

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРА В МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ ІНДУКЦІЙНОЇ КАНАЛЬНОЇ ПЕЧІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА МІДНОЇ КАТАНКИ

¹Гайденко Ю.А., к.т.н., доцент, ²Перетятко Ю.В., к.т.н., доцент, ³Зяблов Д.Д., студент

КПІ імені Ігоря Сікорського, ¹кафедра електромеханіки, ²кафедра теоретичної електротехніки, ³кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. На сьогодні, переважна більшість виробництв мідних жил силових кабелів засновані на технології висхідного вертикального лиття UPCAST, яка була вперше запроваджена фінською фірмою Outokumpu [1]. Нині у світі встановлено понад 200 таких установок із продуктивністю від 1000 до 40000 тон на рік.

Особливістю процесу UPCAST є одержання катанки необхідного діаметра виключно операцією лиття і, як наслідок, можливість виробництва катанки з безкисневої міді.

Дана технологія дозволяє отримати мідну катанку з високими показниками якості металу. До таких показників відносять, зокрема: однорідність складу, хімічна чистота, тощо.

В основу технології UPCAST покладено плавлення міді індукційним способом за допомогою індукційної каналної печі до якої підводиться електрична енергія змінного струму.

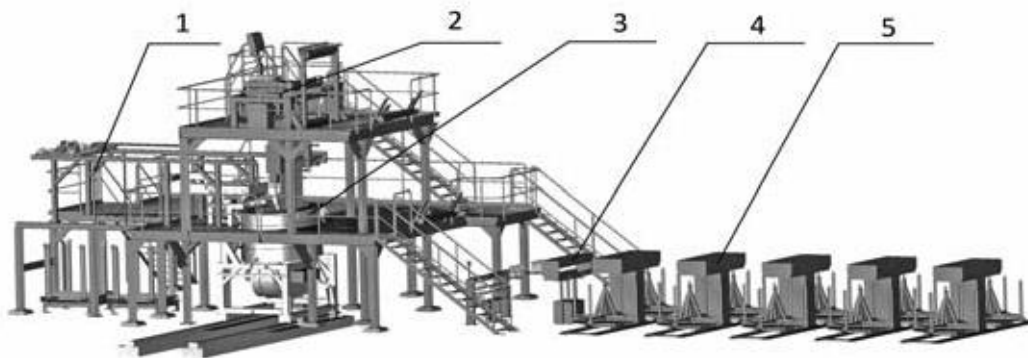


Рисунок 1 – Установа UPCAST продуктивністю 10000 тон на рік

Принципова схема 10-ти струмкової установки UPCAST продуктивністю 10000 тон на рік показана на рис. 1 [2]. Мідні катоди (вихідна шихта) за допомогою завантажувального пристрою 1 надходять у плавильно-роздавальну піч 3, яка складається з двох сполучених між собою камер: меншої – для прийому розплаву та більшої – для лиття катанки. Розплав безперервно подається у водоохолоджувані кристалізатори ливарної машини 2, де відбувається його затвердіння з утворенням безперервно-ливої катанки і подальше інтенсивне охолодження. Індивідуальні приймальні пристрої 5 формують бухти готової

катанки з попереднім нанесенням лаку за допомогою пристрою для нанесення захисного покриття 4.

Для вирішення питань модернізації технологічного процесу з урахуванням конкретних виробничих умов, вибору необхідних електричних та енергетичних характеристик електротехнічного обладнання та раціональних режимів його функціонування в роботі [3] була розроблена електротеплова модель індукційної каналної печі для моделювання електромагнітних й теплових процесів, які протікають досить тривалий час (до 36 годин). Модель також враховує послідовну реалізацію основних технологічних операцій таких як: нагрівання та плавлення мідного шаблону, завантаження та розплавлення мідних катодів, безперервне розливання міді через кристалізатор, тощо.

Очевидно, що в індукційній печі протікають щонайменше два взаємно пов'язаних фізичних процеси: електромагнітний і тепловий. Моделювання таких мультифізичних процесів, саме по собі, є досить складною задачею. Для її розв'язання на сьогодні існують два основних підходи:

- 1) на базі *еквівалентних ланцюгів* (схем заміщення);
- 2) *польовий*, що реалізовується на основі методу скінчених елементів.

В роботі [3] авторами був обраний перший підхід, що заснований на теорії еквівалентних ланцюгів. Такий спосіб моделювання пов'язаних електричних та теплових процесів є набагато простішим (порівняно з польовим методом) в реалізації і вимагає менше обчислювальних потужностей комп'ютерів [4].

Принцип дії електричного блоку індукційної печі аналогічний до принципу дії однофазного силового трансформатора, що працює в режимі короткого замикання [5, 6]. Водночас електричні параметри каналної електропечі та звичайного трансформатора помітно відрізняються, що зумовлено відмінністю їх конструкцій.

Активна зона індукційної каналної печі представлена на рис. 2.

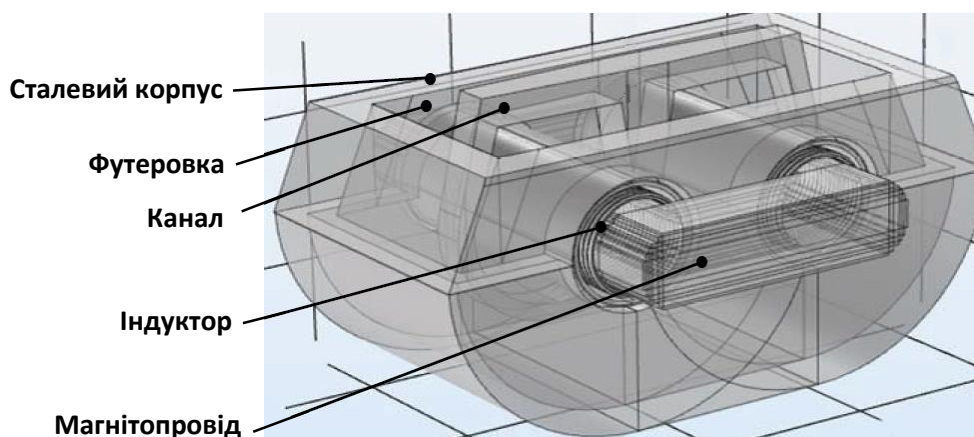


Рисунок 2 – Активна зона індукційної каналної печі

Конструктивно піч складається з футерованої ванни, в якій розміщується вся маса металу, що розплавляється, і індукційної одиниці з каналом [1, 2]. Ванна з'єднана з плавильним каналом, також заповненим розплавом. Розплав у каналі

і прилеглий ділянці ванни утворює замкнене провідне кільце. Система "індуктор - магнітопровід" називається **пічним трансформатором**.

Футеровка, що забезпечує теплову ізоляцію розплавленого металу, є вогнетривким масивом з циліндричним прорізом в який вставляється індуктор. Витки обмотки індуктора навиті на два стержні замкнутого магнітопроводу.

Індукційна одиниця об'єднує пічний трансформатор з каналом, в якому спочатку розташовується мідний шаблон, а після його розплавлення канал заповнюється розплавленою міддю.

Індуктор є *первинною обмоткою* трансформатора, а роль *вторинного витка* виконує розплавлений метал, що заповнює канал і знаходиться в нижній частині ванни. Струм, що протікає у вторинному ланцюзі, викликає нагрівання (за рахунок виділеної в ньому енергії Джоулевого тепла) та плавлення мідного шаблону. При цьому майже вся енергія виділяється в каналі, що має малий переріз.

В електромагнітній задачі індуктор з розплавом міді моделюється **однофазним лінійним трансформатором**, до первинної обмотки якого підключене синусоїдальне джерело однофазної напруги промислової частоти 50 Гц, а до вторинної – нелінійний активний опір навантаження, який залежить від температури шаблону що нагрівається, а також від глибини проникнення магнітного поля в його об'єм. Внутрішні параметри первинної обмотки R_1, L_1 включають і параметри підвідної лінії.

На рис. 3 представлена комп'ютерна реалізація [3] моделі індукційної каналної печі на базі сертифікованих програмних пакетів Matlab/Simulink/SPS.

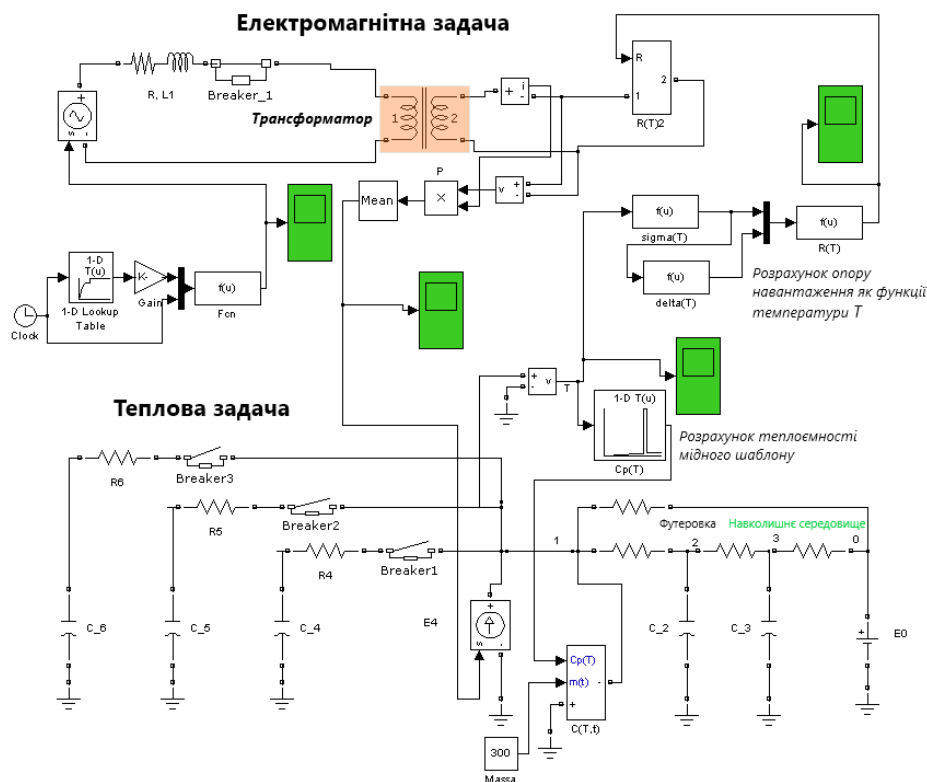


Рисунок 3 – S-модель пов'язаних електротеплових процесів в індукційній каналній печі (реалізована в пакеті Matlab-Simulink)

Як було зазначено вище, дана модель заснована на методі мультифізичного моделювання різномаштабних за часом електромагнітних (характерний час $\sim 0,02$ с) та теплових (характерний час ~ 1 година) перехідних процесів в індукційній каналній печі для отримання мідної катанки. В основу методу покладені пов'язані між собою нелінійні електрична та теплова схеми заміщення каналної печі, що враховують такі діючі фактори як залежність електропровідності та теплоємності мідного шаблону від температури, наявність фазового переходу в мідному шаблоні при його нагріванні до температури, що перевищує температуру плавлення, збільшення маси розплаву періодичного завантаження мідних катодів у зону розплаву та зменшення маси розплаву внаслідок безперервного лиття мідної катанки [3].

Головним елементом даної моделі є однофазний трансформатор (виділено помаранчевим кольором на рис. 3), який моделює взаємозв'язок індуктора, магнітопровода і мідного катода, що підлягає розплавленню. Визначення параметрів такого трансформатора є досить нетривіальною задачею і потребує окремої методики.

З огляду на це, метою даного дослідження є розробка методики розрахунку параметрів схеми заміщення однофазного пічного трансформатора індукційній каналній печі.

В якості схеми заміщення була прийнята стандартна Т-подібна схема, що зображена на рис. 4.

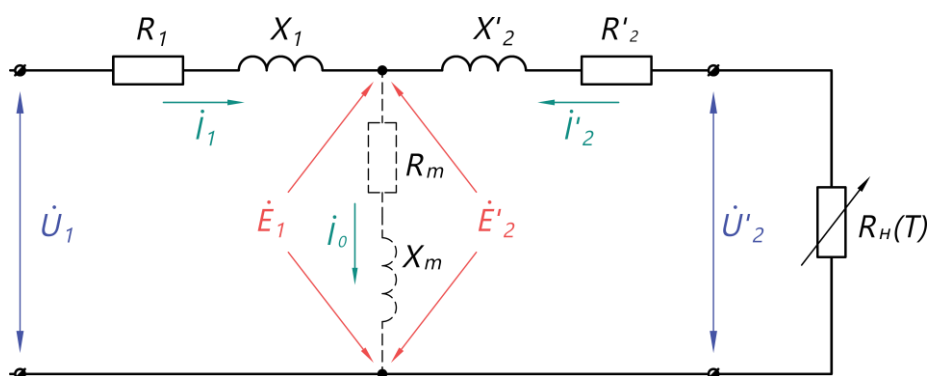


Рисунок 4 – Т-подібна схема заміщення однофазного пічного трансформатора, який моделює електромагнітні процеси в індукційній каналній печі

Вище було відмічено, що за принципом дії електричний блок індукційної печі аналогічний однофазному силовому трансформатору, який працює в режимі короткого замикання. Тому зі схеми заміщення можна виключити гілку намагнічення з параметрами R_m, X_m (зображено пунктиром на рис. 4).

Активний опір навантаження R_n відповідає опору мідного катода, який розплавляється в процесі роботи печі і, тому, сильно залежить від температури $R_n(T)$. Величина даного опору розраховується в кожний момент часу при чисельному інтегруванні рівнянь, що входять в зображену на рис. 3 модель.

Оскільки вторинна обмотка зазначеного трансформатора, по суті, являє собою один короткозамкнений виток, то його індуктивністю і індуктивним опором, без особливої втрати точності, можна знехтувати ($L_2 \approx 0, X_2' \approx 0$).

Отже, залишається визначити лише три параметри схеми заміщення, а саме: параметри первинної гілки R_1, X_1 та активний опір вторинної гілки R_2' . Розрахунок проведений за наступним алгоритмом [7, 8]:

1. Вихідні дані для розрахунку параметрів первинної обмотки

1.1. Тип обмотки – циліндрична двошарова;

1.2. Поперечний переріз (з зазначенням основних розмірів в мм) магнітопроводу з розміщеною на ньому первинною обмоткою (індуктором) показано на рис. 5

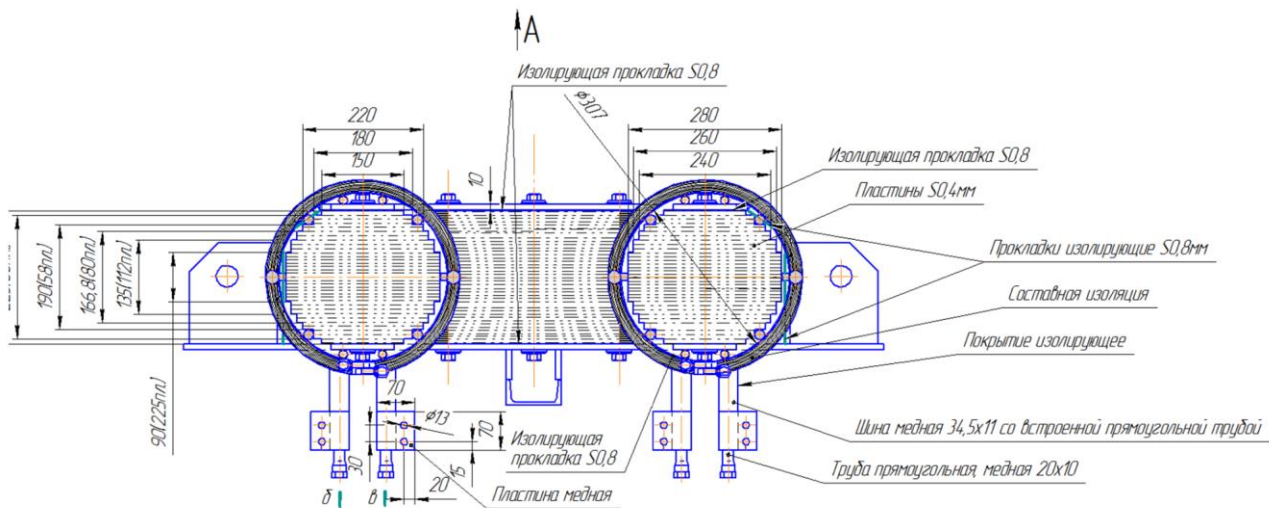


Рисунок 5 – Поперечний переріз індуктора індукційної каналної печі

1.3. Провідник первинної обмотки має прямокутний поперечний переріз порожнистий всередині (рис. 6). Порожнина всередині провідника призначена для охолодження обмотки рідким холодагентом. Тому на рис. 5 і далі в тексті порожнина називається «трубкою».

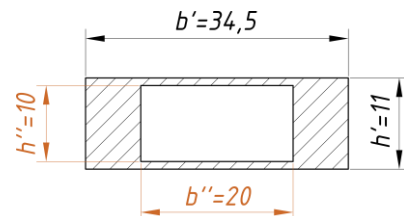


Рисунок 6 – Поперечний переріз провідника первинної обмотки трансформатора

2. Геометричні дані первинної обмотки

2.1. Площа поперечного перерізу мідної шини

порожнистої трубки провідника первинної обмотки

$S' = h' \cdot b' = 379,5 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу мідної шини з вбудованою прямокутною трубкою;

$S'' = h'' \cdot b'' = 200 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу вбудованої прямокутної трубки;

$S = S' - S'' = 179,5 \text{ мм}^2$ – площа поперечного перерізу мідної шини.

2.2. Кількість витків та довжина провідника первинної обмотки

$L = 765 \text{ мм}$ – висота первинної обмотки (стержня магнітопроводу);

$D = 307 \text{ мм}$ – діаметр стержня магнітопроводу;

$n = \frac{L}{b' + 2} = \frac{765}{34,5 + 2} \approx 21$ – кількість витків одного шару обмотки;

$w_1 = 2 \cdot n = 42$ – загальна кількість витків фази первинної обмотки;

$l_1 = \pi \cdot (D + h') \cdot n \cdot 10^{-3} \approx 21 \text{ м}$ – довжина провідника нижнього шару обмотки;
 $l_2 = \pi \cdot (D + 3 \cdot h' + 4) \cdot n \cdot 10^{-3} \approx 23 \text{ м}$ – довжина провідника верхнього шару обмотки;
 $l_{w1} = l_1 + l_2 \approx 44 \text{ м}$ – загальна довжина провідника первинної обмотки.

3. Активний опір первинної обмотки

3.1. Визначення активного опору первинної обмотки при температурі 20 °С

$\rho_{Cu(1)} = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий опір міді (технічна) при 20 °С.

$R_{1(20^\circ\text{C})} = \rho_{Cu(1)} \frac{l_{w1}}{S} = 4,118 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ – активний опір первинної обмотки при 20 °С.

3.2. Визначення активного опору первинної обмотки для робочої температури 115 °С

$m_{t1} = 1 + 0,004 \cdot (115 - 20) = 1,38$ – коефіцієнт приведення опору обмотки до температури 115 °С.

$R_1 = m_{t1} \cdot R_{1(20^\circ\text{C})} = 5,683 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ – активний опір первинної обмотки при температурі 115 °С.

4. Індуктивний опір первинної обмотки

$f = 50 \text{ Гц}$ – частота струму/напруги джерела живлення;

$\Delta = 2 \text{ мм}$ – відстань між шарами (циліндрами) первинної обмотками;

$R_{cep} = \frac{D}{2} + h' + \frac{\Delta}{2} = 165,5 \text{ мм}$ – відстань між центральною віссю магнітопроводу і серединою міжшарового проміжку обмотки;

$D_{cep} = 2 \cdot R_{cep} = 331 \text{ мм}$ – діаметр середини міжшарового проміжку обмотки;

$\sigma = \frac{\Delta + h' + h'}{\pi \cdot L} = 9,986 \cdot 10^{-3}$ – геометричний параметр для визначення коефіцієнту приведення ідеального поля розсіювання до реального (коефіцієнту Роговського);

$k_R = 1 - \sigma = 0,99$ – коефіцієнт Роговського;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнітна проникність вакууму, а також повітря;

$X_1 = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{cep} \cdot k_R}{L} \cdot \left(\Delta + \frac{h' + h'}{3} \right) = 8,747 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$ – індуктивний опір первинної обмотки;

$L_1 = \frac{X_1}{2 \cdot \pi \cdot f} = 2,784 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ – індуктивність первинної обмотки.

5. Геометричні дані вторинної обмотки

5.1. Геометричні габаритні розміри мідної заготовки (катоду), що підлягає розплавленню

$L_{заг} = 768 \text{ мм}$ – висота заготовки;

$R_{зов.заг} = 323 \text{ мм}$ – зовнішній радіус заготовки;

$a_{заг} = 53 \text{ мм}$ – ширина заготовки;

$d_{заг} = 140 \text{ мм}$, m – товщина заготовки.

5.2. Кількість витків та довжина провідника вторинної обмотки

$w_2 = 1$ – кількість витків фази вторинної обмотки;

$$l_{w2} = 2 \cdot \pi \cdot \left(R_{зов.заг} - \frac{a_{заг}}{2} \right) \cdot 10^{-3} = 1,863 \text{ м} - \text{довжина витка вторинної обмотки.}$$

6. Активний опір вторинної обмотки

6.1. Визначення активного опору вторинної обмотки при температурі 20 °С

$\rho_{Cu(2)} = 1,55 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий опір мідної заготовки при 20 °С;

$$R_2 (20^\circ\text{C}) = \rho_{Cu(2)} \frac{l_{w2}}{S_{сп.заг}} = \rho_{Cu(2)} \frac{l_{w2}}{a_{заг} \cdot d_{заг}} = 3,892 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} - \text{активний опір вторинної обмотки при } 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

6.2. Визначення активного опору вторинної обмотки для температури 1080 °С (температура плавлення міді) приведенного до первинної обмотки

$m_{12} = 1 + 0,004 \cdot (1080 - 20) = 5,24$ – коефіцієнт приведення опору обмотки до температури 1080 °С.

$R_2 = m_{12} \cdot R_2 (20^\circ\text{C}) = 2,039 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$ – активний опір вторинної обмотки при 1080 °С;

$$k_{mp} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{42}{1} = 42 - \text{коефіцієнт трансформації;}$$

$R_2' = k_{mp}^2 \cdot R_2 = 0,036 \text{ Ом}$ – активний опір вторинної обмотки при температурі 1080 °С, приведений до первинної обмотки.

Висновки:

1. В роботі [3] авторами застосовано та обґрунтовано метод мультифізичного моделювання тривалих (десятки годин), різномасштабних за часом електромагнітних та теплових перехідних процесів в індукційній каналній печі для отримання мідної катанки. В основу методу покладені пов'язані між собою нелінійні електрична та теплова схеми заміщення каналної печі.

2. Показано, що процеси тепло- і масопереносу, можуть моделюватися еквівалентним РС ланцюгом з нелінійними і комутованими ємностями. А індуктор, який за допомогою змінного магнітного поля спричиняє нагрів і розплав міді, добре моделюється однофазним лінійним пічним трансформатором, що працює в режимі короткого замикання.

3. Наведено методику та результати розрахунку параметрів схеми заміщення зазначеного пічного однофазного трансформатора. Дані параметри використовуються при моделюванні електротеплових процесів в індукційній каналній печі.

Перелік посилань

1. *UPCAST Products*: официальный сайт компании UPCAST. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>
2. *Rantanen M.* The "UPCAST" method of producing copper wire // *Wire industry*. – 1976. – No 511. – Pp. 565–567.
3. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Беянин Р.В.* Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной канальной печи для производства медной катанки. – К.: Техн. Електродинаміка, 2017. – № 4. – С. 55-66. ISSN 1607-7970
4. *Podoltsev O.D., Kucheriava I.M.* Multiphysics modeling in electrical engineering. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2015. – 305 p. (Rus)
5. *Vainberg A.M.* Induction melting furnaces. – Moskva: Energiia, 1967. – 416 p. (Rus)
6. *Fomin N.I., Zatulovskii L.M.* Electric furnaces and induction heating installations. – Moskva: Metallurgiya, 1979. – 247 p. (Rus)
7. *Кацман М.М.* Электрические машины / Учебник для студ. учреждений сред, проф. образования. – 12-е изд., стер. – М.: Академия, 2013. — 496 с. ISBN 978-5-7695-9705-3.
8. *Тихомиров П.М.* Расчёт трансформаторов / Учеб. пособие для ВУЗов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. — 528 с.