

УДК 621.365.5

**М. С. Базар**, інженер  
Тернопільський національний  
технічний університет імені Івана  
Пулюя

E-mail: [BMS\\_3@ukr.net](mailto:BMS_3@ukr.net)

## **ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ СТРУМУ В ІНДУКТОРІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАЛЬНОГО ПРИЛАДУ**

**Постановка проблеми.** В сучасному світі досить часто говорять про екологічно чисті джерела енергії, в тому числі і тепла. Україна посідає одне з перших місць в Європі з виробництва електроенергії. Тому актуальною є розробка, впровадження на експлуатація електричних опалювальних систем.

При конструюванні будь-якого електричного приладу необхідно знати і вміти визначати струм, що буде в ньому протікати. Для цього необхідно розробляти математичні моделі для визначення сили струму в індукторі індукційного нагрівального приладу є однією з основних завдань при моделюванні його роботи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розвиток комп'ютерної техніки, а також розробка великої кількості прикладних програм відкриває широкі можливості для моделювання будь-яких фізичних процесів різними наближеними методами з досить високою точністю. Однак інженерним методикам розрахунків останні роки приділяється значно менше уваги. Така ж ситуація і при розробці індукційних нагрівальних систем. Існують моделі де струм вважається: відомим (заданий) [1], та визначається з допомогою спеціалізованих програмних комплексів [2, 3], а от методики інженерного розрахунку сили струму в індукторі індукційного нагрівального приладу в літературних джерелах не зустрічаються, зустрічаються схеми заміщення для розрахунку промислового застосування індукційного нагрівання [4-6]. Для цього необхідно розробляти нові підходи для вирішення вище названих проблем.

**Метою роботи** є розроблення математичної моделі для визначення сили струму, що протікає в індукторі індукційного нагрівального приладу з наступним його дослідженням для розробки енергоефективних конструкцій приладів.

**Результати дослідження.** Конструкція індукційного нагрівального приладу, представлена на рис. 1. Прилад складається з індуктора 1, теплообмінника 2, тепло-електроізоляційної шпильки 3, на яку намотаний індуктор, і електромагнітний екран 4. У свою чергу сам теплообмінник складається з магнітопровідної циліндричної металевої ємності (зона "1") 5, металевого сердечника 6 (зона "3"), між якими циркулює теплоносій (зона "2"), в нашому випадку вода. Магнітопровідна циліндрична ємність з обох сторін (зверху і знизу) закрита кришками 7. В осерді виконані канали для входу і виходу теплоносія. Прилад під'єднують до мережі змінного струму частотою 50 Гц, в результаті цього індуктор створює змінне, електромагнітне поле, яке генерує внутрішні джерела тепла в зонах теплообмінника [7-9].

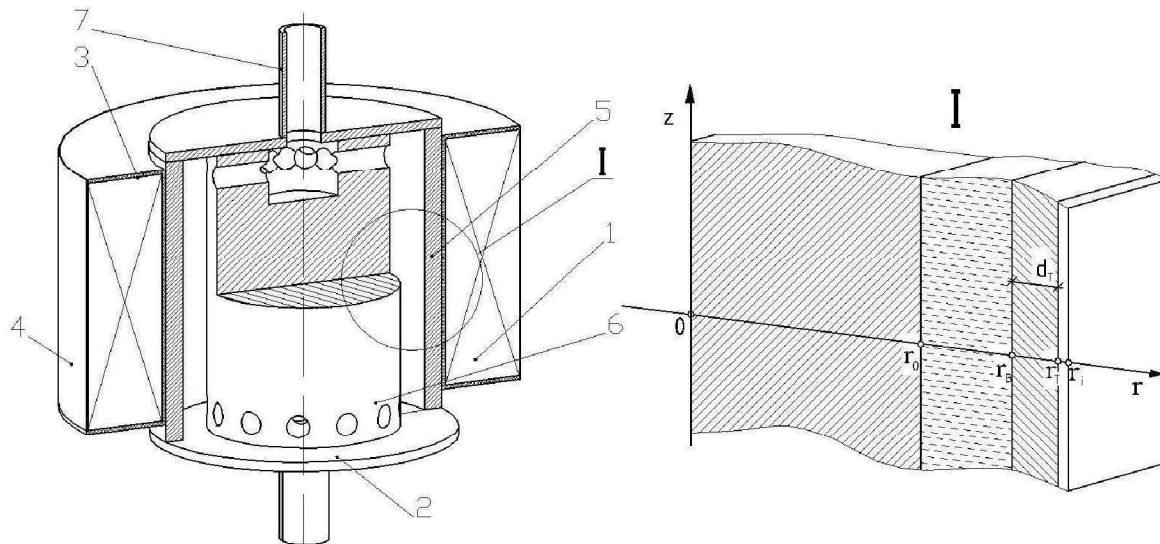


Рис. 1 - Схема індукційного нагрівального пристрою (позн. див. в тексті) [7-9]

В електротехнічному відношенні розрахункова індукційна система може бути розглянута як двоконтурна, в якій первинний контур – це власне індуктор, його обмотка, а вторинний контур це контур утворений теплообмінником. В цьому випадку теплообмінник являється як частиною електричної схеми так і магнітної, виконуючи роль магнітопроводу, одночасно.

При проектуванні індукційних систем є доцільно застосовувати метод схем заміщення [4], параметри яких визначаються з урахуванням конструкції індуктора, та навантаження, в нашому випадку теплообмінника.

Запишемо диференціальне рівняння, яке описує процес, що відбувається в навантаженому індукторі (катушці індуктивності) [10, 11]:

$$u = r_{\text{ін}} i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (1)$$

де  $r_{\text{ін}}$  – активний опір провідника індуктора, Ом;  
 $\Psi$  – потокозчеплення, що визначається лініями магнітної індукції,

$$\Psi = \Psi_{\tau} + \Psi_{\text{ін}} \quad (2)$$

де  $\Psi_{\tau}$  – потокозчеплення, що визначається лініями магнітної індукції, що проходять через теплообмінник

$$\Psi_{\tau} = N_i \cdot \Phi_{\tau} \quad (3)$$

тут  $N_i$  – кількість витків індуктора,

$\Phi_{\tau}$  – магнітний потік, що замикається через теплообмінник, Вб,

$\Psi_{\text{ін}}$  – потокозчеплення, що визначається лініями магнітної індукції, які повністю або частково замикаються в повітрі та на індукторі.

Розподіл величини  $\Psi$  та  $\Psi_{\tau}$  та  $\Psi_{\text{ін}}$  має сенс, тому що потокозчеплення  $\Psi_{\text{ін}}$  пропорційне силі струму і має вигляд:

$$\Psi_{\text{ін}} = L_{\text{ін}} \cdot i \quad (4)$$

Індуктивний опір індуктора практично не залежить від сили струму, і відповідно індуктивність буде сталою  $L_{\text{ін}} = \text{const}$ .

Потокозчеплення  $\Psi_T$ , яке відбувається через теплообмінник нелінійно зв'язане зі струмом  $i$ , тому що магнітна проникність  $\mu_T$ , а відповідно і магнітний опір залежать від напруженості магнітного поля, яка в свою чергу є функцією, що залежить від сили струму  $i$ .

Враховуюче все вище сказане запишемо рівняння для індуктора у вигляді:

$$u = r_{in} i + L_{in} \frac{di}{dt} + N_i \frac{d\Phi_T}{dt} = r_{in} i + L_{in} \frac{di}{dt} + u_T. \quad (5)$$

Рівняння (5) являється нелінійним, тому, що при прикладанні синусоїдальної напруги  $u$  до індуктора, струм  $i$  не являється чисто синусоїдальним. Замінімо не синусоїдальний струм еквівалентним синусоїдальним в комплексній формі, і запишемо рівняння (5) для комплексних амплітуд:

$$\dot{U}_m = r_{in} \dot{I}_m + j\omega L_{in} \dot{I}_m + j\omega N_i \Phi_{Tm} = r_{in} \dot{I}_m + j\omega L_{in} \dot{I}_m + \dot{U}_{Tm}. \quad (6)$$

Розділимо рівняння (6) на  $\dot{I}_m$ , отримаємо:

$$\dot{Z}_e = r_{in} + j\omega L_{in} + \dot{Z}_T \quad (7)$$

де  $\dot{Z}_e$  – комплексний опір навантаженого індуктора, Ом  
 $\dot{Z}_T$  – комплексний опір теплообмінника, Ом

$$\dot{Z}_T = R_T + j\omega L_T. \quad (8)$$

З урахуванням (8) вираз (7) набуде вигляду:

$$\dot{Z}_e = R_e + j\omega L_e \quad (9)$$

тут:  $R_e$  – еквівалентний активний (омічний) опір навантаженого індуктора, Ом

$$R_e = r_{in} + R_T \quad (10)$$

$L_e$  – еквівалентна індуктивність навантаженого індуктора, Гн

$$L_e = L_{in} + L_T. \quad (11)$$

Запишемо повний комплексний опір (9) з урахуванням (10) та (11). Крім того пам'ятаємо, що теплообмінник складається з трьох зон, тому буде:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_e = R_e + j\omega L_e &= \frac{R_e^2 - \omega^2 L_e^2}{R_e + j\omega L_e} = \frac{(r_{in} + R_T)^2 - \omega^2 (L_{in} + L_T)^2}{r_{in} + R_T + j\omega (L_{in} + L_T)} = \\ &= \frac{(r_{in} + R_{ct} + R_e + R_{oc})^2 - \omega^2 (L_{in} + L_{ct} + L_e + L_{oc})^2}{(r_{in} + R_{ct} + R_e + R_{oc}) + j\omega (L_{in} + L_{ct} + L_e + L_{oc})}. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким чином амплітудне значення сили струму, що протікає в індукторі визначиться за наступною залежністю, А

$$\dot{I}_{in} = U \frac{(r_{in} + R_{ct} + R_e + R_{oc}) - j\omega (L_{in} + L_{ct} + L_e + L_{oc})}{(r_{in} + R_{ct} + R_e + R_{oc})^2 + \omega^2 (L_{in} + L_{ct} + L_e + L_{oc})^2}. \quad (13)$$

Запишемо вирази для визначення активного  $I_{in_a}$  та реактивного  $I_{in_p}$  струмів індуктора, А:

$$I_{iH_3} = U \frac{(r_{iH} + R_{CT} + R_B + R_{OC})}{(r_{iH} + R_{CT} + R_B + R_{OC})^2 + \omega^2(L_{iH} + L_{CT} + L_B + L_{OC})^2} \quad (14)$$

$$I_{iH_p} = U \frac{\omega(L_{iH} + L_{CT} + L_B + L_{OC})}{(r_{iH} + R_{CT} + R_B + R_{OC})^2 + \omega^2(L_{iH} + L_{CT} + L_B + L_{OC})^2} \quad (15)$$

Тепер з врахуванням (14) та (15) вираз (13) можна переписати так:

$$\dot{I}_{iH} = I_{iH_3} - jI_{iH_p} \quad (16)$$

Підсумовуючи все вище викладене складемо схему заміщення індукційного нагрівального приладу (рис. 2, а).

Беручи до уваги вирази (10) та (11) схему заміщення можна спростити і в результаті отримаємо просту схему заміщення індукційного нагрівального приладу (рис. 2, б)

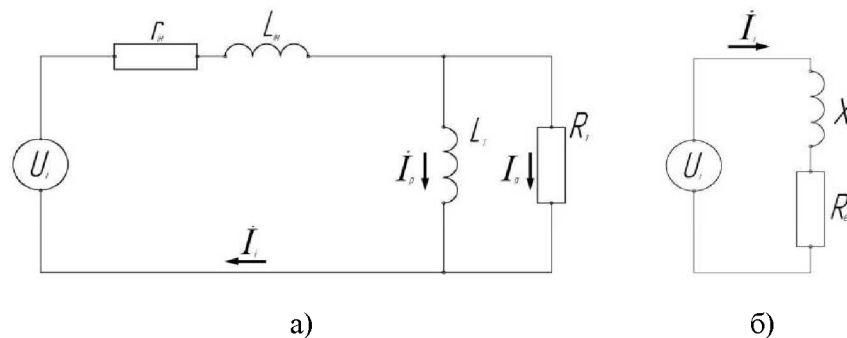


Рис. 2 - Схема заміщення індукційного нагрівального пристрою, а) повна, б) спрощена (позн. див. в тексті)

Векторна діаграма струмів для навантаженого індуктора матиме вигляд як на рис. 3.

Діаграму побудовано для індукційного нагрівального приладу з такими розрахунковими параметрами  $U = 220$  В,  $f = 50$  Гц,  $c_T = c_O = 200e-9$  Ом·м,  $c_B = 10$  Ом·м,  $\mu_T = 46$ ,  $\mu_O = 150$ ,  $\mu_B = 0.999$ ,  $N_i = 200$  витків, висота індуктора -  $2a_{iH} = 0.170$  м, висота теплообмінника -  $2h_T = 2a_{iH} + 5$  мм =  $0.175$  м, радіус теплообмінника -  $r_T = 0.08$  м, діаметр дроту індуктора -  $d_{iH} = 0.002$  м, радіус

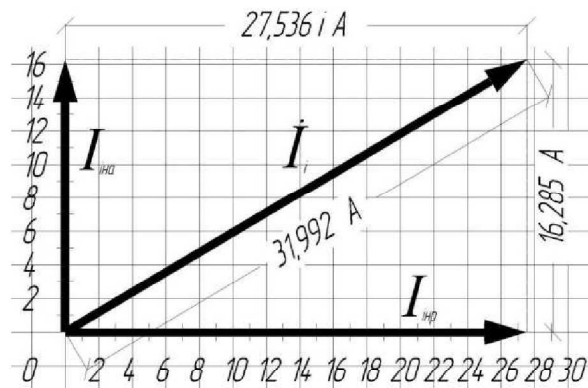


Рис. 3 - Векторна діаграма струмів індукційного нагрівального приладу

індуктора -  $r_i = r_T + 5$  мм =  $0.082$  м, радіус металевого осердя -  $r_o = 0.06$  м, товщина стінки теплообмінника -  $d_T = 0.006$  м, внутрішній радіус теплообмінника -  $r_B = r_T - d_T = 0.074$  м.

Проведемо дослідження отриманих результатів, а саме вплив конструктивних

параметрів на силу струму, що протікає в індукторі.

На рис. 4 показано залежність сили струму від товщини стінки  $d_T$  (зони «1»), та радіуса металевго осердя  $r_{oc}$  (товщина зони «3»). З рисунка видно, що із збільшенням товщини  $d_T$  значення сили струму різко спадає, а при досягненні  $d_T = 2\Delta_T$  починає поступово зростати.

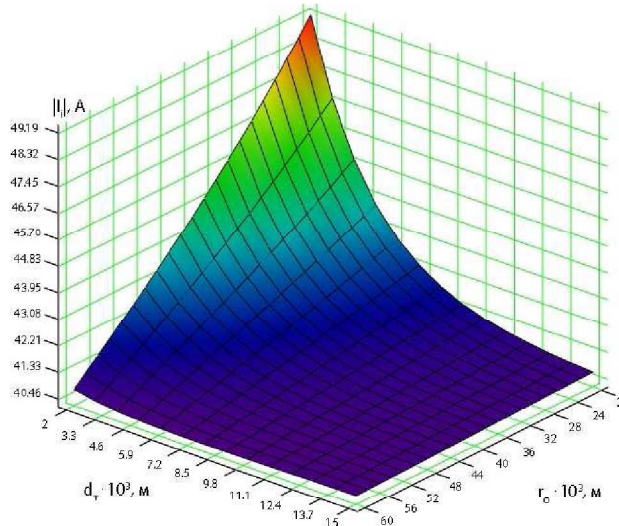


Рис. 4 – Залежність сили струму індуктора від товщини стінки магнітопровідної циліндричної емкості  $d_T$ , та радіуса металевго осердя  $r_{oc}$

Такий характер поведінки струму можна пояснити складною залежністю активного опору та індуктивності, що входять у вираз для визначення сили струму від товщини зони «1» –  $d_T$ . Зміна струму в залежності від товщини зони «3» має ту саму природу, однак характер зміни струму в залежності від  $r_{oc}$  є простішим, бо інтенсивність поля, яке досягає зони «3» є малою. Крім того бачимо, що при товщині  $d_T$  більше  $2\Delta_T$  зміна залежності струму від товщини зони «3» майже не спостерігається, тобто при  $d_T \geq 2\Delta_T \Rightarrow I(r_o) = \text{const}$ .

На рисунку 5 зображено залежність активної (а) та реактивної (б) складової сили струму від радіуса металевго осердя і довжини стінки теплообмінника.

Залежність реактивного струму в точності повторює характер зміни діючого значення сили струму (див. рис. 4 і 5 (б)), а ось графік залежності активного струму значно відрізняється. Так при збільшенні радіуса металевго осердя сила струму спадає, зменшення відбувається приблизно до тих пір поки  $d_T \geq 2\Delta_T$ , після чого при подальшому збільшенні  $d_T$  струм залишається незмінним. З графіка видно, що струм має максимальне значення при менших значеннях  $r_{oc}$  і  $d_T$ , що можна пояснити малим активним навантаженням.

Залежність сили струму індуктора від радіуса теплообмінника та радіуса металевго осердя зображено на рис. 6. Графік побудовано для товщини  $d_T \geq \Delta_T = 6 \text{ мм}$ , тому спостерігається лінійність струму в залежності від радіуса металевго осердя.

Залежність струму від радіуса теплообмінника можна описати таким чином. При більших радіусах довжина дроту індуктора стає більшою, збільшується і умовна довжина розгортки кожної зони, що сприяє збільшенню повного опору, а відповідно зменшенню сили струму.

На графіку (рис. 7) зображено залежність сили струму від кількості витків індуктора і частоти струму, яка протікає через нього. З рис. 7 бачимо, що струм є максимальним при малих значеннях кількості витків і низьких частотах. І навпаки при підвищених частотах і великій кількості витків – струм індуктора зменшується.

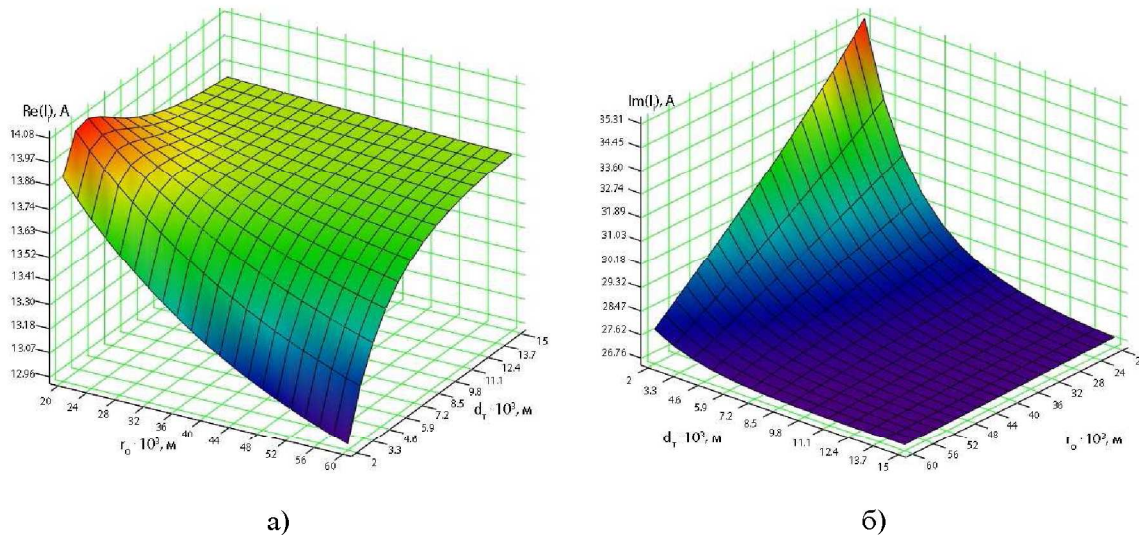


Рис. 5 – Графік залежності активної (а) і реактивної (б) складової сили струму від радіуса металевго осердя і товщини стінки теплообмінника

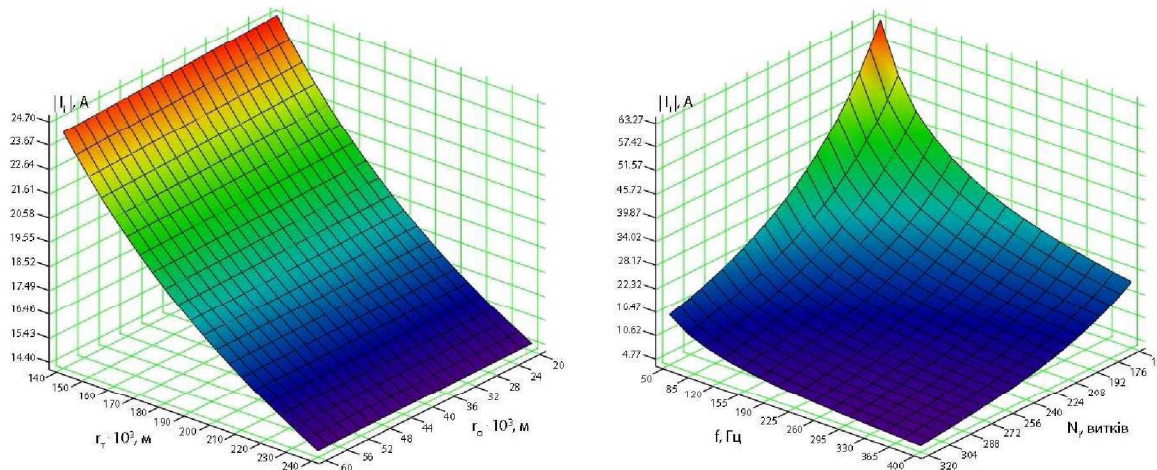


Рис. 6 – Графік залежності сили струму індуктора від радіуса теплообмінника  $r_t$  та радіуса металевго осердя  $r_{oc}$ , при товщині стінки магнітопровідної циліндричної ємкості  $d_t = 6$  мм

Рис. 7 – Графік залежності сили струму індуктора від частоти  $f$  та кількості витків індуктора  $N_i$

### Висновки

1. Отримано вираз для визначення сили струму, що протікає в індукторі індукційного нагрівального приладу, що . Проведено графічне дослідження сили струму від ряду геометричних параметрів теплообмінника та індуктора.

2. Встановлено, що із збільшенням товщини стінки  $d_t$  значення сили струму різко спадає, а при досягненні  $d_t = 2\Delta_t$  починає поступово зростати. Крім того залежність реактивного струму в точності повторює характер зміни діючого значення сили струму, а от залежність активного струму значно відрізняється. При збільшенні радіуса металевго осердя активна складова струму спадає, зменшення відбувається приблизно до тих пір поки  $d_t \geq 2\Delta_t$  при подальшому збільшенні  $d_t$  активна складова струму залишається незмінним.

3. Показано, що при більших радіусах теплообмінника сила струму

зменшується. Зазначено, що струм є максимальним при малих значеннях кількості витків і низьких частотах, і навпаки при великій кількості витків і високих частотах струм зменшується (при незмінній конструкції приладу).

### Література

1. Слухоцкий, А.Е. Индукторы для индукционного нагрева [Текст] / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974. – 263 с.
2. Батицаев А.М. Исследование и повышение эффективности системы косвенного индукционного нагрева жидкости: автореф. дис. на соискание ученой степени кан. тех. наук [Текст] / Батицаев Арсений Михайлович; - Самара, 2007. – 20 с.
3. Базаров А.А. Моделирование и интегрированное проектирование систем индукционного нагрева сопряженных физически неоднородных объектов : автореф. дис. на соискание ученой степени док. тех. наук [Текст] / Базаров Александр Александрович; - Самара, 2010. – 40 с.
4. Письменный А.С. Схемы замещения и методы расчета индукционных сварочных и электротермических устройств [Текст] / Письменный А.С. // Автомат. сварка. – 1994. – №4. – С. 1-4.
5. Шаблій О. Методика розрахунку нагрівальної системи індуктор-магнітопровід для наплавлення тонких елементів конструкцій [Текст] / Шаблій О. М., Пулька Ч.В., Письменный О.С. // Вісник ТДТУ ім. Івана Пулюя - №3. -2007. - С.38 – 46
6. Шаблій О. Методика визначення струму, що протікає в індукторі нагрівального приладу [Текст] / Шаблій О., Пулька Ч., Базар М., Король О. // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 66. — № 2. — С.235-242. — (математичне моделювання, математика. фізика).
7. Пристрій для індукційного нагрівання теплоносія [Текст] / О.М. Шаблій, Ч.В. Пулька, М.С. Базар та інші // Патент на корисну модель №83011 по заявці № u2013 01870 від 15.02.2013 р опубліковано Б. №16 від 27.08.2013 р.
8. Шаблій О. Визначення питомої потужності теплових джерел в стінці технологічного індуктора [Текст] / Шаблій О., Базар М. // Конференція „ Інформаційні моделі, системи та технології “ (20 травня 2011 р.). - Тернопіль: ТНТУ, 2011. С.-5.
9. Шаблій О.М. Питома потужність теплових джерел в індукційних нагрівальних приладах [Текст] / Шаблій О.М., Базар М.С., Пулька Ч.В., Цимбалюк Л.І., Король О.І., // Світлотехніка та електроенергетика. – №3 – 2012. С. 23 – 31.
10. Матвеев, А.М. Электричество и магнетизм [Текст] / А.М. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
11. Башарин С.А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля [текст] / С.А. Башарин, В.В. Федоров. – М.: «Академия», 2004. -304 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ТОКА В ИНДУКТОРЕ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

М. С. Базар

*Разработана математическая модель определения силы тока в индукционных нагревательных приборах. Проведено аналитическое и графическое исследование зависимости силы тока от ряда геометрических параметров теплообменника и индуктора, проведен анализ результатов исследований, приведена схема замещения индукционного нагревательного прибора.*

## DETERMINING THE CURRENT IN THE INDUCTOR INDUCTION HEATING APPLIANCE

M. S. Bazar

*The mathematical model determining the current in induction heating devices. Analytical and graphical study of the dependence of current on a number of geometrical parameters of the heat exchanger and inductor, results of research, given the equivalent circuit of the induction heating device.*