

В. В. Медведєв, канд. техн. наук, доц.; О. Т. Дубініна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ МАГНІТОПРОВОДУ НА РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПІД ЧАС МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є перспективним для досліджень методом обробки деталей в сучасному машинобудуванні. Суть магнітно-імпульсної обробки полягає в тому, що металева деталь розміщується всередині індуктора, який створює потужне магнітне поле. Під його дією в тілі деталі виникають вихрові струми, та взаємодіють із струмами, що генеруються магнітно-імпульсною установкою, внаслідок чого на поверхні металу виникають значні зусилля. У статті досліджено вплив конструктивних параметрів сталевого магнітопроводу на розподіл напруженості магнітного поля в зоні зуба колеса під час магнітно-імпульсної обробки. Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення рівномірного розподілу напруженості магнітного поля для підвищення ефективності процесу магнітно-імпульсної обробки. З цією метою було проведено моделювання трьох типів магнітопроводів: евольвентної форми зі стінками товщиною 6 мм і 12 мм, а також форми, що відповідає прямокутному перерізу зі стінкою товщиною 5 мм.. У кожному випадку розглядалися два типи контакту магнітопроводу із зубом колеса – лінійний контакт (по лініях дотику) та контакт по всій площині западини зуба. Розрахунки виконано в середовищі ANSYS Maxwell за імпульса, який відповідає частотам 60 Гц та 4000 Гц, за значеннях сили струму 1, 2 та 3 кА. Окремо проаналізовано розподіл напруженості магнітного поля вздовж робочої поверхні зуба для кожного з варіантів конструкції магнітопроводу. Для перевірки достовірності отриманих результатів була побудована валідаційна модель. Порівняння результатів моделювання показало, що збільшення товщини магнітопроводу не має значного впливу на розподіл напруженості магнітного поля, так само як і характер контакту (лінійний чи площинний). Встановлено, що магнітопровід з прямокутним перерізом забезпечує найбільш раціональне поєднання магнітної ефективності та технологічної доцільності, що робить його придатним для використання в серійному виробництві. Результати дослідження можуть бути застосовані для оптимізації конструкцій індукторів у магнітно-імпульсних установках.

Ключові слова: магнітно-імпульсна обробка, індуктор, магнітопровід, напруженість магнітного поля, скін-шар, розподіл поля, імпульс, частота.

Вступ

Магнітно-імпульсна обробка (МІО) є перспективним для досліджень методом обробки деталей в сучасному машинобудуванні. Суть магнітно-імпульсної обробки полягає в тому, що металева деталь розміщується всередині індуктора, який створює потужне магнітне поле. Під його дією в тілі деталі виникають вихрові струми, та взаємодіють із струмами, що генеруються магнітно-імпульсною установкою, внаслідок чого на поверхні металу виникають значні зусилля. Магнітний імпульс формує ударну хвилю, яка спричиняє переміщення кристалічної решітки у дефектних ділянках металу. Такий силовий вплив не перевищує межі пружності та міцності матеріалу, однак є достатнім для викликання змін у його структурі. Одночасно з цим відбувається локальне нагрівання ділянок кристалічних ґрат та структурних неоднорідностей, що сприяє зміцненню поверхні металу.

Для ефективності процесу необхідно забезпечити достатню напруженість магнітного поля в зоні обробки, підібрати частоту імпульсів, яка визначає товщину скін-шару, а також максимально концентрувати магнітний потік у робочій зоні. Важливим є мінімізація втрат енергії за рахунок оптимальної конструкції індуктора і магнітопроводу.

У роботі [1] було показано, що використання експериментального індуктора евольвентної форми, який надягається безпосередньо на зуб, забезпечує задовільні результати. Але

виникають значні втрати, у зв'язку з тим, що магнітне поле замикається по повітрю.

Для зменшення втрат було запропоновано введення в конструкцію сталевго магнітопроводу. Використання сталевих магнітопроводів дозволяє значно підвищити магнітну проникність, знизити втрати на вихрові струми та покращити загальну продуктивність магнітно-імпульсної обробки. Це пояснюється тим, що під час МІО, магнітний потік переважно замикається і концентрується в магнітопроводі, оскільки його магнітний опір значно нижчий, ніж у повітря. У результаті досягається більш рівномірний і керований розподіл магнітного поля в робочій зоні індуктора. Це дослідження спрямоване на аналіз впливу різних параметрів сталевго магнітопроводу на характеристики магнітного поля, з метою визначення оптимальних умов для його застосування під час магнітно-імпульсної обробки зубчастих коліс великих габаритів.

Розрахунок розподілу напруженості магнітного поля проведено за допомогою програмного пакету ANSYS Maxwel. Тривимірні моделі досліджуваних конструкцій були побудовані за допомогою графічного пакету AutoCAD.

Результати дослідження

У дослідженні для аналізу впливу сталевго магнітопроводу на величину напруженості магнітного поля, було змодельовано три варіанти тривимірних моделей, що відрізнялися різною товщиною та площею контакту магнітопроводу із зубом. У першому варіанті магнітопровід мав евольвентну форму та товщину стінки 6 мм, що видно на рис. 1. Розглядалися два варіанти контакту із зубом: лінійний вздовж западини зуба (рис. 2 а) та повне прилягання до профілю западини зуба (рис. 2 б).

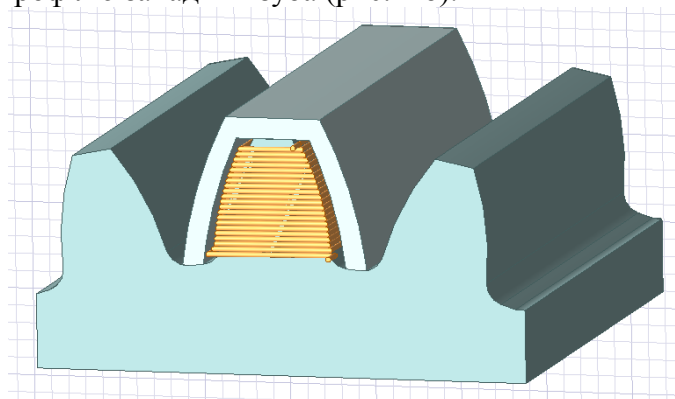


Рис. 1. 3D-модель колеса та магнітопроводу, що повторює евольвентний профіль зуба, з товщиною стінки 6 мм

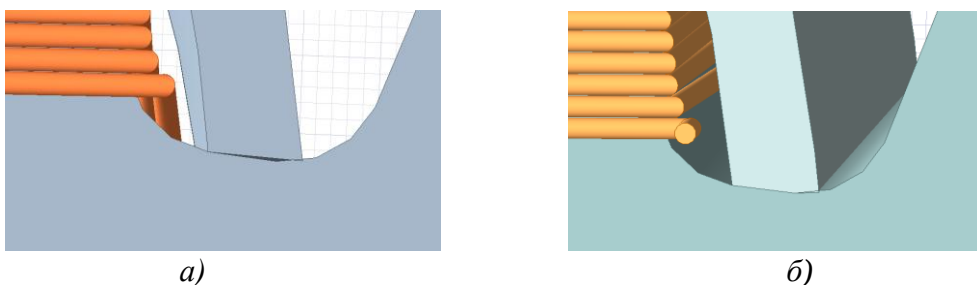


Рис. 2. а) Контакт магнітопроводу та западини колеса здійснюється по лініям дотику; б) Магнітопровід прилягає до западини повністю по всій площині

Магнітопровід, що має лінійний контакт практично не залежить від відхилень висоти або форми западини зуба. Така конструкція не потребує точного прилягання до поверхні зуба по всій площині, що значно спрощує виготовлення магнітопроводу в умовах серійного або масового виробництва. Крім того, така конфігурація дозволяє уніфікувати магнітопроводи для обробки зубчастих коліс із незначними відмінностями у геометрії, що робить цю

конструкцію перспективною з точки зору гнучкості виробництва та зниження його вартості.

У другому варіанті магнітопровід мав евольвентну форму, товщину стінки 12 мм та два аналогічні першому варіанті контакту з зубом колеса. Третій варіант передбачав використання магнітопроводу такої форми, що відповідає прямокутному перерізу зі стінкою товщиною 5 мм – конструктивно спрощеної для реалізації в умовах серійного виробництва. Усі моделі мають наступні параметри: матеріал індуктора – мідний дріт діаметром 1,5 мм; матеріал зубчастого колеса – сталь; матеріал магнітопроводу – сталь; сила струму – 1 кА; довжина імпульсу відповідає частоті – 60 Гц. Діаметр проволочки обрано відповідно до рекомендацій джерела [2], сила струму визначена на основі попередніх розрахунків. Для забезпечення можливості порівняння результатів з попередніми дослідженнями [1, 3], розрахунок напруженості магнітного поля здійснювався за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц. Вибір цієї частоти зумовлений тим, що в ряді попередніх робіт моделювання проводилося за умов квазістаціонарного електромагнітного поля, характерного саме для цієї частоти, що дозволяє адекватно оцінити базовий розподіл поля без частотних втрат. Однак, для відображення реальних умов роботи імпульсної установки, також були проведені розрахунки за робочої частоти 4000 Гц.

Довжина імпульсу, що відповідає частоті 4000 Гц, обрана виходячи з бажаної товщини скін-шару, який формується під час магнітно-імпульсної обробки. Товщина скін-шару розраховується за формулою [4]:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma}}, \quad (1)$$

де Δ – товщина скін-шару (м); μ_0 – магнітна проникність матеріалу (Гн/м); γ – питома провідність матеріалу (См/м); $\omega = 2\pi f$ – кутова частота (рад/с); f – частота струму (Гц).

Закладена товщина скін-шару, становить 250 мкм і обумовлена вимогами до точності за класом 8В. Із цього шару 200 мкм передбачено як допустиме експлуатаційне спрацювання, після досягнення якого зубчасте зачеплення вважається таким, що втратило робочу точність, і підлягає ремонту або заміні.

На рис. 1 представлено першу 3D-модель колеса та магнітопроводу, евольвентної форми, із товщиною стінки 6 мм, та довжиною відповідною товщині колеса. Евольвентна форма обрана для зменшення довжини магнітних ліній. Було проаналізовано два варіанти взаємодії магнітопроводу із зубом: у першому випадку контакт здійснюється лише по лініях дотику з западиною зуба (рис. 2 а), у другому – магнітопровід прилягає до западини повністю по всій площині (рис. 2 б). Таке порівняння дозволяє оцінити вплив площі контакту між магнітопроводом і зубом колеса на розподіл магнітного поля. Результати розрахунку напруженості магнітного поля замкнутого обома видами магнітопроводу показані на рис. 3 а, 3 б.

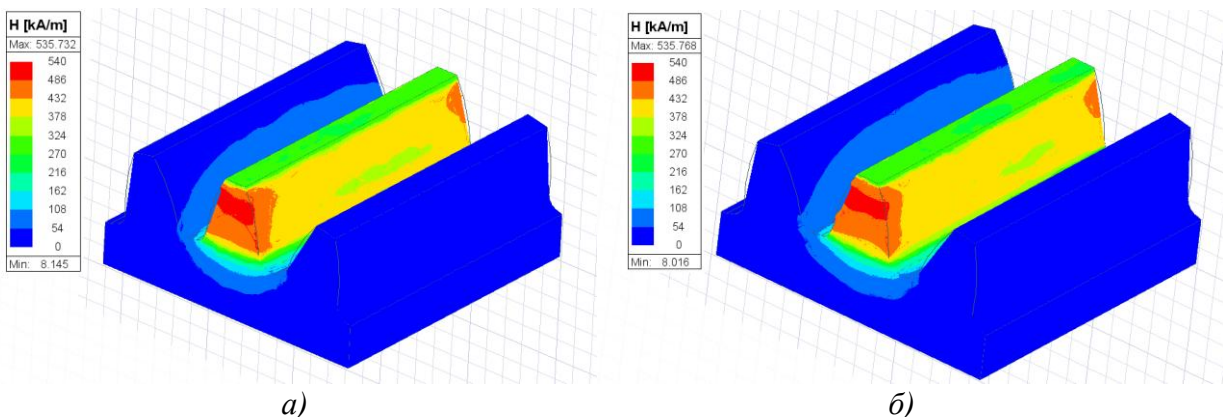


Рис. 3. а) Контакт між магнітопроводом і зубом здійснюється по лініях дотику;
б) Магнітопровід прилягає до западини повністю по всій площині

Розрахунок показує, що максимальна напруженість магнітного поля сягає 540 кА/м, що є вищим показником порівняно з попередніми дослідженнями де магнітопровід не використовувалася [1]. Середнє значення напруженості вздовж робочої поверхні зуба варіюється в межах 378 – 432 кА/м, що також перевищує аналогічні показники без магнітопроводу (330 – 380 кА/м). Найбільший вплив магнітного поля спостерігається в ділянках торців зуба, де досягається максимальна концентрація поля.

Це пояснюється фізичною природою магнітного кола: сталь, з якої виготовлений магнітопровід, має значно вищу магнітну проникність порівняно з повітрям, а отже, менший магнітний опір. Завдяки цьому магнітний потік концентрується у магнітопроводі, не розсіюється в навколишнє середовище, а ефективно передається до робочої зони зуба. У результаті відбувається посилення магнітного поля та покращення його просторового розподілу, що є критично важливим для ефективності магнітно-імпульсної обробки.

Порівняння двох випадків розподілу напруженості магнітного поля, коли контакт між магнітопроводом і зубом здійснюється по лініях дотику та коли забезпечений повний контакт по всій ширині западини зуба – показало, що площа контакту практично не впливає на загальний характер розподілу поля. Максимальні значення напруженості залишаються однаковими, а незначна різниця у формі та площі зони насичення на робочій поверхні зуба може бути пояснена похибками чисельного моделювання.

Подальші розрахунки були проведені за робочої частоти 4000 Гц (рис. 4), що дозволило дослідити вплив частотного чинника на характер розподілу магнітного поля. Використовувалась модель з контактом магнітопроводу по лініям дотику, як більш технологічна. Результати моделювання виявили суттєву зміну картини розподілу напруженості: рівномірність поля, характерна для низької частоти (60 Гц), зникає, натомість з'являються зони локалізованого підвищення поля поблизу поверхневих шарів матеріалу. Це пояснюється проявом скін-ефекту. Зростання частоти змушує струм та відповідно й магнітне поле концентруватися ближче до поверхні провідника, чим суттєво зменшує глибину проникнення магнітного потоку [5].

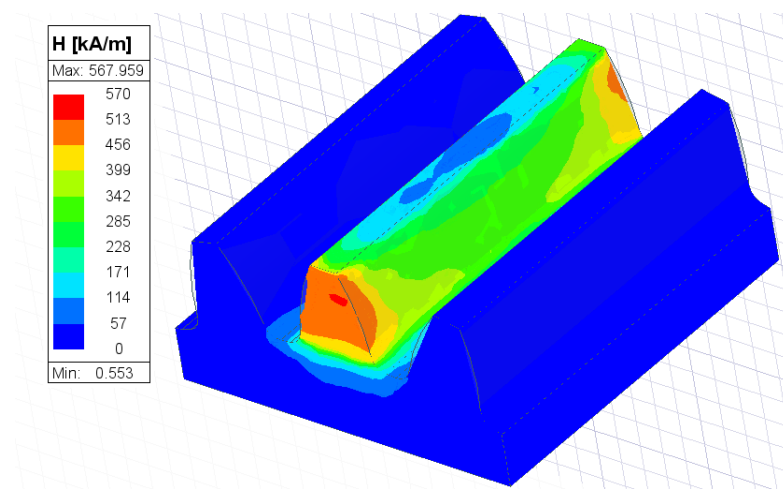


Рис. 4. Розрахунок напруженості магнітного поля на робочій частоті 4000 Гц

З метою збільшення напруженості магнітного поля під час високочастотного збудження (4000 Гц), були проведені додаткові розрахунки з підвищеними значеннями струму до 2 кА (рис. 5 а), та до 3 кА (рис. 5 б). Обрані значення струму відповідають параметрам, які були досягнуті під час проведення експериментів на наявній малопотужній імпульсній установці, яка була спроектована і зібрана в ході дослідження. Результати цих випробувань стали основою для подальшої верифікації розрахункових моделей.

Отримані результати показали підвищення напруженості магнітного поля до 1200 кА/м за значення струму – 2 кА, та 1700 кА/м за значення струму 3 кА.

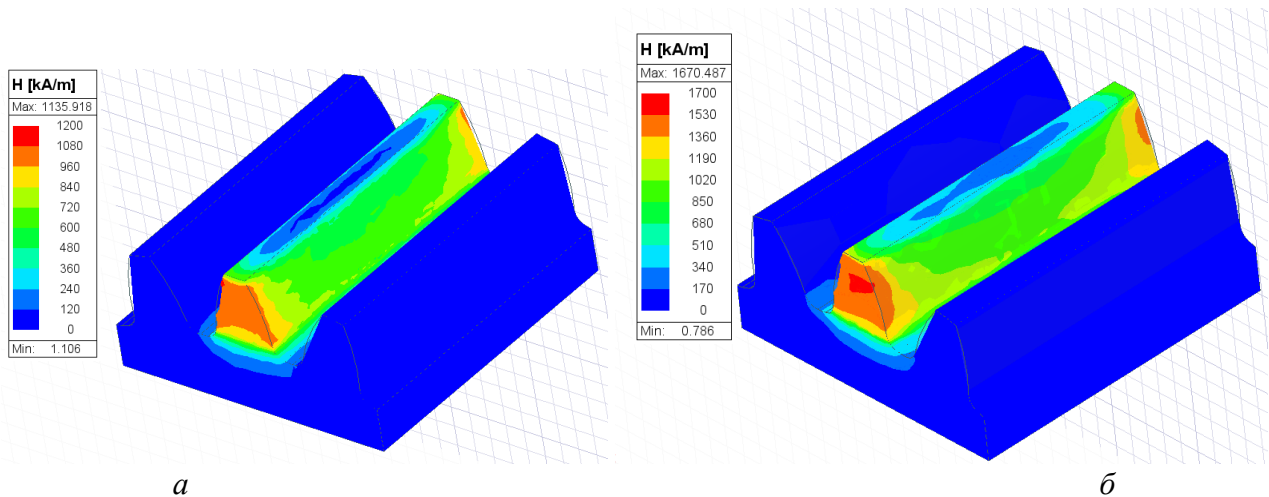


Рис. 5. а) Розрахунок напруженості магнітного поля на робочій частоті 4000 Гц та силі струму 2 кА;
б) Розрахунок напруженості магнітного поля на робочій частоті 4000 Гц та силі струму 3 кА

На рис. 6 наведено другу 3D-модель колеса та магнітопроводу, евольвентної форми, із товщиною стінки 12 мм, яка прилягає до западини зуба повністю по всій площині. Товщина стінки магнітопроводу була збільшена з метою дослідження впливу товщини металу на розподіл напруженості магнітного поля: покращується чи залишається незмінним розподіл напруженості. Також було проаналізовано два варіанти контакту магнітопроводу з западиною зуба, аналогічно до попередньої 3D-моделі з товщиною стінки 6 мм.

На рис. 7 (а) наведені результати розрахунку напруженості магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц. А на рис. 7 (б) за довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц. Аналіз даних показав аналогічні значення з першою моделлю магнітопроводу товщиною 6 мм. Максимальне значення напруженості магнітного поля становить 540 кА/м (рис. 7 а), середнє значення напруженості вздовж робочої поверхні зуба варіюється в межах 378–432 кА/м. За довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц максимальне значення напруженості магнітного поля становить 600 кА/м (рис. 7 б), середнє значення напруженості вздовж робочої поверхні зуба варіюється в межах 300 – 360 кА/м.

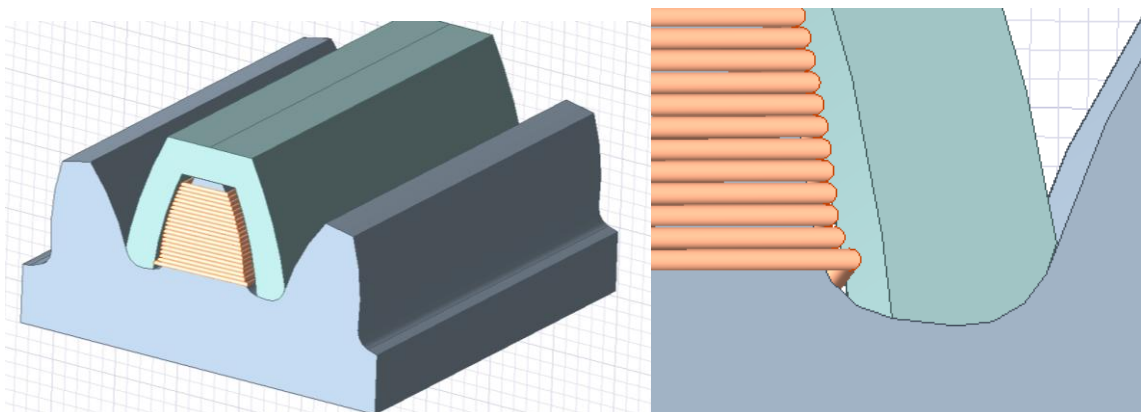


Рис. 6. 3D-модель колеса та магнітопроводу, що повторює евольвентний профіль зуба, з товщиною стінки 12 мм та контактом по всій площині западини

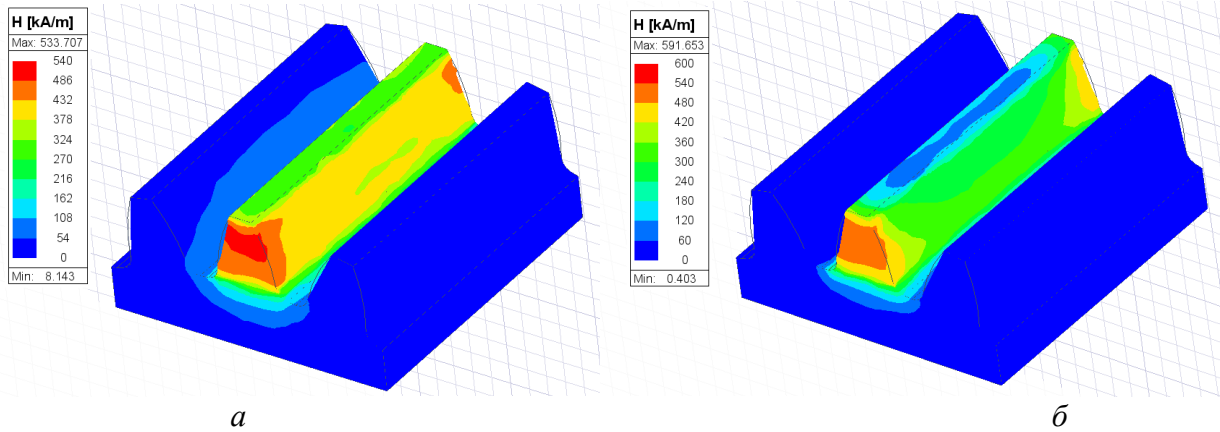


Рис. 7. а) Розрахунок напруженості магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц;
б) Розрахунок напруженості магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц.

Були проведені розрахунки за довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц та з підвищеними значеннями струму до 2 кА (рис. 8 а), та до 3 кА (рис. 8 б).

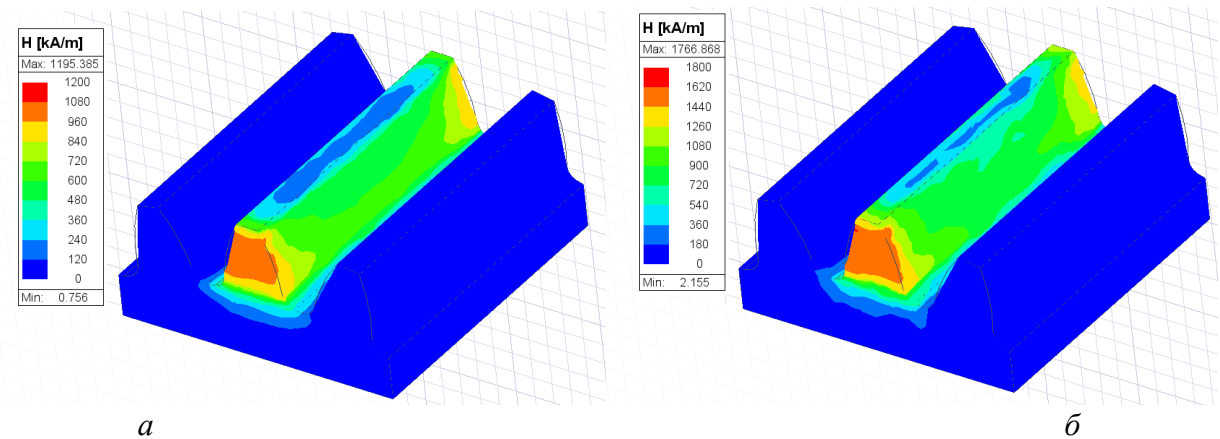


Рис. 8. а) Розрахунок напруженості магнітного поля з підвищеними значеннями струму до 2 кА
б) Розрахунок напруженості магнітного поля з підвищеними значеннями струму до 3 кА

Максимальна напруженість магнітного поля сягає 1200 кА/м за значення струму – 2 кА, та 1800 кА/м за значення струму – 3 кА.

На рис. 9 наведено 3D-модель колеса та магнітопроводу, евольвентної форми, із товщиною стінки 12 мм, контакт між магнітопроводом і зубом по лініях дотику.

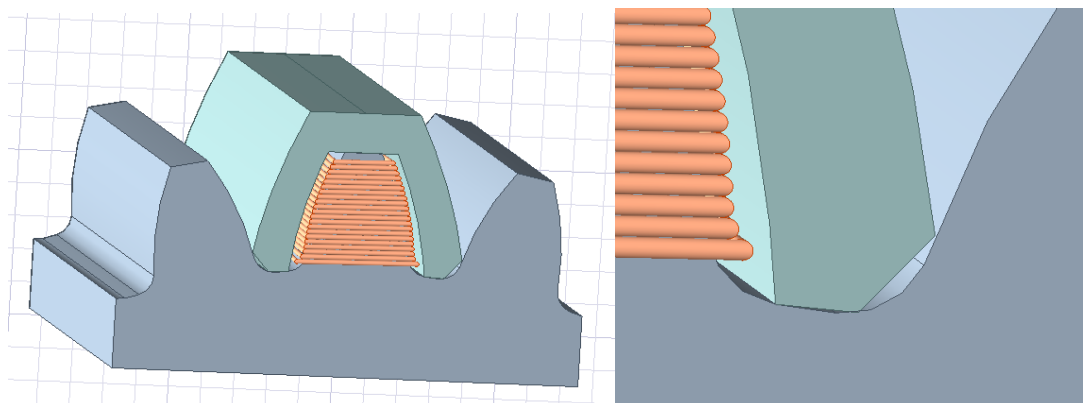


Рис. 9. 3D-модель колеса та магнітопроводу, що повторює евольвентний профіль зуба, з товщиною стінки 12 мм та контактом по лініях дотику

Проведено розрахунок напруженості магнітного поля за імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц (рис. 9 а), за імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц (рис. 9 б), з підвищеним значенням струму до 2 кА (рис. 9 в), з підвищеним значенням струму до 3 кА (рис. 9 г).

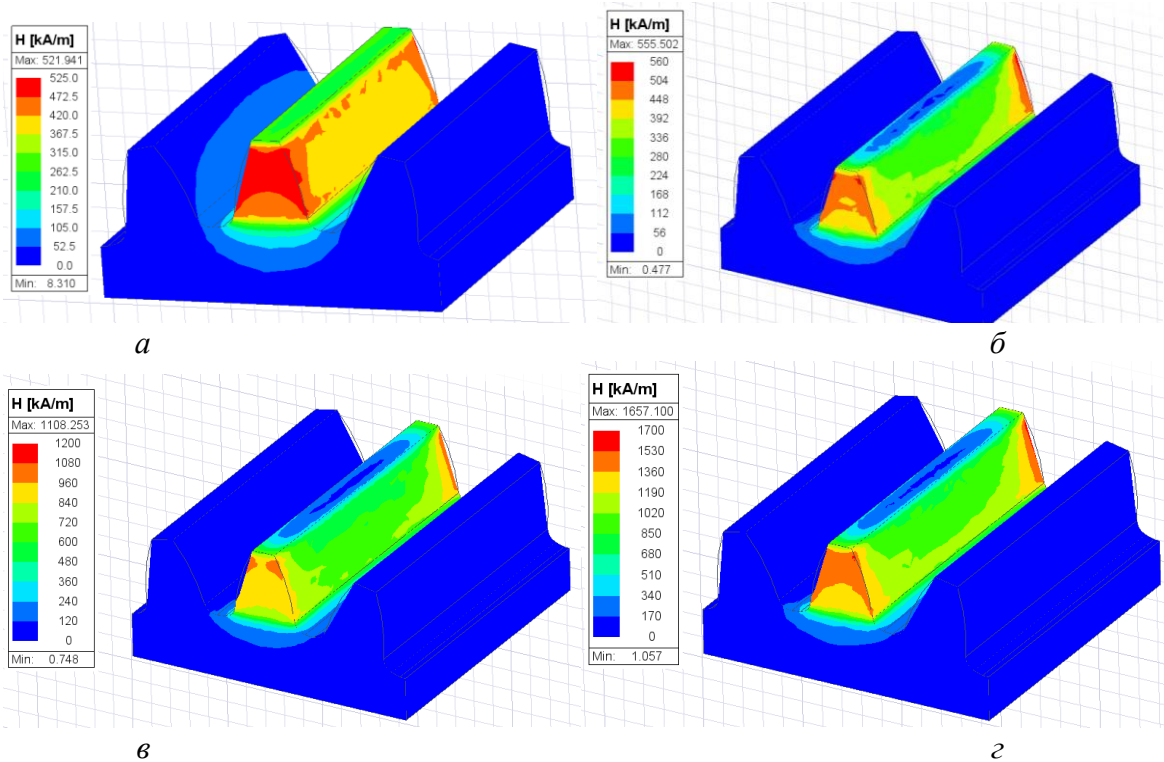


Рис.9. Розрахунок напруженості магнітного поля для моделі з товщиною стінки 12 мм та контактом по лініях дотику: а) за довжини імпульсу, що відповідає частоті 60 Гц; б) за довжини імпульсу, що відповідає частоті 4000 Гц; в) під час підвищення струму до 2 кА; г) під час підвищення струму до 3 кА.

Максимальна напруженість магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц складає 525 кА/м, за довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц – 560 кА/м. За збільшення значення струму до 2 кА – 1200 кА/м, за збільшення значення струму до 3 кА – 1700 кА/м.

Проаналізувавши результати моделювання, можна зробити висновок, що збільшення товщини стінки магнітопроводу з 6 мм до 12 мм практично не впливає на значення напруженості магнітного поля вздовж зуба колеса. Значення напруженості, отримані для різних конфігурацій, виявились майже ідентичними до результатів, що були отримані для першої 3D-моделі. Крім того, конфігурація контакту магнітопроводу – по лініях дотику або по всій площині западини зуба – також не має суттєвого впливу на розподіл та величину напруженості магнітного поля. Це свідчить про те, що під час проєктування магнітопроводу можна віддавати перевагу конструкціям з лінійним контактом, які є простішими у виготовленні та менш вимогливими до точності геометрії зуба.

Для спрощення конструкції магнітопроводу була спроектована третя 3D-модель із прямокутною конфігурацією перерізу, показаною на рис. 10, яка має контакт по лініях дотику. Така конструкція є технологічно зручною у виготовленні, уніфікованою для серійного виробництва та не потребує високої точності обробки западини зуба. Товщина стінки магнітопроводу становить 5 мм. За цією моделлю були проведені аналогічні попереднім 3D-моделям чисельні розрахунки: розрахунок напруженості магнітного поля за імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц (рис. 11 а), за імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц (рис. 11 б), з підвищеним значенням струму до 2 кА (рис. 11 в), з підвищеним значенням струму до 3 кА (рис. 11 г).

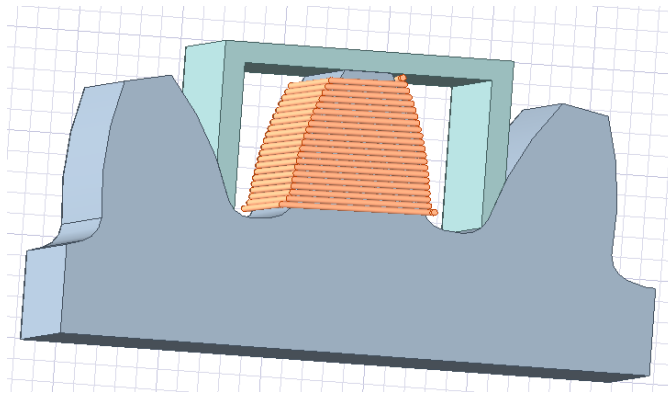


Рис. 10. 3D-модель колеса та магнітопроводу з прямокутним перерізом

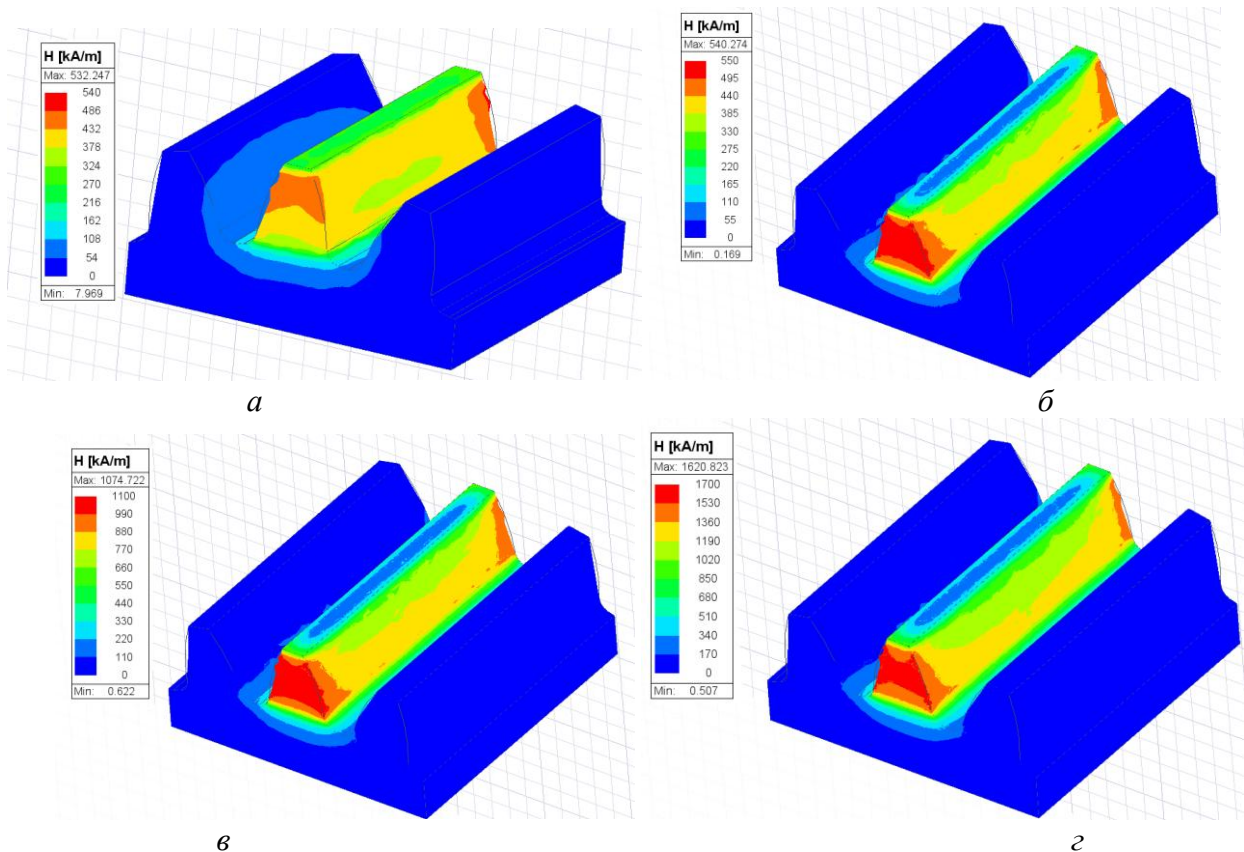


Рис. 11. Розрахунок напруженості магнітного поля для моделі магнітопроводу з прямокутним перерізом:
 а) за довжини імпульсу, що відповідає частоті 60 Гц; б) за довжини імпульсу, що відповідає частоті 4000 Гц;
 в) за підвищення струму до 2 кА; г) за підвищення струму до 3 кА.

Максимальна напруженість магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц складає 540 кА/м, за довжини імпульсу, який відповідає частоті 4000 Гц – 550 кА/м. За збільшення значення струму до 2 кА - 1100 кА/м, за збільшення значення струму до 3 кА - 1700 кА/м.

Конструкція магнітопроводу за рис. 10 та лінійним контактом є найбільш доцільною для використання в умовах серійного виробництва. Вона забезпечує потрібний рівень електромагнітної ефективності за значно зниженої складності виготовлення та монтажу. Це робить її оптимальним вибором для практичного впровадження в процес магнітно-імпульсної обробки зубчастих коліс.

Для підтвердження адекватності проведених розрахунків і перевірки коректності впливу магнітопроводу на розподіл напруженості магнітного поля була створена валідаційна 3D-модель (рис. 12 а). У цій моделі магнітопровід і зубчасте колесо були об'єднані в єдиний

суцільний твердотілий об'єкт, що дозволило виключити можливі чисельні похибки, пов'язані з умовами контакту або геометричними допусками між елементами. Це надало змогу переконатися, що виявлені закономірності розподілу магнітного поля зумовлені саме фізичними характеристиками системи, а не похибками моделювання.

За довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц, було отримано такі результати (рис. 12 б): максимальне значення напруженості магнітного поля становило 520 кА/м. Середнє значення напруженості вздовж робочої поверхні зуба варіюється в межах 312 – 416 кА/м отримані результати майже ідентичні результатам розрахунків першої 3D-моделі.

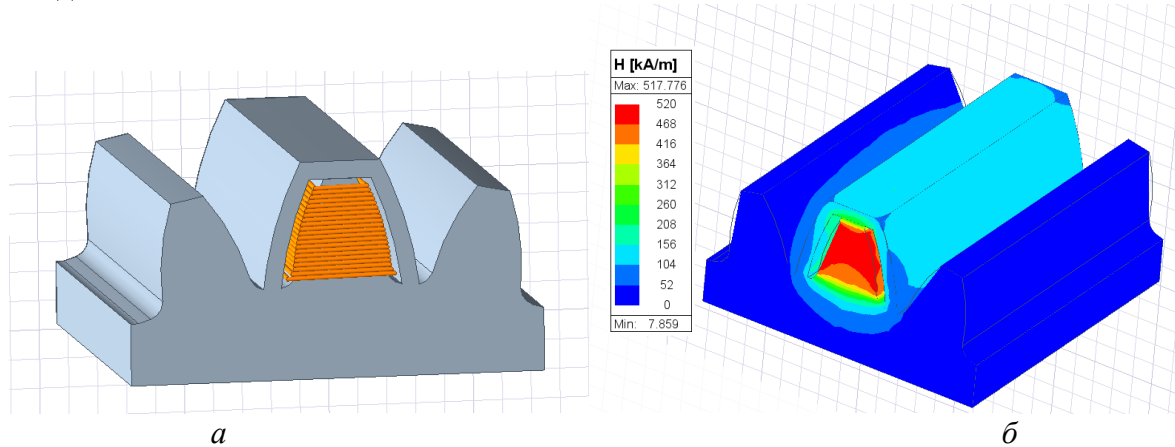


Рис. 12. а) Валідаційна 3D-модель; б) Розрахунок напруженості магнітного поля за довжини імпульсу, який відповідає частоті 60 Гц;

Результати всіх розрахунків зведені до таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків

Тип 3D-моделі	Тип контакту	Частота (Гц)	Струм (кА)	Макс. напруженість (кА/м)	Середнє значення (кА/м)
Перша 3D-модель евольвентної форми з товщиною стінки магнітопроводу 6 мм	По лініях дотику	60	1	540	378–432
	Повна площа западини	60	1	540	378–432
	По лініях дотику	4000	1	570	285–399
	По лініях дотику	4000	2	1200	600–840
	По лініях дотику	4000	3	1700	850–1190
Друга 3D-модель евольвентної форми з товщиною стінки магнітопроводу 12 мм	Повна площа западини	60	1	540	378–432
	Повна площа западини	4000	1	600	300–360
	Повна площа западини	4000	2	1200	600–840
	Повна площа западини	4000	3	1800	900–1260
	По лініях дотику	60	1	525	367–420
	По лініях дотику	4000	1	560	280–392
	По лініях дотику	4000	2	1200	600–840
	По лініях дотику	4000	3	1700	850–1190
Третя 3D-модель з прямокутним перерізом магнітопроводу та товщиною стінки 5 мм	По лініях дотику	60	1	540	378–432
	По лініях дотику	4000	1	550	330–440
	По лініях дотику	4000	2	1100	660–880
	По лініях дотику	4000	3	1700	1020–1190
Валідаційна модель	Суцільний об'єкт	60	1	520	312–416

Висновки

1. Результати чисельного моделювання підтвердили ефективність використання сталевих магнітопроводу для підвищення напруженості магнітного поля під час магнітно-імпульсної обробки зубчастих коліс.
2. Зміна товщини магнітопроводу практично не впливає на розподіл напруженості магнітного поля, що дозволяє оптимізувати конструкцію без втрати ефективності.
3. Контакт магнітопроводу по лініях дотику є рівноцінним повному контакту по площині западни зуба, проте є значно простішим у реалізації.
4. Форма магнітопроводу за рис. 10 забезпечує результати, співставні з евольвентною формою, та є найбільш доцільною з точки зору технологічності.
5. МІО на частоті імпульсу, якій відповідає частоті 4000 Гц показує втрату напруженості магнітного поля, але за підвищення струму до 2 – 3 кА досягається необхідна інтенсивність магнітного впливу.
6. Створена валідаційна модель підтвердила достовірність отриманих результатів та обґрунтованість зроблених припущень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубініна О. Т., Медведєв В. В. Розподіл напруженості магнітного поля по зубу колеса залежно від форми індуктора. *Механіка та сучасні технології*. 2024. Т. 8, № 4(103). С. 353–363. DOI: 10.20535/2521-1943.2024.8.4(103).316691.
2. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М. : Машиностроение, 1989. 112 с.
3. Дубініна О. Т., Пальчуй О. П. Розрахунок розподілу магнітного поля для 3D моделі котушки індуктивності евольвентної форми в ANSYS MAXWELL. *Матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні»*. 2024. URL: <https://imm-mmi.kpi.ua/imm2024/paper/view/30561>.
4. Лютенко Л. А. Розрахунок та вибір основних елементів магнітно-імпульсної устатковини : навчально-методичний посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2023. 107 с.
5. Cheng D. K. Field and Wave Electromagnetics. Chapter 10.7: Skin Effect. MIT OpenCourseWare. URL: https://web.mit.edu/6.013_book/www/chapter10/10.7.html.

Стаття надійшла до редакції 09.06.2025.

Стаття пройшла рецензування 29.06.2025.

Медведєв Вадим В'ячеславович – канд. техн. наук, доцент кафедри технології машинобудування, e-mail: vadim.medvedev@ua.fm.

Дубініна Ольга Тимофіївна – аспірант кафедри технології машинобудування, e-mail: olhadubinina777@gmail.com.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».