4. **Шелехов П. Ю.** Исследование статической электризации при пневмотранспортировании рассыпных ВВ. Тезисы докладов на НТК, посвященные 60-летию СКГМИ, Орджоникидзе, 1991, с.151-152.

5. **Голик В.И., Шелехов П.Ю.** Электризация в транспортируемом потоке ВВ и условия возникновения электростатических разрядов.// Известия ВУЗ СК, Технические науки.- Ростов, 2006.- Вып 6. С. 58-61.

6. **Голик В.И., Шелехов П.Ю.** Исследование влияния технологических параметров пневмозаряжания россыпных ВВ на итенсивность электризации.// Известия ВУЗ СК, Технические науки.- Ростов, 2006 Вып 6.-С. 61-64.

7. **Емекеев В.И., Сергеев В.В.** Увлажняющие устройства и камерные зарядчики. //Безопасность труда в промышленности, №11, М., 1988. - С. 59-61.

8. **Емекеев В.И., Сергеев В.В.** Внедрение увлажняющих устройств и смачивающих жидкостей при пневматическом заряжании гранулированных ВВ.// Бюл. Цветная металлургия, 1984, №3.- С. 19-21.

9. **Емекеев В. И., Шелехов П.Ю.** Исследование статического электричества при пневмотранспортировании рассыпных ВВ // Безопасность труда в промышленности, №3,1967.- С. 17-20.

10. **Шелехов П. Ю.** Аналитическая оценка возникновения электрического разряда в пневмопроводе //Изв. ВУЗ СК, техн. науки. Приложение 5. Ростов, 2006-С. 68-73

УДК: 622.7.051(088.8)

С. Т. ТОЛМАЧОВ[·], д-р техн. наук, проф., О. В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
В. А. ВЛАСЕНКО, викладач
Криворізький національний університет

РОЗРАХУНОК ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ІМПУЛЬСНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ПУЛЬП ЧОРНИХ МЕТАЛІВ

Конкуренція на світовому ринку сировини загострила проблему підвищення якості залізорудних концентратів. Одним з важливих методів електромагнітного впливу на пульпу з метою підвищення ефективності класифікації, зневоднювання, магнітно-флотаційних процесів збагачення є розмагнічування пульпи. Промислові розмагнічувальні апарати при високих масо-габаритних та низьких енергетичних параметрах не забезпечували прийнятний рівень розмагнічування. Прогрес у галузі силової електроніки сприяв розробці низки високочастотних імпульсних розмагнічувальних апаратів, параметри яких в значній мірі визначалися на базі емпіричних залежностей з недостатнім рівнем їх обґрунтованості і обмеженим діапазоном використання.

Метою роботи є розробка гнучкого й універсального методу проектування та оптимізації параметрів імпульсних розмагнічувальних апаратів у широкому спектрі технологічних вимог і обмежень.

Методи. У роботі використані теоретичні методи і точні формули коло-польового аналізу магнітного поля в коливальному контурі котушка-конденсатор, сучасні методи їх програмної реалізації та візуальні засоби відображення результатів обчислювальних експериментів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що на основі точних співвідношень математичного аналізу вперше реалізований розрахунок параметрів згасаючого за експоненціальним законом магнітного поля без обмежень на конструктивні (внутрішній та зовнішній діаметри пульпопроводу, довжина і висота намотки котушки) та технологічні (максимальна напруженість поля, його частота, магнітна проникність пульпи, її швидкість тощо) параметри.

Практична значимість роботи полягає у встановленні однозначної залежності між необхідними параметрами згасаючого розмагнічувального поля та числом витків циліндричної котушки з довільними геометричними параметрами. Запропонований метод та його програмна реалізація можуть бути корисними як для інженерів і науковців відповідних професійних напрямків, так і для студентів навчальних закладів гірничої та електричної галузей знань.

Результатами дослідження є: розробка універсальної програми для дослідження процесів імпульсного розмагнічування, обґрунтування високого рівня її адекватності та створення нових можливостей підвищення якості дослідження, конструювання та оптимізації нових систем імпульсного розмагнічування продуктів збагачення руд чорних металів.

Ключові слова: імпульсне розмагнічування, коливальний контур, коло-польовий метод, математичне моделювання, обчислювальна програма, оптимізація.

doi:10.31721/2306-5451-2022-1-54-27-33

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Технологічний процес розмагнічування різних матеріалів, зокрема рухомих і нерухомих гетерогенних сумішей, широко використовується в різних областях науки і техніки, зокрема в технологіях збагачення продуктів переробки руд чорних металів. Розробка способів дезінтеграції рудних флокулоутворень завжди була предметом активних досліджень в даній галузі. Особливо глибоко досліджувався вплив магнітного розмагнічування на показники якості продуктів збагачення. Широкі

[·]© Толмачов С. Т. , Ільченко О. В. , Власенко В. А. ., 2022

дослідження в даному напрямку ще з 70-х років минулого століття проводилися в Кривому Розі. Серед них слід відзначити наукові та лабораторні дослідження в КГРІ, проектно-конструкторські та напівпромислові дослідження в інституті «Механобрчормет», промислові випробування на ГЗФ ЦГЗК, ПівдГЗК, ІнГЗК та ін.

Аналіз досліджень і публікацій. Рядом авторів були проведені дослідження достатнього широкого спектру розмагнічувальних апаратів (РА) [1-5], виконаний їх порівняльний аналіз [5]. Була переконливо доведена неефективність серійних РА промислової частоти за масо-габаритними і технічними параметрами розмагнічування продуктів збагачення руд Криворізького басейну. На базі досягнень силової електроніки у 70-і роки минулого століття був розроблений ряд РА підвищеної частоти [6-8]. Найбільш ефективними виявилися високочастотні імпульсні РА [7, 8], які були розроблені на кафедрі основ електротехніки та електричних машин КГРІ (нині кафедра електромеханіки КНУ) та випробувані в лабораторних, напівпромислових і промислових умовах. Але технічні параметри цих РА в значній мірі визначалися на базі емпіричних залежностей і без належного обґрунтування їх точності та області практичного використання. Разом з тим на фоні зростання конкуренції на світовому ринку сировини загострилася проблема підвищення якості залізорудних концентратів, сфера використання РА поширилась на магнітно-флотаційну технологію [4] та ін. За цих умов додатково актуалізувалося завдання розробки гнучкого й універсального методу проектування РА у широкому спектрі технологічних вимог і обмежень.

Постановка задачі. Сучасний стан інформаційно-комп'ютерних технологій створює необхідні умови для розробки й реалізації складних математичних моделей різноманітних машин та апаратів. Метою роботи є обґрунтування точного аналітичного розрахунку магнітного поля імпульсних РА та розробка на його основі гнучкої й універсальної системи проектування та оптимізації таких пристроїв у широкому спектрі технологічних вимог і обмежень.

Викладення матеріалу та результати. Досягнення поставленої мети повинно базуватися на врахуванні встановлених в результаті численних експериментальних досліджень основних принципів ефективного розмагнічування: забезпечення необхідної для заданого матеріалу максимальної напруженості магнітного поля, достатнього числа перемагнічувань матеріалу в активній зоні РА при плавному зменшенні амплітуди напруженості розмагнічувального поля до практично нульової величини. Важливість виконання цих технологічних умов можна продемонструвати візуально (рис. 1).

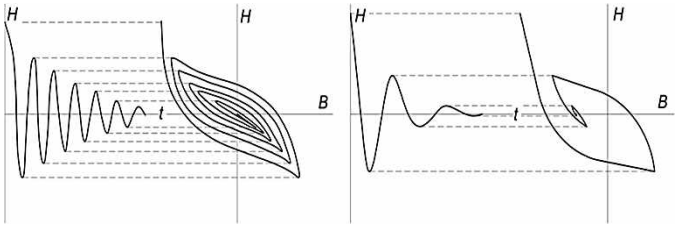

Рис. 1. Ефективне «м'яке» розмагнічування при достатній кількості імпульсів поля та плавному згасанні їх амплітуди – зліва та часткове розмагнічування при невеликій кількості імпульсів та швидкому згасанні їх амплітуди – справа

Практичними результатами підтверджено, що для ефективного розмагнічування мінімальна кількість імпульсів залежить в основному від швидкості руху пульпи та коерцитивної сили (магнітної жорсткості) матеріалу і лежить в діапазоні 10 – 20. Очевидно, таку кількість перемагнічувань реально можна забезпечити лише використанням високочастотних (більше 1000 Гц) РА. Окрім вказаного технологічного ефекту пристрій повинен мати мінімальні масо-габаритні параметри, виключати можливість переорієнтації часток у процесі розмагнічування, зберігати працездатність і ефективність у широкому діапазоні швидкостей пульпи, найбільш повно використовувати енергію мережі живлення та ін. У якості базових типів для забезпечення цих вимог прийняті найбільш прості, надійні і ефективні за сукупністю перелічених вище властивостей імпульсні РА [7, 8]. Деякі модифікації РА даного типу показані на рис. 2.

У всіх РА за рахунок ударного збудження коливального контуру *L-C* від накопичувального конденсатора, який заряджається від мережі 50 Гц через керовані тиристори *VS*, виникають згасаючі коливання магнітного поля. Тривалість пакету розмагнічувальних імпульсів залежить від модифікації РА. В зображеній на рис. 2*а* схемі [7] накопичувальний конденсатор C_2 при негативній напівхвилі напруги через діод D_2 заряджається до амплітудного значення напруги живлення мережі (рис. 3*в*). При позитивній напівхвилі напруги імпульс позитивної полярності через діод D_1, резистор R_1 і потенціометр R_2 подається на керуючий електрод тиристора VS_1,

відкриває його і збуджує коливання в контурі L-C_1 (рис. 3*б*). Згасання процесу може тривати весь період (0,02 с) і забезпечується за рахунок активного опору контуру. Оптимальним рішенням є максимальна тривалість струму при практичному зменшенні його до нуля в кінці періоду.

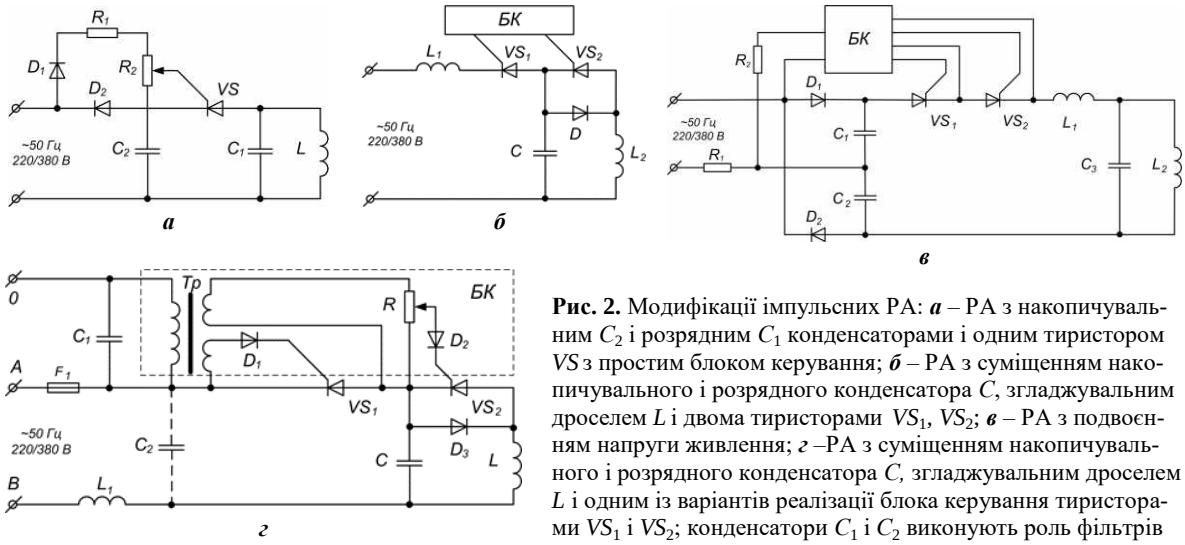

Рис. 2. Модифікації імпульсних РА: ***а*** – РА з накопичувальним C_2 і розрядним C_1 конденсаторами і одним тиристором VS з простим блоком керування; ***б*** – РА з суміщенням накопичувального і розрядного конденсатора C, згладжувальним дроселем L і двома тиристорами VS_1, VS_2; ***в*** – РА з подвоєнням напруги живлення; ***г*** –РА з суміщенням накопичувального і розрядного конденсатора C, згладжувальним дроселем L і одним із варіантів реалізації блока керування тиристорами VS_1 і VS_2; конденсатори C_1 і C_2 виконують роль фільтрів

В решті зображених на рис. 2 модифікаціях РА використано суміщення накопичувального і розрядного конденсатора C, але це досягається збільшенням кількості тиристорів та деяким ускладненням схеми керування (рис. 2*г*) [8]. Іншою особливістю цих схем є тривалість розрядного процесу пів періоду (0,01 с) – рис. 3*г*, що може обумовити необхідність збільшення частоти перемагнічування для забезпечення необхідної кількості циклів. Для зменшення ємності конденсатора інколи доцільно використати схему з подвоєнням напруги живлення (рис. 2*в*), що витікає із формули енергії зарядженого конденсатора $W_C=CU^2/2$. У подальшому для обґрунтування запропонованого методу використана схема РА за рис. 2*б.* З незначними змінами можна виконати розрахунок інших схем, поданих на рис. 2.

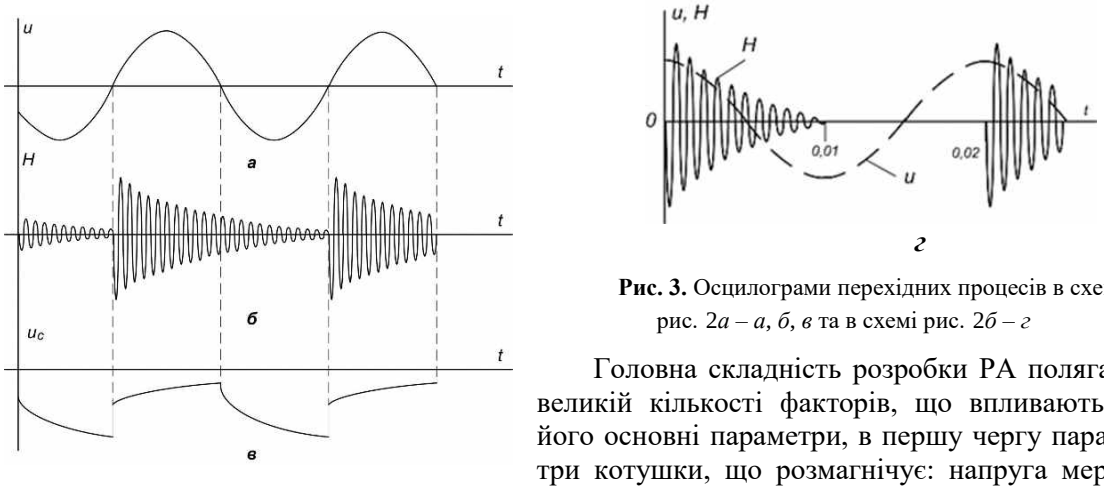

Рис. 3. Осцилограми перехідних процесів в схемі рис. 2*а – а, б, в* та в схемі рис. 2*б – г*

Головна складність розробки РА полягає у великій кількості факторів, що впливають на його основні параметри, в першу чергу параметри котушки, що розмагнічує: напруга мережі живлення, максимальна напруженість та частота розмагнічувального поля, число перемагнічувань матеріалу в активній зоні РА, плавність зменшення напруженості поля до практично нульової величини, магнітна жорсткість матеріалу та його концентрація в пульпі, швидкість пульпи, внутрішній та зовнішній діаметри пульпопроводу, коефіцієнт заповнення вікна обмотки та її довжина і висота. Існують також технічні обмеження на температурний режим елементів, класи силових діодів і тиристорів, умови експлуатації та ін.

Перелічені вище вимоги враховані при розробці спеціальної обчислювальної програми, що реалізована в системі MATLAB і характеризується наступними особливостями:

використано комбінований коло-польовий метод, а саме: розрахунок струму в циліндричній котушці виконується на основі формул перехідного процесу при розряді конденсатора на котушку і резистор, а розподіл магнітного поля в пульпопроводі– на основі теорії електромагнітного поля;

в залежності від модифікації РА незначною зміною програми забезпечується експоненціальний закон згасання поля за пів періоду або повний період промислової частоти, що обумовлено відповідним значення активного опору коливального контуру;

з урахуванням магнітних властивостей пульпи визначено коригуючий коефіцієнт для обчислення струму в котушці, що забезпечує заданий рівень інтенсивності магнітного поля.

Універсальний характер розробленої програми на основі використання точних класичних методів та розрахункових формул теоретичної електротехніки дозволяє забезпечити високий рівень адекватності сформованої математичної моделі. У результаті розрахунків програма формує великий обсяг числової, графічної та візуальної інформації, яка може бути використана як безпосередньо при перевірці відповідності технологічним умовам, так і при подальших уточнюючих розрахунках, у т.ч. при оптимізації РА за деякими параметрами, наприклад, мінімізації активної потужності або маси котушки. Серію обчислювальних експериментів доцільно також проводити з метою забезпечення допустимої густини струму, використання доступних матеріалів, існуючих провідників для обмотки, уточнення коефіцієнту її заповнення провідниками тощо.

Наведемо базові математичні формули і співвідношення, що використані в математичній моделі розрахунку розмагнічувального поля. Найбільш складним і визначальним є розрахунок параметрів котушки, що забезпечують задані технічні параметри магнітного поля в конкретних технологічних умовах. Точність цих розрахунків в основному забезпечує адекватність математичної моделі і ефективність пристрою для розмагнічування. Оскільки в більшості випадків пульпопроводи мають циліндричну форму, в подальшому розглянуті котушки також циліндричної форми. Прийняті наступні геометричні параметри: D_1 – внутрішній, D – зовнішній діаметри пульпопроводу і внутрішній діаметр котушки, L і H – відповідно її довжина і висота намотки. У загальному випадку котушка може мати n шарів провідника з m витками у кожному з них, тобто число витків котушки $w = n{\cdot}m$. Позначимо через z і r координати центру (i, j)-го витка котушки

$$z_{i,j}=0{,}5\cdot L/m+(i\text{-}1)L/m;\ r_{i,j}=D/2+0{,}5\cdot H/n+(j\text{-}1)\cdot H/n,$$

де i – номер шару, а j – номер витка в цьому шарі. Магнітне поле у будь-якій точці r, z, створене витком i-j при струмі величиною 1 А [9]

$$h_z=\frac{1}{2\pi a}\cdot\left(K+\frac{rr^2-r^2-(z-zz)^2}{bE}\right);\quad h_r=\frac{1}{2\pi}\cdot\left(\frac{z-zz}{ra}\right)\cdot\left(-K+\frac{rr^2+r^2+(z-zz)^2}{bE}\right), \tag{1}$$

де $zz=z(i,j);\ rr=r(i,j);\ \ a=\sqrt{(r+rr)^2+(z-zz)^2};\ b=(r-rr)^2+(z-zz)^2,$

$kk=\sqrt{\frac{4r\cdot rr}{(r+rr)^2+(z-zz)^2}}$ – модуль еліптичних інтегралів першого K і другого E роду.

Для забезпечення заданого за технологічними умовами максимального значення напруженості магнітного поля $H_{\text{макс}}$ розрахуємо за формулами (1) максимальне значення напруженості $h_{z_\text{макс}}$ в точці $z=L/2$, $r= D_1/2$, де знаходиться її максимум, при умовній одиничній магніторушійній силі (МРС), рівномірно розподіленій по довжині котушки L. У результаті отримаємо значення необхідної МРС $F_{\text{макс}} = H_{\text{макс}}/h_{z_\text{макс}}$, що забезпечує задане значення $H_{\text{макс}}$. Для практичного забезпечення отриманої МРС використано формулу для струму в коливальному контурі [9]

$$i(t)=-Ae^{-\delta t}\sin(\omega t), \tag{2}$$

де $A=U_0/\omega L_{\text{к}}$; $\omega=2\pi f$ – кругова частота; $U_0=\sqrt{2}U$ –максимальна напруга мережі живлення (і заряду конденсатора в схемах без подвоєння напруги); $\delta=r_{sum}/2L_k$ –коефіцієнт згасання коливань; r_{sum} – сумарний активний опір коливального контуру; L_k – індуктивність котушки.

З рис. 3 видно, що максимальне значення струму наступає в момент $t_{\text{макс}}=0{,}25/f$

$$i_{\text{макс}}=Ae^{-\delta t_{\text{макс}}}=\frac{U_0}{\omega L_{\text{к}}}e^{-0.25\delta/f}, \tag{3}$$

причому $\delta=-100\ln(0.05)=300$ при зменшенні початкової амплітуди коливань у 20 разів (до $0{,}05i_{\text{макс}}$) для схем з суміщеним накопичувальним і розрядним конденсатором і $\delta=-50\ln(0.05)==150$ для схеми з окремими накопичувальним і розрядним конденсаторами. Для забезпечення згасання коливань практично до нуля (наприклад, до $0{,}01i_{\text{макс}}$) відповідні значення δ дорівнюють 460 і 230. Вказані показники згасання обумовлені комутаційними вимогами до

тиристорів і на практиці забезпечуються відповідною величиною сумарного опору коливального контуру $r_{sum} = 2\delta L_k$.

Важливо зазначити, що формула для струму (3) справедлива за умови однорідного магнітного середовища у всьому навколишньому просторі. Але в реальних умовах навколишнє середовище є кусково-однорідним, оскільки пульпа включає магнітні частки і її відносна магнітна проникність $\mu_r > 1$. В залежності від вмісту твердого в пульпі та магнітних властивостей її компонентів для пульпи прийнято μ_r=1,1 – 1,4 (уточнення можна виконати шляхом вимірювання в реальних умовах), а для навколишнього середовища, включно з немагнітним матеріалом пульпопроводу та обмотки, μ_r=1. Врахування даного факту вимагає введення замість розрахованого за формулою (3) струму $i_{\text{макс}}$ деякого фіктивного струму $i'_{\text{макс}}$, який визначається за методом дзеркальних зображень [9]: $i'_{\text{макс}} = i_{\text{макс}} \cdot 2/(1+\mu_r)$. Далі легко отримати формулу

$$F'_{\text{макс}} = w i'_{\text{макс}} = \frac{U_0}{\omega L_{k_\text{відн}} w} e^{-0.25\delta/f}, \tag{4}$$

звідки число витків при забезпеченні максимальної напруженості

$$w = w_{\text{макс}} = \frac{U_0}{2\pi f L_{k_\text{відн}} F'_{\text{макс}}} e^{-0.25\delta/f}. \tag{5}$$

У формулах (4) і (5) враховано, що $L_k = L_{k_\text{відн}} w^2$, тобто $L_{k_\text{відн}}$ – це індуктивність котушки з одним витком. Для визначення цієї величини можна використати емпіричну формулу [10]

$$L_{\text{к_відн}} = \mu_r \frac{8 \cdot 10^{-9} (D+H)^2}{3(D+H)+HL+10H} \tag{6}$$

або більш точно обчислити її за попередньо розрахованим розподілом магнітного поля.

Функціональні та обчислювальні можливості програми проілюструємо на прикладі розрахунку поля для наступних вхідних параметрів: D_1 = 140 мм, D = 160 мм, L = 120 мм, H = 15 мм, n=3, $H_{\text{макс}}$ = 50 А/мм, f = 1500 Гц, μ_r=1,2, коефіцієнт заповнення вікна котушки k_3 = 0,6. Для цих даних отримані наступні результати: $h_{z_\text{макс}}$ = 0,0053 А/мм, $F_{\text{макс}}$ = 9472 А, число витків котушки w=48 (3×16), максимальне і діюче значення струму $I_{\text{макс}}$ = 198 А, I=42,5 А, густина струму в провіднику $\delta_{\text{пр}}$=1,9 А/мм^2, його переріз S = 22 мм^2, маса котушки $G_{\text{м}}$ =5,3 кг, довжина проводу $l_{\text{к}}$ = =26,4 м, сумарна активна потужність контуру P = 296 Вт і котушки $P_{\text{к}}$ = 36 Вт, індуктивність котушки L_k = 0,274 мГн, ємність конденсатора C =41 мкФ, добротність контуру Q =15,7. Вплив різних вхідних даних на кінцеві показники розрахунків наведені в таблиці.

Таблиця

Варіанти вхідних та вихідних (розрахованих) параметрів

	Задано								Розраховано						
	D_1, мм	D, мм	$H_{\text{макс}}$, А/мм	H, мм	L, мм	f, Гц	n, од	μ_r, од	w, од	C, мкФ	I, А	$\delta_{\text{пр}}$, А/мм^2	S, мм^2	$G_{\text{м}}$, кг	P, Вт
1	100	120	50	10	100	800	2	1.2	116	27	14.9	2.9	5.2	2.2	194
2	100	120	50	10	100	1200	2	1.2	80	25	21.0	2.8	7.5	2.2	181
3	100	120	50	10	100	1500	2	1.2	66	24	24.4	2.7	9.2	2.2	176
4	100	120	35	10	100	800	2	1.2	166	13	7.3	2.0	3.6	2.2	94
5	100	120	35	10	100	1200	2	1.2	114	12	10.3	2.0	5.3	2.2	89
6	100	120	35	10	100	1500	2	1.2	94	12	12.3	1.9	6.5	2.2	86
7	200	225	50	10	100	800	2	1.2	36	104	57	3.4	17	3.9	746
8	200	225	50	10	100	1200	2	1.2	26	96	79	3.3	24	3.9	689
9	200	225	50	10	100	1500	2	1.2	20	96	99	3.3	30	3.9	690
10	200	225	50	10	100	1500	2	1.4	16	128	132	3.5	38	3.9	923
11	200	225	50	16	100	1500	3	1.2	27	117	77	2.1	37	6.0	534
12	200	225	50	10	140	1500	2	1.2	20	121	121	2.9	42	5.5	842
13	200	225	50	16	140	1500	3	1.2	27	93	96	1.9	52	8.4	671
14	200	225	50	10	200	1500	1	1.2	20	150	154	2.6	60	7.9	1071

Програмою передбачено також виведення візуальної інформації, наведеної на рис. 4.

З метою встановлення впливу різних факторів на кінцеві показники розрахунків проаналізуємо наведені в таблиці дані для різних варіантів. Як видно з варіантів 1-3 і 4-6, при $H_{\text{макс}}$ = const частота розмагнічувального поля f суттєво впливає на кількість витків котушки w і діюче значення струму I. При цьому добуток Iw (МРС обмотки) і ємність конденсатора C зали-

шаються практично незмінними, оскільки енергія магнітного поля при $H_{макс}$ = const не залежить від частоти. Незмінними залишаться також густина струму $\delta_{пр}$ і маса котушки $G_м$. Щодо впливу інтенсивності магнітного поля $H_{макс}$, то він є суттєвим по відношенню до всіх розрахункових параметрів (окрім маси котушки $G_м$) навіть при однакових геометричних розмірах котушки і пульпопроводу (варіанти 3 і 6). Порівняння результатів варіантів 1 і 7, 2 і 8, 3 і 9 свідчить про суттєве зменшення кількості витків обмотки w при збільшенні діаметра пульпопроводу. Це зменшення стає ще більш вираженим при одночасному збільшенні діаметра котушки і частоти розмагнічувального поля. На кількість витків обмотки w обернено пропорційно впливає магнітна проникність пульпи μ_r (варіанти 9 і 10). Щодо впливу геометричних розмірів котушки H і L при фіксованому внутрішньому діаметрі D, то як видно із порівняння варіантів 11 і 13 при однаковій висоті намотки проводу H збільшення довжини котушки L може привести до збільшення споживання активної потужності. Результати варіанта 14 показують, що значне збільшення довжини котушки L при одношаровому варіанті намотки (n=1) є неприйнятним відносно споживання активної потужності.

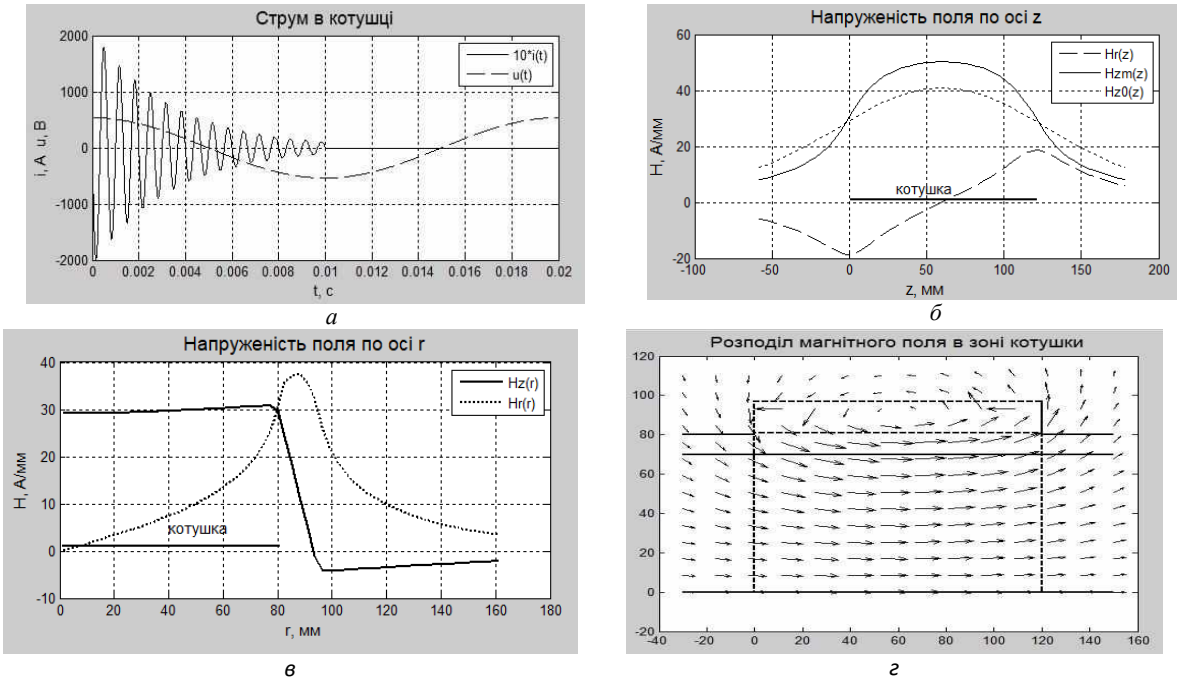

Рис. 4. Візуалізація результатів розрахунку РА: *а* – зміна струму частоти 1500 Гц з 20-кратним зменшенням за пів періоду; *б* –зміна по осі *z* осьової складової напруженості поля на осі пульпопроводу та осьової і радіальної складових на відстані $D_1/2$ від осі; *в* – зміна осьової і радіальної складових в радіальному напрямку на виході з котушки (z=L); *г* – вектори магнітного поля в пульпопроводі та в зовнішньому просторі з урахуванням інтенсивності поля

Висновки та напрямок подальших досліджень. Використання розробленої універсальної програми розрахунку та оптимізації імпульсних РА дає підстави зробити наступні висновки:

розмагнічування пульпи може бути реалізоване використанням високоефективних малогабаритних РА з високочастотним полем 1-1,5 кГц на пульпопроводах діаметром 300 мм і вище при швидкостях пульпи до 5 м/с;

встановлено теоретично і підтверджено розрахунками однозначний зв'язок між кількістю витків обмотки та інтенсивністю магнітного поля, а також аналогічні зв'язки з діаметром пульпопроводу та частотою розмагнічувального поля при інших фіксованих параметрах;

універсальною властивістю імпульсних РА є зменшення числа витків котушки та збільшення їх перетину при збільшенні діаметру пульпопроводу. Враховуючи, що при відношенні внутрішнього діаметру котушки до її дожини $D/L > 2$ напруженість поля в середній області труби може значно відрізнятися від максимального, розрахунок параметрів РА рекомендується виконувати не по максимальному, а по середньому значенню;

розглянуті три модифікації імпульсних РА не відрізняються за принципом дії, але мають певні відмінності щодо параметрів базових елементів, які слід враховувати з урахуванням конкретних технологічних та технічних умов та обмежень практичного використання;

у подальших дослідженнях заплановано доповнити програму окремим модулем оптимізації, який на основі сформованого вектору визначальних параметрів буде визначати їх оптима-

льні значення не шляхом простого перебору варіантів, а використанням сучасних інформаційних систем пошуку оптимальних рішень.

Список літератури

1. **Губин Г.В.** Аналитический обзор направлений улучшения качества магнетитовых концентратов/ **Г.Г. Губин, В.Г. Губина, Л.В. Скляр, Т.П. Ярош** // Збагачення корисних копалин. 2016. – Вип. 64(105) 18 с.

2. **Ганженко И. М., Зарщикова Г. Г., Камалова Т. Б., Алексеева Л. А., Шестак Е. М., Якубайлик Э. К**. Влияние размагничивания на процессы гидравлической классификации сильномагнитных руд // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 13-16.

3. **Пелевин А.Е.** Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 13–16.

4. **Равінська В.** О. Обґрунтування технології дезінтеграції рудних флокулоутворень і агрегатів при магнітно-флотаційному збагачені магнетитових кварцитів : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.15.08 – Збагачення корисних копалин – Кривий Ріг: [б. в.], 2019. – 248 с.

5. **Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А.** Магнитное обогащение сильномагнитных руд. М.: – Недра, 1979, 235 с.

6. А.с. 293638. Устройство для размагничивания пульп ферромагнитных материалов с разной коэрцитивной силой / Авт. изобрет. **А.А. Статкевич, А.Ф. Харитоненко, Н.Г. Фролов** и др. – Опубл. В Б. И., 1971, №6.

7. А.с. 441964. Устройство для размагничивания пульпы ферромагнитных материалов / Авт. изобрет. **Н.Н. Чайко, Э.Г. Файнштейн, С.Т. Толмачев, В.И. Ткач.** – Опубл. В Б. И. 05.09.1974, № 33.

8. Патент №15094. Пристрій для розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів / Авт. **М.М.Чайко, С.Т.Толмачов, Е.Г.Кірносов.** – Опубл. 15.06.2006.

9. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / **Л. А. Бессонов**. – 12-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с.

10. **Немцов М. В., Шамаев Ю. М.** Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.

УДК 697.957:532.575.54

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ*, д-р техн. наук, проф., В.А. ГРОМАДСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
О.В.ІЛЬЧЕНКО, асистент
Криворізький національний університет

ВИБІР КОНСТРУКЦІЇ ЗМІШУВАЧА КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ШАХТНОГО ТУРБОКОМПРЕСОРА

Мета роботи. Визначення та обґрунтування ефективної конструкції змішувача контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора.

Методи дослідження. У роботі використані теоретичні методи дослідження (аналіз, синтез, абстрагування, узагальнення).

Наукова новизна. Встановлено вперше, що найбільш ефективною конструкцією контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора змішувача є труба Вентурі з регульованим перерізом кільцевої горловини та центральним підводом води.

Практичне значення. Стиснене повітря – це чудове середовище для зберігання та передачі енергії. Воно відрізняється універсальністю, гнучкістю та відносною безпекою в порівнянні з іншими методами зберігання енергії, такими як акумулятори та пари. Жодна галузь промисловості не може обійтися без застосування стисненого повітря, яке є доступним і дешевим джерелом – як сировинним, так і енергетичним. Особливо широко стиснене повітря використовується в гірничорудній промисловості (рудовидобувній та паливодобувній). Для отримання стисненого повітря на шахтах використовують турбокомпресори. Для підвищення ефективності турбокомпресора використовують охолоджувачі стисненого повітря. Існує багато видів охолоджувачів, але найбільш перспективним є контактний охолоджувач труба Вентурі – відцентровий сепаратор. Конструктивна схема апарату контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора являє собою послідовно включені по повітрю змішувач типу труба Вентурі і відцентровий сепаратор-краплеуловлювач. Ефективність охолоджувача безпосередньо залежить від конструкції самої труби Вентурі, бо саме в ній відбувається контакт стисненого повітря з охолоджуючою рідиною. Холодна вода поступає в змішувач, після чого вона розпорошується потоком повітря. В суміші води та повітря відбувається тепломасообмін, при якому повітря охолоджується, а вода нагрівається. Розроблено рекомендації щодо конструктивних характеристик труби Вентурі для системи контактного охолодження шахтного турбокомпресора.

Результати. Існує безліч конструкцій труб Ветурі, які відрізняються між собою. В результаті аналізу визначено, що найбільш перспективною є конструкція з горловиною, що регулюється рухомим конусом та з центральним підводом зрошуючої води. Але необхідні більш детальні дослідження інших конструктивних параметрів контактного охолоджувача труба Вентурі.

Ключові слова: стиснене повітря, система охолодження, контактний повітроохолоджувач, труба Вентурі, горловина, газ, рідина.

* © Замицький О.В., Громадський В.А., Ільченко О.В., 2022