

**Ольга Дубініна<sup>1</sup>, Вадим Медведєв<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [olhadubinina777@gmail.com](mailto:olhadubinina777@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4414-2136><sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: [vadim.medvedev@ua.fm](mailto:vadim.medvedev@ua.fm). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0439-6909>ResearcherID: [ADN-0928-2022](https://orcid.org/ADN-0928-2022)**ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ФОРМИ ІНДУКТОРА ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО ЗУБЧАСТОГО КОЛЕСА**

Зменшення собівартості виробів, а наразі і збільшення екологічності технологічних процесів становить основні цілі машинобудівного виробництва. Досягнення цих цілей може бути, зокрема, за рахунок впровадження нових методів обробки, одним із яких є магнітно-імпульсна обробка (МІО). Використання цього методу потребує застосування спеціального обладнання, такого як магнітний індуктор. У статті запропоновано для зміцнення поверхневого шару зубців великогабаритного зубчастого колеса використання індуктора спеціальної форми. Застосувавши закон Біо - Савара - Лапласа для обчислення магнітних полів лінійних провідників був проведений уточнюючий розрахунок індуктора. Він показав, що запропонована конструкція не може забезпечити зміцнення на усю площину плями контакту зуба, де відбувається найбільше зношення під час роботи колеса. Тому була спроектована нова тривимірна модель індуктора для магнітно-імпульсної обробки.

**Ключові слова:** оптимізація магнітно-імпульсної обробки; зміцнення; індуктор; магнітне поле; напруженість; зубчастий вінець.

Табл.: 1. Рис.: 11. Бібл.: 5.

**Актуальність теми дослідження.** Огляд різних методів зміцнювальної обробки в сучасному машинобудуванні, які дозволяють досягнути підвищення зносостійкості деталей машин, показує, що більшість методів втратило актуальність. Вони потребують великих фінансових витрат, необхідності застосування комбінованих методів зміцнення та наявності спеціального обладнання. Одним із прогресивних методів зміцнення є магнітно-імпульсна обробка. Заготовки обробляють магнітно-імпульсним полем напруженістю 100-2000 кА/м при тривалості імпульсу 0,1-4,5 с [1]. Час та величина напруженості магнітного поля залежать від матеріалу заготовки та її розмірів. Зносостійкість при цьому підвищується у 2-4 рази. Магнітно-імпульсну обробку застосовують для зміцнення різних деталей та конструкцій, наприклад, заклепувальних, зварних, різевих з'єднань; опорних пристроїв та муфт; ресор та пружин; сталевих канатів та тросів вантажопідйомних пристроїв; різального інструменту і т. ін. Маловивченою залишається магнітно-імпульсна обробка великогабаритних деталей машин, зокрема зубчастих коліс. У цій роботі було запропоновано обробляти зубчастий вінець безпосереднім впливом магнітного поля на пляму контакту зуба. Для цього використовується індуктор спеціальної форми.

**Постановка проблеми.** Проаналізовані у процесі дослідження типи намотки для виготовлення котушки індуктивності, дали можливість побудувати у програмному комплексі SolidWorks тривимірну модель індуктора. На основі цієї моделі проведено розрахунок та побудовано топографічний графік розподілу напруженості магнітного поля вздовж поверхні зуба. Цей графік вказує на те, що магнітне поле з найбільшою силою впливає на край зуба, а не на зону плями контакту. Необхідність впливу магнітного поля безпосередньо на пляму контакту зуба, потребує розробки індуктора спеціальної форми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для нагрівання та магнітного перетворення застосовують котушки індуктивності різної форми, яка визначається конструкцією, розмірами і розміщенням заготовок. Для циліндричних заготовок використовуються циліндричні індуктори. Для пластин використовуються овальні або щілинні індуктори. Для заготовок квадратного поперечного перерізу застосовуються квадратні ін-

дуктори [2]. Проте потреби сучасного машинобудування вимагають постійного ускладнення форм та можливостей індукторів. Наприклад, котушки тори, котушки рейстрекової форми, котушки сідлоподібної форми.

За типом намотування котушки індуктивності розділяються на: спіральні, одношарові суцільні, одношарові із кроком, багатошарові рядові, універсальні, секціоновані. Котушки з одношаровим намотуванням мають досить високі характеристики, відрізняються простотою і технологічністю конструкції. Багатошарові котушки рядового намотування за своїми якостями значно гірше одношарових, тому що вони мають порівняно велику величину власної ємності.

У дослідженні [3] вказано, що в порівнянні з соленоїдами з круглими та D-подібними котушками тори з котушками рейстрекової форми мають найменші значення радіальних розмірів та об'єм механічної утримуючої системи. У роботі [4] досліджено оптимальний робочий об'єм сідлоподібної котушки, шляхом розрахунку топології магнітного поля в робочій зоні котушки методом кінцевих елементів. Визначено, що розмір зразків не повинен бути більшим ніж 28,12 % від повного об'єму котушки. Результати цих робіт вказують на те, що можливості індукторів досі є не до кінця вивченими та мають великий потенціал для дослідження.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Особливість магнітно-імпульсної обробки полягає в тому, що інструмент, що оброблює (індуктор) повинен відповідати формі деталі. Більшість валів та свердл можна обробляти всередині круглих індукторів. Але для деталей інших форм кожний раз треба розробляти свою форму індуктора. Індуктор повинен бути набагато ближче до поверхні деталі, що оброблюється, адже будь-яке магнітне поле затухає відповідно квадрату відстані. Другою особливістю є нерівномірне електромагнітне поле, що генерує індуктор. Через це існує ризик, що деякі ділянки поверхні деталі можуть бути недообробленими. Обидва питання недостатньо освітлені в літературі.

**Метою статті** є розробка індуктора спеціальної форми, використання якого дозволить впливати магнітним полем безпосередньо на пляму контакту зуба.

**Виклад основного матеріалу.** У машинобудуванні вже здійснювалися спроби створення установки для магнітно-імпульсної обробки зубчастих коліс (рис. 1) [1]. Але широкого поширення ця установка не отримала через складність конструкції, а також через втрати магнітної енергії, що відбуваються внаслідок великих повітряних зазорів між деталлю та соленоїдом.

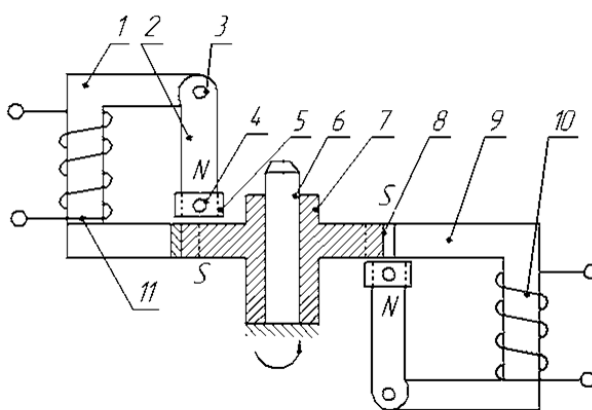


Рис. 1. Установка для МІО коліс великого діаметра:

1, 2, 9 – магнітопроводи; 3 – вісь; 4 – фіксатор; 5 – накінецьник; 6 – оправлення;  
7 – зубчасте колесо; 8 – зуби колеса; 10, 11 – соленоїд

Джерело: [1].

Крім того, конструкція установки не дозволяє впливати безпосередньо на зони найбільшого зношування зубців .

Розглянувши типи намотування для виготовлення виробничої котушки індуктивності, з погляду безпосереднього впливу на ділянки зуба з найбільшим зношуванням, отримуємо такі види розташування дроту (рис. 2) уздовж площини зуба:

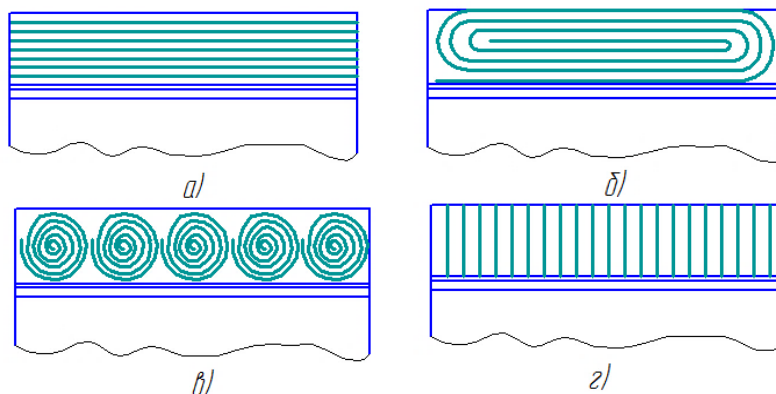


Рис. 2. Види розташування дроту уздовж площини зуба

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2, а показана схема індуктора з паралельним розташуванням дроту, на рис. 2, б – схема індуктора зі спіральним розташуванням дроту, на рис. 2, в – схема індуктора у вигляді декількох окремих спіралей, на рис. 2, г – схема індуктора з перпендикулярним розташуванням дроту. Для проектування індуктора був обраний тип а – як найбільш простий у виготовленні.

За отриманими із креслення деталі-представника розмірами у програмному комплексі SolidWorks була спроектована тривимірна модель індуктора, зображена на рис. 3. Оскільки далі за планом передбачається поглиблений розрахунок магнітного поля, витки на моделі були згруповані по 20 штук, тобто на один виток тривимірної моделі доводиться 20 витків реальної котушки.

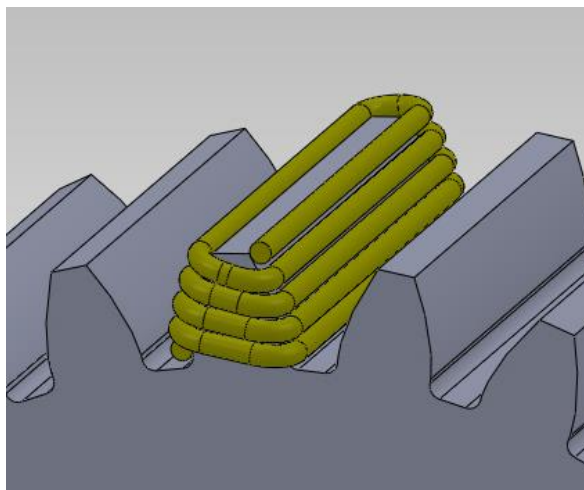


Рис. 3. 3D модель індуктора

Джерело: розроблено авторами.

У ході дослідів був наведений попередній розрахунок напруженості магнітного поля, який дорівнював 695 кА/м. Проводимо уточнений розрахунок цього індуктора, застосувавши для цього закон Біо - Савара - Лапласа для обчислення магнітних полів лінійних провідників [5]. Для цього виділимо 20 точок розташованих на поверхні евольвенти (рис. 4). Кожний виток індуктора, уздовж осової лінії так само розділимо на рівні відрізки (рис. 5).

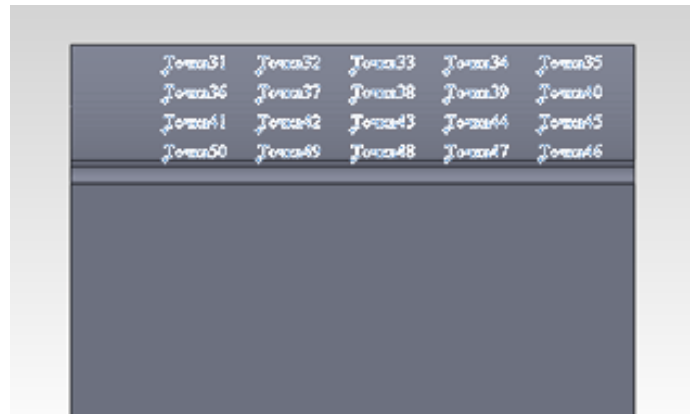


Рис. 4. Поверхня зуба з 20 виділеними точками

Джерело: розроблено авторами.

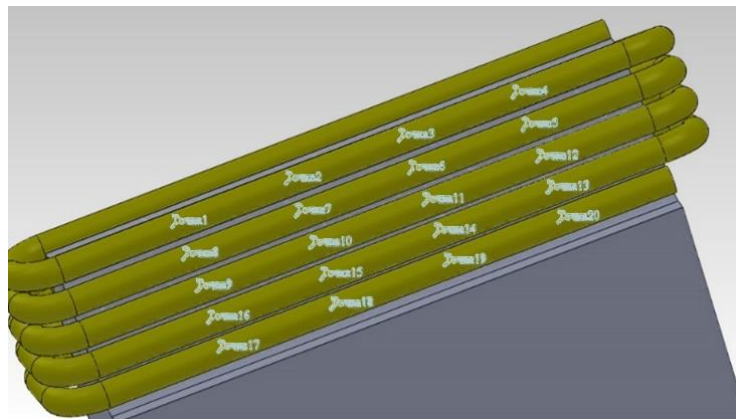


Рис. 5. Витки індуктора, розділені на рівні відрізки

Джерело: розроблено авторами

За допомогою формули Біо - Савара - Лапласса:

$$dH = k \frac{[Idl \cdot \frac{r}{r^2}]}{r^2} = k \frac{[Idl \cdot r]}{r^3}; \tag{1}$$

де  $d$  – вектор магнітного поля (рис. 6);

$dl$  – вектор площини, до якої перпендикулярний вектор  $d$  ;

$r/r$  – одиничний вектор, що вказує напрямом радіус-вектора  $r$ ;

$k$  – коефіцієнт пропорційності, пов'язаний із впливом сердечника на магнітне поле, тому що раніше було зазначено, що сердечник виконаний із магнітотвердого матеріалу приймаємо  $k=1$ .

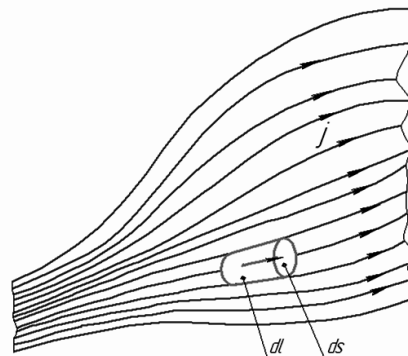


Рис. 6. Напрямок вектора магнітного поля

Джерело: [5].

Обчислено напруженість магнітного поля  $H$ , створюваного лінійним провідником, у точці  $M$ . З (рис. 7) видно, що напрямок  $d$  у точці  $M$  залишається однаковим для будь-яких елементів струму  $Idl$ :  $d$  перпендикулярно до площини, обумовленої векторами  $dl$  і  $r$  (тобто площини рисунка) і спрямоване на нас, незалежно від положення відрізка  $dl$  [5].

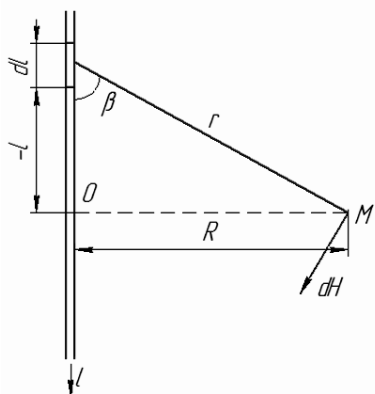


Рис. 7. Напрямок вектора магнітного поля щодо точки  $M$

Джерело: [5].

Отже, геометрична сума полів  $d$  перетворюється в алгебраїчну, і, знаючи напрямок  $d$ , а отже, і результуючого поля  $H$ , нам досить визначити лише його величину [5]. Закон Біо-Савара-Лапласа відповідно до формули наведеної вище дає:

$$dH = k \frac{I \cdot \sin \beta}{r^2} dl ; \tag{2}$$

Для інтегрування потрібно змінні  $r, l, \beta$  виразити через одну яку-небудь із них. Як змінне інтегрування вибираємо кут  $\beta$ . Маємо:

$$r = \frac{R}{\sin \beta} ; \tag{3}$$

$$-l = R \operatorname{ctg} \beta ; \tag{4}$$

$$dl = \frac{R d\beta}{\sin^2 \beta} . \tag{5}$$

Підставляємо ці вирази у формулу (2) й одержимо:

$$dH = k \frac{I}{R} \sin \beta d\beta ; \tag{6}$$

де  $R$  – відстань від точки на осі провідника зі струмом до точки сердечника, вимірюємо її за допомогою програмного комплексу SolidWorks (рис. 8).

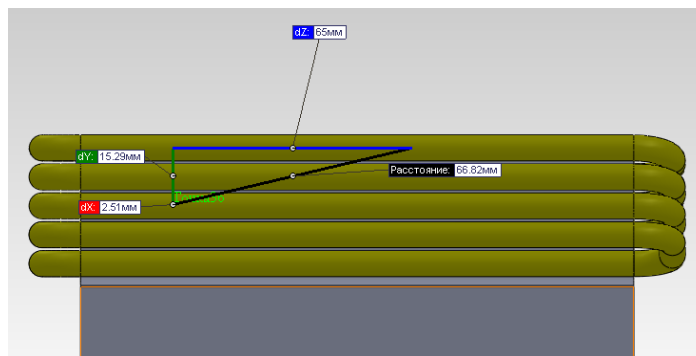


Рис. 8. Вимір відстані від точки на осі провідника зі струмом до точки сердечника

Джерело: розроблено авторами.

Для того, щоб знайти межі інтегрування для кута  $\beta$  також у програмному комплексі SolidWorks виміряно кути між точкою на поверхні зуба й двома крайніми точками відрізка на осі витка. Робимо це для двох варіантів розташування точок, для більше точного результату. Отримано:

$$30^\circ \leq \beta \leq 120^\circ \text{ або } \frac{\pi}{6} \leq \beta \leq \frac{2\pi}{3}; \quad (7)$$

$$160^\circ \leq \beta \leq 165^\circ \text{ або } \frac{8\pi}{9} \leq \beta \leq \frac{11\pi}{12}; \quad (8)$$

Проводимо інтегральний розрахунок за допомогою пакета *Mathcad* та знаходимо середнє арифметичне:

$$f = \frac{1,366 + 0,026}{2} = 0,7. \quad (9)$$

При розрахунку магнітного поля для прискорення обчислень замінимо розрахунок інтеграла на вузькій ділянці лінійною функцією:

$$Int = Int_{\max} - \frac{l - l_{\min}}{l_{\max} - l_{\min}} \cdot (Int_{\max} - Int_{\min}), \quad (10)$$

де  $Int, Int_{\max}, Int_{\min}$  – поточне, максимальне й мінімальне значення інтеграла залежно від кута;  $l, l_{\max}, l_{\min}$  – відстань (поточне, максимальна й мінімальна) між точками зуба й точками витка індуктора.

Коефіцієнт проникнення магнітного поля в метал  $k_{np} = 1,46$ , діаметр дрота  $D_{np} = 1,5$  мм, знаходимо коефіцієнт екранування витків:

$$k = \frac{1}{1,46 \cdot D_{np}}; \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{1,46 \cdot 1,5} = 0,45$$

Далі знаючи, що струм у контурі  $I = 300$  А, коефіцієнт екранування  $k = 0,45$ , коефіцієнт перерахування кількості витків  $k_l = 18$  розраховуємо в пакеті Microsoft Excel напруженість магнітного поля  $H$  кожної з 20 точок, розташованих на поверхні зуба деталі. Отримані значення занесемо в таблицю.

Таблиця – Результати розрахунку напруженості магнітного поля в 20 точках поверхні евольвенти.

Номер точки	Напруженість магнітного поля $H$ , А/м
<b>1</b>	<b>2</b>
1	1829992
2	1262201
3	254205,5
4	1262201
5	1829992
6	1699455
7	1311437
8	409268,5
9	1311437
10	1699455
11	1662740
12	1273883
13	373556,4

Закінчення табл.

1	2
14	1273883
15	1662740
16	1496291
17	1087826
18	395270,4
19	1087826
20	1496291

За отриманими даними будуюмо топографічний графік розподілу напруженості магнітного поля уздовж поверхні зуба (рис. 9).

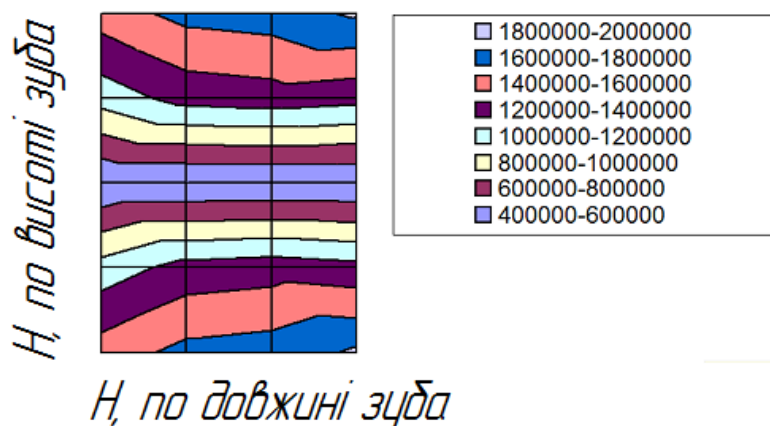


Рис. 9. Топографічний графік розподілу напруженості магнітного поля уздовж поверхні зуба

Джерело: розроблено авторами.

З графіка видно, що магнітне поле з найбільшою силою впливає на краї зуба, а не на зону плями контакту. Робимо висновок, що індуктор з паралельним розташуванням дроту не підходить для МІО зон зубців із найбільшим зношуванням.

Щоб домогтися максимальної напруженості магнітного поля в зоні найбільшого зношування, витки індуктора, необхідно розташовувати перпендикулярно до поверхні зуба як показано на рис. 2, з. Таке розташування дроту дозволить проводити обробку бічних поверхонь двох сусідніх зубців (рис. 10).

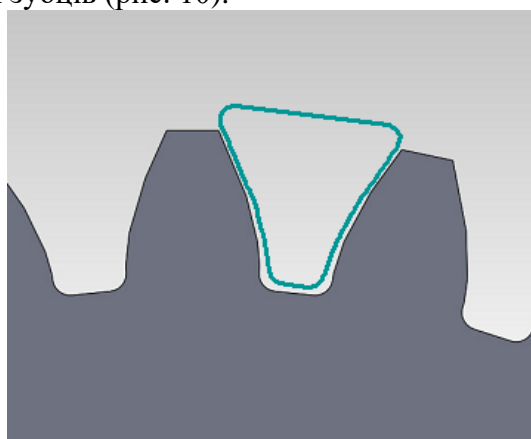


Рис. 10. Розташування індуктора між зубцями

Джерело: розроблено авторами.

Вісь такого індуктора повинна бути паралельна западинам зуба. У програмному комплексі SolidWorks, була спроектована тривимірна модель нового індуктора (рис. 11).

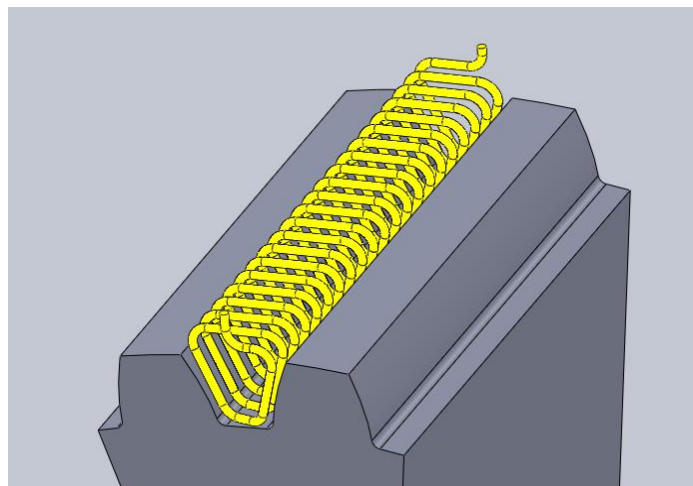


Рис. 11. Індуктор з перпендикулярним розташуванням дроту

Джерело: розроблено авторами.

За графіком так само видно, що напруженість магнітного поля значно більше розрахункової в 695 кА/м. Це значить, що на практиці при визначенні величини напруженості магнітного поля для магнітотвердих сердечників, можна застосовувати менші величини сили струму.

**Висновки.** При застосуванні магнітно-імпульсної обробки необхідно приділяти велику увагу формі і типу намотки індуктора. Тип намотки і розташування витків котушки індуктора також обмежуються конструкцією деталі. Особливі конструкційні обмеження встановлюються там, де необхідно оброблювати внутрішні порожнини. До таких порожнин належать проміжки між зубцями зубчастих коліс.

Магнітне поле індуктора, який має паралельну намотку та обхвачує зуб, з найбільшою силою впливає на краї зуба, а не на зону плями контакту. Також розраховано, що при заданих параметрах електричного генератора, магнітне поле не може перевищувати 1800 кА/м.

Оптимізація форми і намотки індуктора дозволяє зменшити вимоги до електричних генераторів, при збереженні якості обробки на одному рівні.

#### Список використаних джерел

1. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин / Б. В. Малыгин. – М. : Машиностроение, 1989. – 112 с.
2. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М. : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.
3. Васецкий Ю. М. Тороїдальні магнітні системи з котушками рейстрекової форми [Електронний ресурс] / Ю. М. Васецкий, І. Л. Мазуренко, А. В. Павлюк // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України : зб. наук. праць. – К. : ІЕД НАНУ, 2011. – Вип. 30. – С. 91-102. – Режим доступу: <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/64075/16-Vasetsky.pdf?sequence=1>.
4. Саміла А. П. Дослідження топології магнітного поля в котушці сідлоподібної форми [Електронний ресурс] / А. П. Саміла // Вісник Хмельницького національного університету. – 2018. – № 5 (265). – С. 140-145. – Режим доступу: [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018\\_5/\(265\)%202018-5-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_5/(265)%202018-5-t.pdf).
5. Зисман З. А. Курс общей физики / З. А. Зисман, О. М. Тодес. – Т. 2: Электричество и магнетизм. – М. : Наука, 1974. – 366 с.

#### References

1. Malyigin, B.V. (1989). *Magnitnoe uprochnenie instrumenta i detalei mashin [Magnetic hardening of tools and machine parts]*. Mashinostroenie.
2. Semenov, B.Yu. (2005). *Silovaia elektronika: ot prostogo k slozhnomu [Power electronics: from simple to complex]*. SOLON-Press.



3. Vasetskiy, Yu.M., Mazurenko, I.L., & Pavlyuk, A.V. (2011). Toroidalni mahnitni systemy z kotushkamy reistrekovoi formy [Toroidal magnetic systems with coils of a reystrekova form]. *Pratsi Institutu elektrodinamiki Natsionalnoi akademii nauk Ukraini – Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (30), 91-102. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/64075/16-Vasetsky.pdf?sequence=1>.

4. Samila, A.P. (2018). Doslidzhennia topologii mahnitnoho polia v kotushtsi sidlopodibnoi formy [Doslidjennya topology magnitnogo polya v kotushtsi sidlopodibnoi formi]. *Visnik Hmelnytskogo natsionalnogo universitetu – Bulletin of the Khmelnytskyi National University*, 5(265), 140-145. [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018\\_5/\(265\)%202018-5-t.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/pdfbase/2018/2018_5/(265)%202018-5-t.pdf).

5. Zisman, Z.A., Todes, O.M. (1974). *Kurs obshchei fiziki [General physics course]*. Vol. 2. *Elektrichestvo i magnetizm – Electricity and magnetism*. Nauka.

Отримано 11.03.2023

UDC 621.7

***Olha Dubinina<sup>1</sup>, Vadym Medvedev<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>PhD-student of the Department of Manufacturing Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [olhadubinina777@gmail.com](mailto:olhadubinina777@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-4414-2136>

<sup>2</sup>PhD in Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering  
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [vadim.medvedev@ua.fm](mailto:vadim.medvedev@ua.fm). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0439-6909>

**ResearcherID:** [ADN-0928-2022](https://orcid.org/ADN-0928-2022)

## **JUSTIFICATION OF CHOICE OF INDUCTOR FORM FOR LARGE GEAR MAGNETIC-PULSE PROCESSING**

*Reducing products cost, and currently increasing the environmental friendliness of technological processes, is the main goal of machine-building production. Achieving these goals can be, in particular, due to the introduction of new processing methods. One of which is magnetic pulse processing (MPP). Using this method requires the use of special equipment, such as a magnetic inductor.*

*The article proposes the use of a specially shaped inductor to strengthen the surface layer of the teeth of a large-sized gear wheel. The considered types of winding for the manufacture of a production coil of inductance from the point of view of the direct effect on the areas of the tooth with the greatest wear. Applying the Biot - Savart - Laplace law to calculate the magnetic fields of linear conductors, a detailed calculation of the inductor was carried out. It showed that the proposed design cannot provide strengthening over the entire plane of the contact spot of the tooth, where the greatest wear occurs during the operation of the wheel. When applying magnetic pulse processing, it is necessary to pay great attention to the shape and type of inductor winding. The type of winding and the turns arrangement of the inductor coil are also limited by the design of the part. Special design restrictions are established where it is necessary to process internal cavities. Such cavities include the spaces between teeth of gear wheels.*

*The article states that the magnetic field of the inductor, which has a parallel winding and covers a tooth, has the greatest force on the edges of the tooth, and not on the area of the contact patch. It is also calculated that the magnetic field cannot exceed 1800 kA/m with the given parameters of the electric generator.*

*Optimizing inductor shape and winding makes it possible to significantly reduce the requirements for generators while keeping the quality of the output at the same level.*

**Keywords:** optimization magnetic pulse processing; strengthening; inductor; magnetic field; tension; gear ring.

**Table:** 1. **Fig.:** 11. **References:** 5.