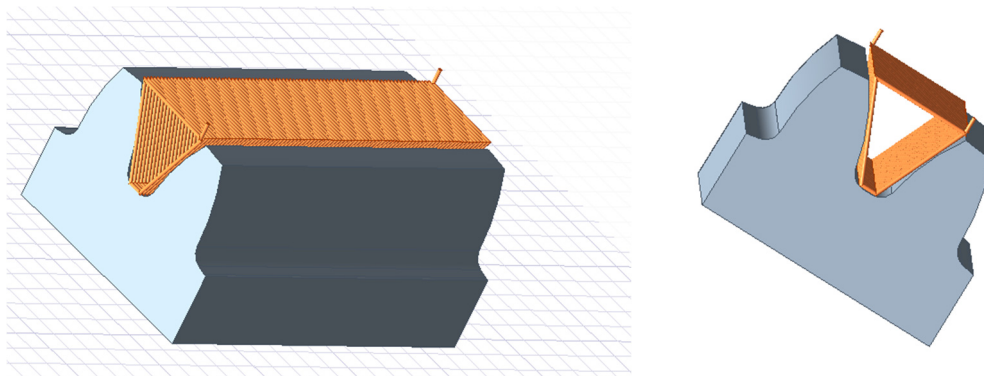


Рис. 9. 3D модель котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою яка розташована у западині між зубів колеса

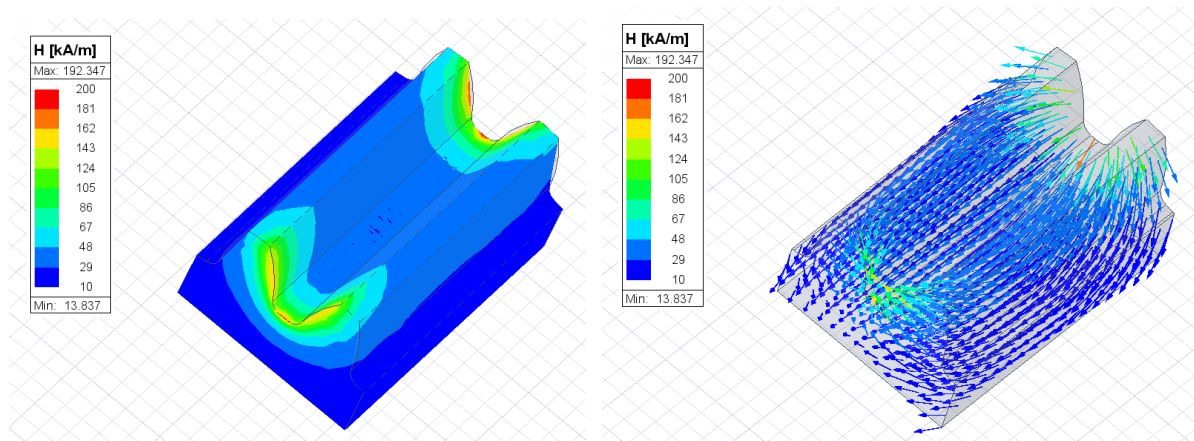


Рис. 10. Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса та напрямлення її векторів

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що напруженість магнітного поля згенерованого довгим індуктором розподіляється не рівномірно. В зоні плями контакту значення напруженості магнітного поля складають 29–67 кА/м, та не зможуть викликати структурні зміни в металі. Даний ефект можна пояснити великими розмірами зубчастого колеса та довжиною індуктора необхідного для його обробки. Якщо діаметр індуктора соленоїда в багато разів менше його довжини, то соленоїд вважається нескінченно довгим. Магнітне поле такого соленоїда практично повністю концентрується всередині. Найбільше поле створюється біля полюсів провідника де концентруються лінії магнітної індукції. В той час лінії магнітної індукції згенеровані з боків соленоїда розтягуються на більшу відстань зі збільшенням довжини соленоїда, тим самим зменшуючи напруженість. Досягти більших значень напруженості магнітного поля можна шляхом його замикання за допомогою додаткових магнітопроводів, розташованих між полюсами індуктора і торцями зуба, або шляхом скорочення довжини індуктора.

На рис. 11 показана 3D модель збірки укороченого індуктора другого типу і зубчастого колеса. Намотка індуктора виконана перпендикулярно осі колеса. Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого укороченим індуктором другого типу показані на рис. 12.

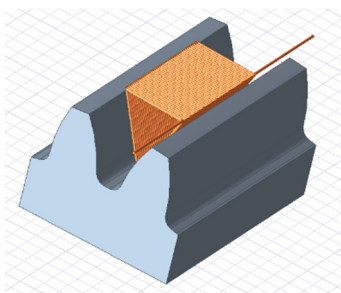


Рис. 11. 3D модель укороченої котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою, яка розташована у западині поміж зубів колеса

Максимальні значення напруженості магнітного поля згенерованого укороченим індуктором другого типу становлять 225 кА/м, та чинять найбільший вплив біля полюсів котушки, на вході та виході ліній магнітної індукції. На робочу частину зубів впливає напруженість магнітного поля більшої сили, ніж в попередньому розрахунку. Діапазон варується від 46 до 138 кА/м.

Можна зробити висновок, що скорочення довжини індуктора позитивно впливає на напруженість магнітного поля, але її недостатньо для магнітних перетворень в металі. Збільшення величини напруженості можна пояснити тим, що зуб колеса грає роль елемента магнітопроводу, та замикає магнітне поле. Лінії магнітної індукції частково проходять через метал, а не по повітрі. Оптимальну довжину індуктора другого типу запропоновано визначити у наступних дослідженнях.

Для закріплення висновків про вплив довжини соленоїда на напруженість магнітного поля, було вирішено перевірити розподілення напруженості магнітного поля індуктора другого типу, який вводиться у западину між зубами та довільно виходить за торці зубчастого колеса (рис. 13 а).

Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу який довільно виходить за торці зуба показані на рис. 13 б. Максимальні значення напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу становлять 48 кА/м. На робочу поверхню зуба впливає напруженість діапазоном 28–37 кА/м.

Таким чином можна зробити висновок, що збільшення довжини індуктора негативно впливає на розподілення напруженості магнітного поля. Чим довше індуктор, тим менше значення напруженості магнітного поля отримаємо, тому використання даного виду індуктора виключається.

Далі було вирішено перевірити вплив металевго сердечника на показники напруженості магнітного поля. На рис. 14 а показана 3D модель збірки індуктора другого типу, зубчастого колеса та металевго сердечника круглої форми, а на рис. 15 а – трикутної форми. Намотка



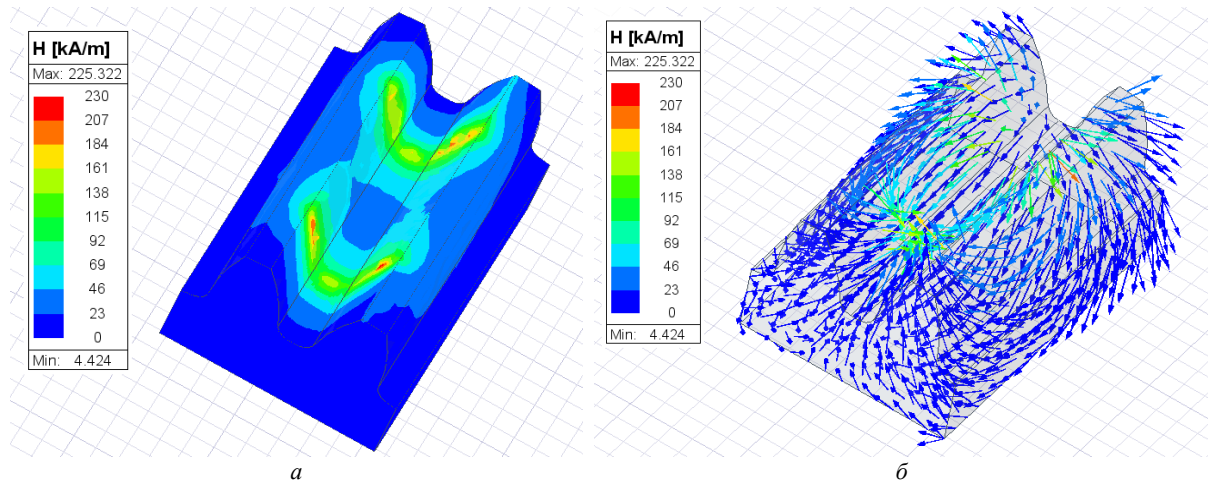


Рис. 12. Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса та напрямлення її векторів

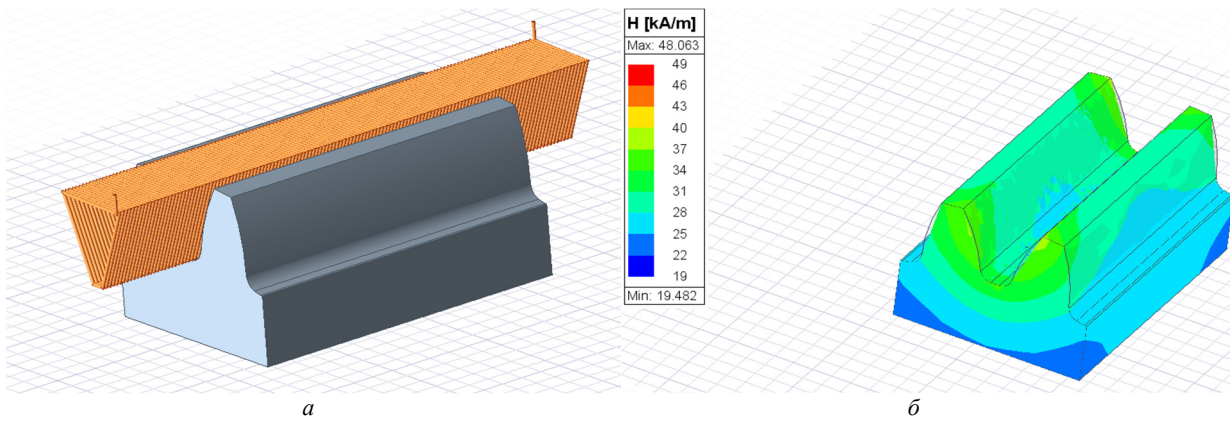


Рис. 13. а) 3D модель подовженої котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою, яка розташована у западині поміж зубів колеса; б) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса

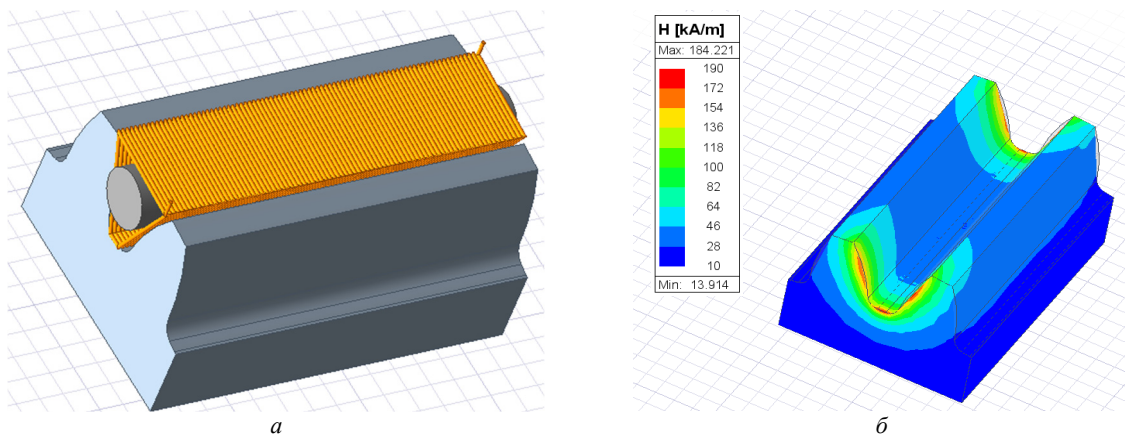
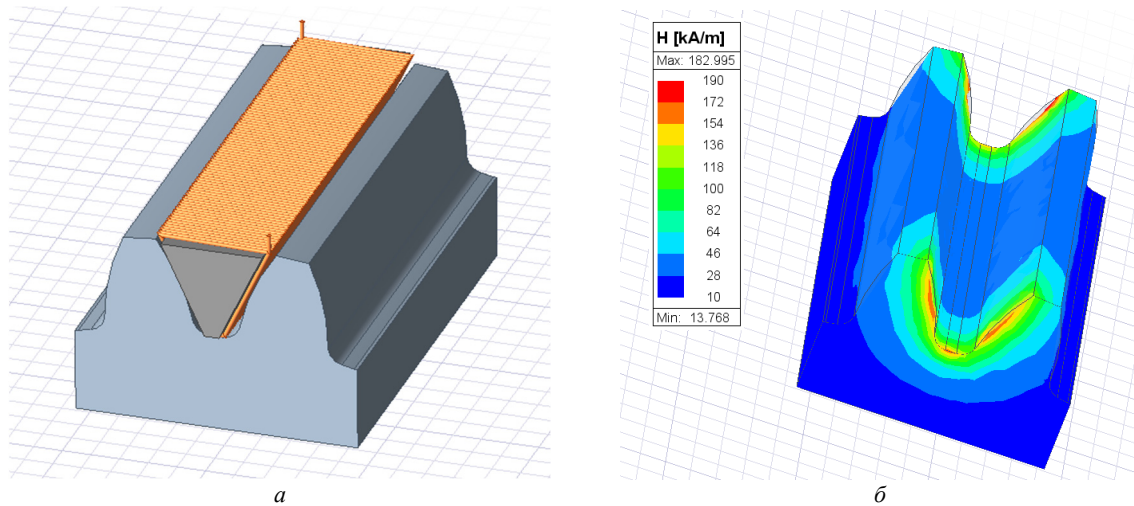


Рис. 14. а) 3D модель котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою та круглим металевим сердечником, яка розташована у западині поміж зубів колеса; б) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса

індуктора виконана перпендикулярно осі колеса. Довжина індуктора відповідає ширині зубчастого вінця.

Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу з круглим

металевим сердечником показані на рис. 15 б. Максимальні значення напруженості магнітного поля становлять 184 кА/м. На робочу поверхню зуба впливає напруженість діапазоном 28–65 кА/м.



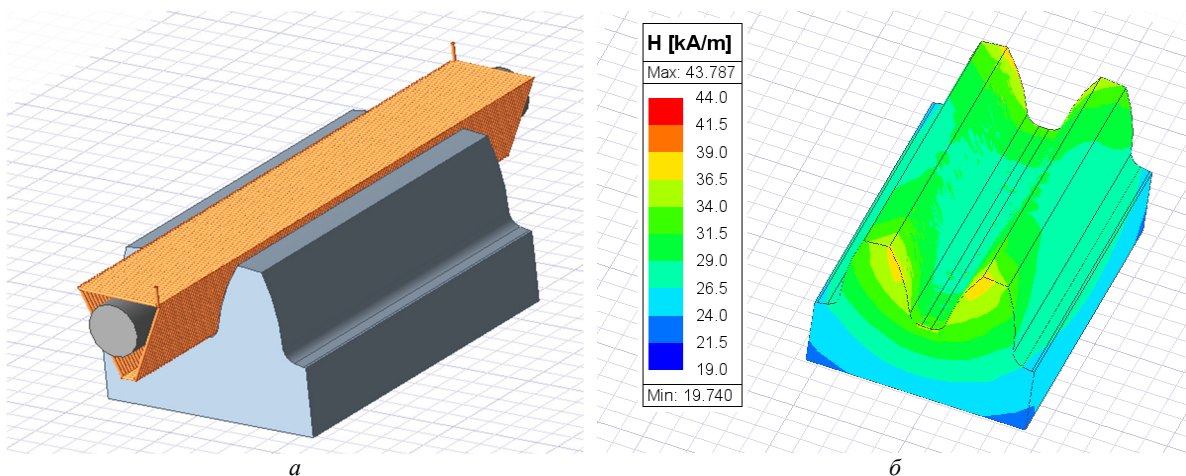
**Рис. 15.** а) 3D модель котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою та трикутним металевим сердечником, яка розташована у западині поміж зубів колеса; б) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса

Отримані дані дозволяють зробити висновок, що наявність сердечника та його форма, не впливають на величину напруженості магнітного поля та її розподілення вздовж робочої поверхні зуба. Незначне зниження напруженості на 4–6 кА/м можна пояснити тим, що наявність сердечника щільніше концентрує лінії магнітної індукції всередині індуктора, а бокові лінії стають більш розрядженими.

Для остаточного підтвердження отриманих результатів, було прийнято рішення перевірити значення та розподілення напруженості магнітного поля для індуктора другого типу, який вводиться у западину між зубами та довільно виходить за торці зубчастого колеса, з використанням круглого (рис. 15 а) та трикутного (рис. 16 а) сердечника.

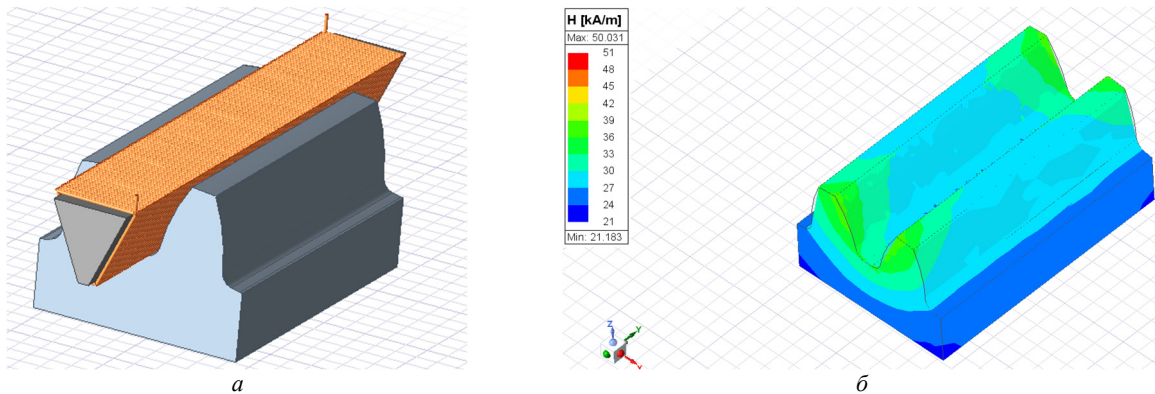
Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу, який довільно виходить за торці зуба, та має круглий металевий сердечник показані на рис. 16 б. Максимальні значення напруженості магнітного поля становлять 43 кА/м. На робочу поверхню зуба впливає напруженість діапазоном 25–34 кА/м.

Результати розрахунку напруженості магнітного поля згенерованого індуктором другого типу, який довільно виходить за торці зуба, та має трикутний металевий сердечник показані на рис. 17 б. Максимальні значення напруженості магнітного поля становлять 50 кА/м. На робочу поверхню зуба впливає напруженість діапазоном 27–33 кА/м.



**Рис. 16.** а) 3D модель подовженої котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою та круглим сердечником, яка розташована у западині поміж зубів колеса; б) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса





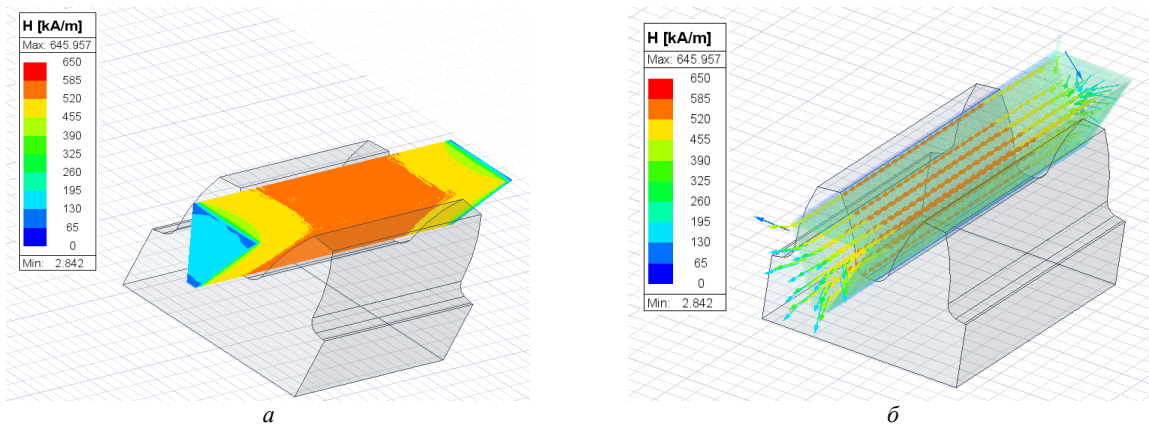
**Рис. 17.** а) 3D модель подовженої котушки індуктивності з перпендикулярною намоткою та трикутним сердечником, яка розташована у западині поміж зубів колеса; б) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж зубів колеса

Цікаві результати напруженості магнітного поля можна побачити на поверхні сердечника (рис. 18 а). Максимальна напруженість магнітного поля становить 645 кА/м, розподіляється рівномірно по всій площі сердечника в межах зубів колеса. Це пояснюється тим, що колесо грає роль магнітопроводу, та замикає магнітне поле. На частинах сердечника, які висять в повітрі, напруженість знижується до 390 кА/м, пропорційно від-

даленню від зубчастого колеса. Лінії магнітної індукції концентруються всередині сердечника та мають чітко паралельне направлення (рис. 18 б).

Таким чином можна зробити висновок, що довжина індуктора, наявність сердечника та його форма, не суттєво впливають на величину напруженості магнітного поля та її розподілення вздовж робочої поверхні зуба.

Результати всіх розрахунків зведені до таблиці 1.



**Рис. 18.** а) Розподіл напруженості магнітного поля вздовж поверхні трикутного сердечника; б) Направлення векторів напруженості магнітного поля всередині трикутного сердечника

**Таблиця 1.** Результати напруженості магнітного поля для кожного типу індуктора

Вид індуктора	Максимальна напруженість, кА/м	Напруженість в робочій зоні колеса, кА/м
Індуктор I типу	526	330–380
Індуктор II типу без сердечника	192	29–67
Індуктор II типу з круглим сердечником	184	28–65
Індуктор II типу з трикутним сердечником	182	28–65
Індуктор II подовжений без сердечника	48	28–37
Індуктор II подовжений з круглим сердечником	43	25–34
Індуктор II подовжений з трикутним сердечником	50	27–33
Індуктор II укорочений	225	46–138

## Висновки

Проведено дослідження розподілення напруженості магнітного поля вздовж робочої поверхні зуба для індукторів двох типів. Було виявлено, що найбільш ефективним для проведення МІО є індуктор першого типу, який надягається на зуб колеса. Середні значення величини напруженості магнітного поля становлять 330–380 кА/м, що є достатнім для структурних змін поверхневого шару металу по всій площі робочої поверхні зуба.

Індуктор другого типу, довжина якого відповідає ширині зубчастого вінця є малоефективним. Оскільки величина напруженості згенерованого ним магнітного поля та її розподілення вздовж робочої поверхні зуба не призводять до структурних змін поверхневого шару металу. Збільшення довжини, а також використання сердечників круглої та трикутної форм

не призводить до суттєвих змін величини напруженості.

Однак є перспективним використання укороченого індуктора другого типу. Оскільки дослідження показало, що при скороченні довжини індуктора бокові лінії магнітної індукції менш розтягуються в повітрі та мають більший вплив на матеріал зуба. Також, в цьому випадку, лінії магнітної індукції проходять не по повітрю, а скрізь метал зуба колеса, тим самим виступаючи магнітопроводом та замикаючи магнітне поле. Є ймовірність, що якщо визначити оптимальну довжину індуктора, то можна обробляти зубчасте колесо шляхом покрового переміщення індуктора вздовж робочої поверхні зуба. Додаткових досліджень потребує можливість використання індуктора другого типу з додатковими магнітопроводами, які дозволять підвищити значення напруженості магнітного поля за рахунок його замикання

## References

- [1] V. A. Poletaev, "Vozmojnosti magnitnoy obrabotki i magnitnyih ustanovok," *Tekhnicheskie nauki*, No. 80, Mar. 2018, pp. 5–8.
- [2] V. S. Kshniakin, A. S. Opanasiuk and K. O. Diadiura, *Osnovy fizychnoho materialoznavstva*, Sumskyi derzhavnyi universytet, Sumy, part 2, 2015.
- [3] V. I. Bobrovitskiy and V. A. Sidorov, *Oborudovanie: tekhnicheskoe obslujivanie i remont*, YUgo-Vostok, Donetsk, 2011.
- [4] V. A. Poletaev and A. N. SHabalin, "Issledovanie na iznosostoykost zubchatyih koles, uprochnennyih impuls-noy magnitnoy obrabotkoy," *Vestnik IGEU*, vol. 3, 2006, pp. 26–27.
- [5] B. V. Malyigin, "Magnitnoe povyishenie dolgovechnosti raboty i korrozionnoy stoykosti oborudovaniya pischevoy promyishlennosti," *Pischevaya promyishlennost*, vol. 1, 1987, pp. 47–48.
- [6] B. V. Malyigin, S. A. Tihonov, N. N. Dmitruk and A. S. Ofitserov, "Sposob magnitnoy obrabotki zubchatyih koles", USSR patent 1752783, Apr. 1990.
- [7] K. N. Bobin, N. A. Ryingach and N. V. Kurlaev, "Reshenie prakticheskikh problem primeneniya magnitno-impulsnoy obrabotki dlya povyisheniya dolgovechnosti tonkolistovyih detaley letatelnyih apparatov," *Nauchnyiy vestnik NGTU*, No. 1(54), 2014.
- [8] A. K. Talalaev, "Induktory i ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov", Moscow: Informtehnika, 1992.
- [9] V. A. Barvinok, YU. E. Palamarchuk, A. N. Kirilin, V. P. Samohvalov and V.M. Vershigorov, "Vyibor materialov dlya izgotovleniya induktornyih system," *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, vol. 1, no.14, 2008, pp. 97–102.
- [10] V. Rudnev, R. Cook, D. Loveless and M. Black, "Induction heat treatment: basic principles, computation, coil construction and design considerations," Chapter 11A of *Steel Heat Treatment Handbook*, G. Totten and M. Howes Eds., Marcel Dekker, New York, 1997.
- [11] D. Dudley, "Handbook of Practical Gear Design," *Technomic Publishing*, 1994.
- [12] M. Conyngham, "Metallurgical aspects to be considered in gear and shaft design," *Gear Technology*, Mar./Apr. 1999.
- [13] B. V. Malyigin, "Magnitnoe uprochnenie instrumenta i detaley mashin", Moscow: Mashinostroenie, 1989.
- [14] O. T. Dubinina and O. P. Palchui, "Rozrakhunok rozpodilu mahnitnoho polia dlia 3D modeli kotushky induktyvnosti evolventnoi formy v ANSYS MAXWEL", in *Proc. XV Mizhnar. nauk-tekh. konf. molodykh vchenykh ta studentiv "Innovatsii molodi v mashynobuduvanni"*, Kyiv, 23 Apr. 3 May. 2024, 2024.

## Distribution of magnetic field strength along a wheel tooth depending on the shape of the inductor

O. Dubinina<sup>1</sup> • V. Medvedev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

**Abstract.** The research is aimed at determining the optimal shape of the inductor for processing the teeth of a large-sized gear wheel by magnetic pulse processing. The work studies the distribution of the magnetic field strength along the area of the wheel tooth, depending on the type of inductor. This is necessary in order to predict the distribution of changes in the metal structure caused by MIO and their effect on the wear resistance of the wheel. The main task of the research is to establish the dependence of the magnetic field strength indicators on the shape and length of the inductor. Identifying the need for the presence or absence of a core.

Two types of inductors were considered: the first involute shape is worn on the wheel tooth, the second is located in the cavity between the wheel teeth. The calculation of the magnetic field strength distribution was carried out using the ANSYS Maxwell software package.

As a result of the research, it was found that the most effective for conducting magnetic pulse processing is the inductor of the first type, which is worn on the wheel tooth. The average values of the magnetic field strength are 330–380 kA/m, which is sufficient for structural changes in the surface layer of the metal over the entire area of the working surface of the tooth. The inductor of the second type, the length of which corresponds to the width of the gear crown, is ineffective. Since the magnitude of the magnetic field strength generated by it in the working area of the wheel reaches only 29–67 kA/m and does not lead to structural changes in the surface layer of the metal. Increasing the length, as well as using cores of round and triangular shapes, did not give significant changes in the magnitude of the strength. It was also determined that the use of a shortened inductor of the second type is promising. In further studies of the optimal length of the inductor, it is recommended to study the direction and find out whether it is possible to process the gear wheel by stepwise movement of the inductor along the working surface of the tooth.

**Keywords:** magnetic pulse processing, inductor, magnetic field strength, gear wheel, magnetic induction.

---