

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Петренко Микита Павлович

УДК 621.318:537.6

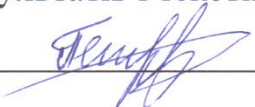
ДИСЕРТАЦІЯ
ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛЮ СОЛЕНОЇДІВ ДЛЯ СТВОРЕННЯ
ІМПУЛЬСНИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ
АНАЛІТИЧНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктор філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ М.П. Петренко

Науковий керівник:

Михайлов Валерій Михайлович,
доктор технічних наук, професор

Харків 2020

АНОТАЦІЯ

Петренко М.П. Визначення профілю соленоїдів для створення імпульсних магнітних полів за допомогою аналітичних розв'язків задач аналізу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (14 – Електрична інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2020.

Об'єктом дослідження є імпульсне магнітне поле, що утворюється масивними одновитковими соленоїдами при магнітно-імпульсній обробці металевих заготовок.

Предметом дослідження є профілі масивних одновиткових соленоїдів, що забезпечують заданий розподіл імпульсного магнітного поля на поверхні оброблюваної металевої заготовки.

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача визначення профілів масивних одновиткових соленоїдів за допомогою аналітичних розв'язків задач аналізу імпульсного магнітного поля, що утворюється джерелами елементарної форми.

Дослідження виконано за допомогою фундаментальних положень теоретичної електротехніки, математичної фізики, чисельних методів аналізу та сучасних інформаційних технологій.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені задачі дослідження, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, наведено дані про наукову новизну, практичне значення, апробацію результатів та публікації.

У першому розділі проведено огляд конструкцій полеутворюючих систем для магнітно-імпульсної обробки металів та аналіз відомих методів визначення їх форми. Детально розглядаються два підходи до вирішення цієї задачі. Перший базується на ітеративному або аналітичному підборі параметрів полеутворюючої системи, другий – на вирішенні задачі продовження поля з граничної поверхні.

Обґрунтовано необхідність розвитку методів, заснованих на використанні аналітичних розв'язків задач аналізу для джерел елементарної форми, обрано напрями досліджень, поставлені основні задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі запропоновано метод визначення форми масивних одновиткових соленоїдів для створення заданого розподілу азимутальної складової індукції магнітного поля на поверхні циліндричної та плоскої заготовки, що засновується на використанні систем елементарних джерел зі струмами, котрі розташовані поблизу цих поверхонь. При цьому середовище поза провідниками вважається непровідним і немагнітним, а заготовка замінюється ідеальним надпровідником: нескінченно довгим циліндром або півпростором. Розглядаються три випадки. У першому елементарні джерела – це кільця зі струмами нескінченно малого перетину, що розташовуються співвісно внутрішньому циліндру, у другому – такі ж співвісні кільця, але розташовані паралельно плоскій границі нижнього півпростору, у третьому – осі зі струмами, розташовані паралельно нижньому півпростору. Наведено формули для розрахунку індукції магнітного поля та магнітного потоку, що створюються такими джерелами. Варіацією геометричними параметрами елементарних джерел та струмами, що в них протікають досягнуто відповідності утвореного поверхневого розподілу індукції та заданого. Для підбору оптимальних параметрів системи застосовано метод градієнтного спуску. Для визначення шуканого контуру профілю масивного соленоїда побудовано силові лінії магнітного поля систем елементарних джерел, що забезпечують найменшу похибку відтворення заданого розподілу. Правильність визначення точного контуру профіля соленоїда підтверджується за допомогою методу інтегральних рівнянь.

У третьому розділі запропоновано апроксимацію точного контуру профілю масивного одновиткового соленоїда багатокутником, що дозволило значно спростити його проєктування і виготовлення. Досліджено розподіли індукції магнітного поля та їх розбіжності із заданим для соленоїдів точного та апроксимованих профілів. Розраховано та порівняно індуктивність системи

соленоїд – циліндр. Детально розглянуто розподіли поверхневої густини струму на крайках апроксимованих соленоїдів і визначено вплив радіуса скруглення та величини кута, що скруглюється, на її максимальні значення. Розрахунки третього розділу виконано за допомогою чисельного розв'язання інтегрального рівняння відносно поверхневої густини струму.

У четвертому розділі експериментально досліджено розподіли індукції плоскомеридіанного магнітного поля, що створюється масивним одновитковим соленоїдом поблизу циліндричної поверхні заготовки. Для цього із латуні було виготовлено соленоїд, контур профілю котрого отримали за допомогою методу, який запропоновано в дисертації. Точний контур профіля масивного соленоїда, котрий отримали за допомогою системи дев'яти елементарних кільцевих джерел, було апроксимовано шестикутником. Соленоїд розміщувався на спеціальному стенді співвісно з мідною оболонкою, яка імітувала заготовку. У проміжку між соленоїдом та оболонкою розташовувався індукційний перетворювач, за допомогою якого вимірювали відносну індукцію в контрольних точках поблизу поверхні оболонки. Через соленоїд пропускали імпульси струму від низьковольтного генератора, котрі мали форму експоненційно згасаючої синусоїди. Частота імпульсів змінювалась в діапазоні (40÷225) кГц зміною ємності батареї конденсаторів в генераторі. Наведено відносні розбіжності між вимірними та заданими розподілами, які при всіх варіантах імпульсу не перевищують 6 відсотків по всій довжині оброблюваної поверхні.

Результати досліджень дозволили отримати низку наукових результатів:

- уперше для визначення форми одновиткового масивного соленоїда, що забезпечує заданий розподіл імпульсного магнітного поля на циліндричній поверхні металевої заготовки при магнітно-імпульсній обробці, застосовано функцію Гріна;

- уперше запропоновано апроксимацію складного криволінійного контуру профілю масивного соленоїда контуром багатокутника, що дозволило суттєво спростити його проектування та виготовлення;

- отримало подальший розвиток застосування функцій Гріна для визначення профілів масивних соленоїдів, що забезпечують заданий розподіл плоскомеридіанного та плоскопаралельного магнітного поля на плоскій поверхні металевої заготовки;

- достовірність теоретичних результатів, отриманих у дисертації, підтверджено вимірюваннями відносних розподілів індукції магнітного поля, що створюється масивним соленоїдом, поблизу поверхні циліндричної заготовки на стенді для фізичного моделювання;

- Результати досліджень використано в НТУ «ХПІ» при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі інженерної електрофізики.

Ключові слова: масивний соленоїд, магнітно-імпульсна обробка, оптимізація форми, функція Гріна, імпульсне магнітне поле, різкий поверхневий ефект.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Коновалов О.Я., Михайлов В.М., Петренко Н.П. Решение задачи продолжения магнитного поля с цилиндрической поверхности при помощи функции Грина. *Технічна електродинаміка*. 2016. №5. С. 11-13.

2. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Approximation of exact massive solenoid profile for generating pulsed magnetic field. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 13-16.

3. Михайлов В.М., Петренко М.П. Визначення профілю соленоїда для створення імпульсного магнітного поля на плоскій границі провідника. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2018. Вип. 50. С. 96-100.

4. Борцов А.В, Петренко М.П. Експериментальна перевірка методу визначення профілю масивного соленоїда, заснованого на використанні системи кільцевих провідників. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*. 2018. №36. С. 10-13.

5. Петренко Н.П. О распределении импульсного тока в одновитковом массивном соленоиде сложного профиля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2019. № 1. С. 42-46.

6. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Inductor shape determination for electromagnetic forming of sheet workpieces. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2020. no. 1. pp. 74-77.

SUMMARY

Petrenko M.P. Solenoid shape determination for generating pulsed magnetic fields by using analytical solutions of analysis problems. – Manuscript.

The thesis is submitted to obtain a scientific degree of Doctor of Philosophy, specialty 141 – Electricity, electronics and electrical engineering (14 – Electrical engineering). – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2020.

The object of research is the pulsed electromagnetic field, which is created using massive single-turn solenoid in the process of electromagnetic forming of metal workpieces.

The subject of research are profiles of massive single-turn solenoids which generate a given distribution of magnetic field at the surface of a metal workpiece.

The scientific and practical task of determining the massive single-turn solenoid profiles is solved using analytical solutions of analysis problems for pulsed magnetic field which is created by elementary sources.

The problems of scientific research were solved using fundamental concepts of theoretical electrical engineering, mathematical physics, numerical methods of analysis and modern informational technologies.

The introduction substantiates the relevance of research tasks showing connection between the work and scientific programs, plans, themes. The information on the scientific novelty and practical value the obtained results are stated.

The first chapter provides an overview of known systems for generating electromagnetic pulsed field and methods which are used to determine its shape. Two different approaches are emphasized. The former is based on iterative or analytical adjustment of field-generating system parameters. The latter is the use of the solution of the problem of field continuation from boundary surface. The further development of the methods which are based on analytical solutions of analysis problems for elementary field sources is justified, the direction of research is chosen and objectives are formulated.

The second chapter presents the method aimed to determine the shape of massive single-turn solenoids which generates a given distribution of tangent component of magnetic induction at the surfaces of cylindrical or sheet metal workpieces in the process of electromagnetic forming. The method is based on using the solutions of analysis problems for systems which consist of current carrying conductors of elementary shape that are placed near the boundary surfaces, whereas environment outside the conductors is supposed to be nonconducting and nonmagnetic. The ideal skin-effect approximation is used, according to which we suppose that currents flow within the infinitely thin surface layers. With accordance to the approximation the cylindrical workpiece is replaced by ideal superconductive cylinder of infinite length, the flat workpiece is replaced by superconductive half-space. There are three cases described. In the first case elementary sources is represented by annular current carrying conductors which are places axially with the inner cylinder. The cross section of the annular conductors is infinitely small. In the second case there are the same annular axisymmetric conductors but placed above the flat boundary of superconducting half-space and are parallel to it. In the third case elementary sources are straight current carrying axes which are parallel to each other and to the lower superconducting half-space. The formulas for magnetic induction and magnetic flux for that systems are stated. Compliance with given boundary distribution of magnetic induction is achieved by varying of system parameters using gradient descent optimization method. Field lines for the system of elementary sources, that provides the smallest differences between given and obtained induction distributions, were built and used to determine the exact profile of massive single-turn solenoid that generate given magnetic induction distribution. The correctness of exact profile was verified using the method of integral equations.

In the third chapter approximation of exact massive single-turn solenoid profile, which significantly simplify its design and manufacturing, is proposed. Magnetic induction distributions, which are generated by the solenoids, are calculated and errors due to the approximation are investigated. Inductance of the solenoid-cylinder system is compared for different accuracy of approximation and different outer radius of the

solenoid. Surface current density distributions at the solenoid contour are shown. An influence of radius of rounding of sharp edges is considered and relation between the angle of rounded edge corner and maximum surface current density is described. Calculations of the third chapter were performed using a numerical solution of the integral equation with respect to surface current density.

In the fourth chapter an experimental research on relative induction distributions of axisymmetric magnetic field that is created using brass massive single-turn solenoid at the surface of cylindrical workpiece is stated, whereas the shape of the solenoid was determined according to the method which is described in the thesis. The exact profile contour was chosen by one of the field lines which cover the system of nine annular conductors. With accordance to the approximation method the exact profile contour was replaced by six-sided polygon. The solenoid is placed at the special installation axially with a cylindrical copper shell. Induction sensor is placed into the gap between the solenoid and the shell to measure relative induction at reference points near the shell boundary. The solenoid is connected to low voltage pulse generator which creates the pulses of exponentially damped sine wave. The frequency of the pulses is changed in the range of (40÷225) kHz varying the capacitance of the generator battery. Relative differences between measured and given induction distributions are shown and do not exceed 6 percent at all reference points within working area for every variant of pulse frequency.

The research results have allowed obtaining a number of scientific results:

- for the first time, an approach which is based on the use of Green's function to determine a shape of massive single-turn solenoid for generating a given magnetic induction distribution at cylindrical workpiece surface is proposed for electromagnetic forming;

- for the first time, approximation of curvilinear contour of massive single-turn solenoid profile by a polygon, which allow to significantly simplify its design and manufacturing, is researched;

- the use of Green's functions is developed for determining of massive single-turn solenoids which generates given distribution of axisymmetric or plane-parallel magnetic field at the flat surface of sheet metal workpiece;

- theoretical results obtained in the dissertation are confirmed by measurements of relative distributions of magnetic induction which is created by massive single-turn solenoid at the cylindrical boundary of metal workpiece using the installation for physical modeling;

- the results of the research were used for research work at Engineering electrophysics department of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute".

Keywords: massive solenoid, electromagnetic forming, shape optimization, Green's function, pulsed magnetic field, sharp skin effect.

LIST OF PUBLICATION ON THE SUBJECT OF DISSERTATION

Scientific papers, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Konovalov O.Ya., Mikhailov V.M., Petrenko N.P. Solution of the problem of the magnetic field continuation from cylindrical surface by using Green's. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2016. no 5. pp. 11-13

2. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Approximation of exact massive solenoid profile for generating pulsed magnetic field. *Tekhnichna Elektrodyamika*. 2018. no 1. pp. 13-16.

3. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Determination of solenoid profile for generating pulsed magnetic field on flat conductor boundary. *Pratsi Instytutu elektrodyamiky NAN Ukrayiny*. 2018. issue. 50. pp. 96-100.

4. Bortsov A.V., Petrenko M.P. Experimental validation of the method for determination a massive solenoid profile based on using a system of annular conductors. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Tekhnika ta elektrofizyka vysokyykh napruh*. 2018. no 36. pp. 10-13

5. Petrenko N.P. About pulsed current distribution in massive single-turn solenoid. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Problemy udoskonalyuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka.* 2019. no 1. pp. 42-46.

6. Mikhailov V.M., Petrenko M.P. Inductor shape determination for electromagnetic forming of sheet workpieces. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2020. no. 1. pp. 74-77.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОЛЕУТВОРЮЮЧИХ СИСТЕМ ТА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ФОРМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ.....	11
1.1 Огляд конструкцій полеутворюючих систем для магнітно-імпульсної обробки.....	11
1.2 Класифікація методів оптимального синтезу полеутворюючих систем.....	15
1.3 Методи, що засновані на підборі параметрів полеутворюючої системи	16
1.4 Методи, що засновані на розв’язаннях задач продовження поля.....	28
1.5 Висновки першого розділу.....	38
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ КОНТУРУ ПРОФІЛЮ МАСИВНИХ ОДНОВИТКОВИХ СОЛЕНОЇДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІТИЧНИХ РОЗВ’ЯЗКІВ ЗАДАЧ АНАЛІЗУ.....	40
2.1 Ідея методу.....	40
2.2 Магнітне поле системи кільцеві струми – співвісний нескінченно довгий ідеально надпровідний циліндр.....	41
2.3 Магнітне поле системи елементарних кільцевих струмів над ідеально надпровідним півпростором.....	49
2.4 Магнітне поле системи прямолінійні провідники зі струмами – ідеально надпровідний півпростір	57
2.5 Визначення форми масивних соленоїдів для магнітно-імпульсного обтиску трубчастих заготовок.....	66
2.6 Висновки другого розділу.....	78
РОЗДІЛ 3. СПРОЩЕННЯ КОНТУРУ ТОЧНОГО ПРОФІЛЮ МАСИВНОГО ОДНОВИТКОВОГО СОЛЕНОЇДА СКЛАДНОЇ ФОРМИ.....	79
3.1 Апроксимація контуру точного профілю соленоїда багатокутником.....	79
3.2 Розподіл імпульсного струму в соленоїді апроксимованого профілю.....	85

3.3 Висновки третього розділу.....	93
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПРОФІЛЮ МАСИВНОГО СОЛЕНОЇДА ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ОБТИСКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК.....	95
4.1 Опис стенду для фізичного моделювання	95
4.2 Методика та результати вимірювань	98
4.3 Висновки четвертого розділу.....	104
ВИСНОВКИ.....	106
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	109
ДОДАТКИ.....	118