

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ІНДУКЦІЙНИЙ НАГРІВ ДЛЯ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ І НЕЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ СЕРЕДОВИЩ



ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ



КРИЩУК Роман Сергійович
МАЛАХАТКА Денис Олександрович
БЕРЕЗЮК Андрій Олександрович
КОМАРЧУК Дмитро Сергійович

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – встановлення взаємозв'язків між параметрами пристроїв індукційного нагріву та характеристиками джерел живлення для підвищення енергоефективності технічних засобів теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ.

Об'єктом дослідження є електротехнічні комплекси теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ.

Предмет дослідження – закономірності між конструктивними, режимними параметрами та параметрами джерела живлення з інтенсивністю та якістю електротехнологічних процесів.

СТРУКТУРА НАУКОВОЇ РОБОТИ:

- Розрахунок параметрів індукторів поперечного магнітного поля;
- Розрахунок індукторів повздовжнього магнітного поля;
- Теплові та електромагнітні поля в електротехнологічному комплексі для температурної обробки зерна ріпаку;
- Перетворювальні пристрої для живлення установок індукційного нагріву;

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ



РІВНЯННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІНДУКТОРІВ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Система рівнянь Максвелла та матеріальні рівняння:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}; \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0; \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \quad \mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B});$$

Рівняння магнітного поля із системи рівнянь Максвелла:

$$\Delta B_z = \mu \sigma \frac{\partial B_z}{\partial t} + \mu \sigma \frac{v_\varphi}{\rho} \frac{\partial B}{\partial \varphi}$$

- рівняння поперечної складової індукції магнітного поля для індукторів з електропровідними рухомими вторинними елементами.

$$\Delta B_z = 0;$$

- рівняння поперечної складової індукції магнітного поля для індукторів з неелектропровідними вторинними елементами.

$$\Delta B_z = \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 B_z}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B_z}{\partial \rho}; \quad \text{- циліндрична система координат}$$

$$\Delta B_z = \frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}; \quad \text{- декартова система координат}$$

ІНТЕГРАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ РІВНЯНЬ ІНДУКЦІЇ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Для циліндричної системи координат:

$$\hat{B}_z(\rho, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \hat{B}_z(\rho, \varphi, z) e^{in\varphi} d\varphi;$$

$$\tilde{B}_z(\rho) = \frac{1}{d} \int_{-d}^0 \hat{B}_z(\rho, z) dz;$$

$$\tilde{B}_z(z) = \frac{J_n^2(\lambda_{n\eta} r_3) - J_n^2(\lambda_{n\eta} r_4)}{\pi \lambda_{n\eta}^2 J_n^2(\lambda_{n\eta} r_3)} \int_{r_1}^{r_2} \hat{B}_z(\rho, z) \rho \times \\ \times (Y_n(\lambda_{n\eta} r_4) J_n(\lambda_{n\eta} \rho) - J_n(\lambda_{n\eta} r_4) Y_n(\lambda_{n\eta} \rho)) d\rho;$$

Для декартової системи координат:

$$\hat{B}_z(y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} B_z(x, y, z) e^{inx} dx;$$

$$\tilde{B}_z(z) = \frac{2}{a} \int_{-a/2}^{a/2} \hat{B}_z(y, z) \cos(qy) dy;$$

Інтегральні перетворення застосовуються для приведення диференційного рівняння до залежності від однієї координати, що дозволяє тоді виконати аналітичний розв'язок рівняння. Над коренем перетвореного рівняння виконуються обернені до інтегральних перетворення.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОВНОЇ КОМПЛЕКСНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ПАРАМЕТРІВ ІНДУКТОРІВ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Повна електромагнітна комплексна потужність визначається теоремою Умова-Пойнтінга на поверхнях магнітопроводів індуктора:

$$S_m = \int_{r_3}^{r_4} \int_{-\pi}^{\pi} \left(E_{\rho} i_{\rho}^* + E_{\varphi} i_{\varphi}^* \right) \rho d\varphi d\rho$$

$$S_m = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(E_x i_x^* + E_y i_y^* \right) dx dy$$

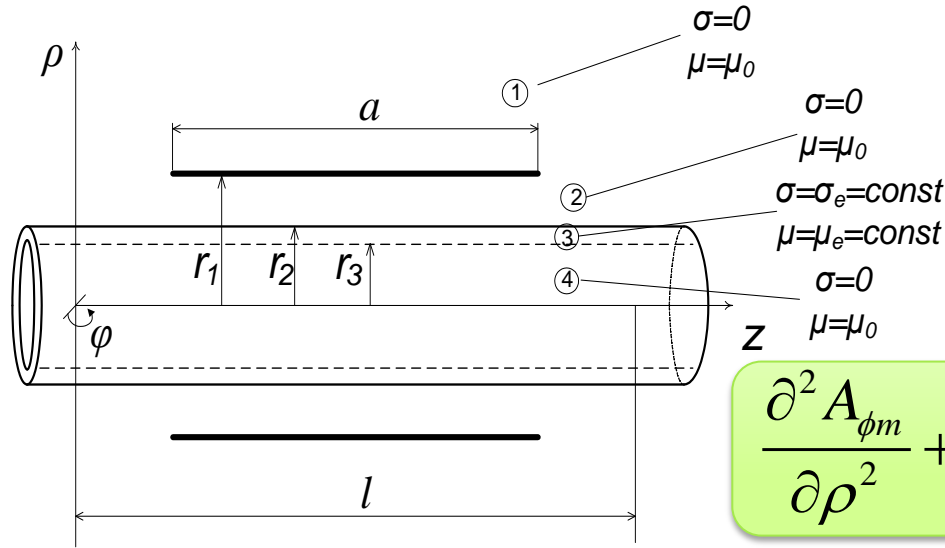
Повна електромагнітна потужність трифазного та однофазного індукторів також визначається наступними виразами:

$$\begin{aligned} S_{m(3\phi)} = & I_A^2 z_{AA} + I_A I_B z_{AB} + I_A I_C z_{AC} + \\ & + I_B I_A z_{BA} + I_B^2 z_{BB} + I_B I_C z_{BC} + \\ & + I_C I_A z_{CA} + I_C I_B z_{CB} + I_C^2 z_{CC}; \end{aligned}$$

$$S_{m(1\phi)} = I^2 z_m;$$

Використовуючи один з виразів для електромагнітної потужності із теореми Умова-Пойнтінга, а також один з виразів для електромагнітної потужності із закону Ома, знаходиться комплексний опір z власної та взаємної індуктивності. Опір враховує потоки диференційного розсіювання та потоки розсіювання лобових частин, а також активні втрати потужності на вторинному елементі. Комплексне розсіювання пазів враховується окремо.

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ОДНОФАЗНОГО ІНДУКТОРА ПОВЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ



Розподіл векторного магнітного потенціалу:

$$\frac{\partial^2 A_{\phi m}}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 A_{\phi m}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_{\phi m}}{\partial \rho} - \left(\frac{1}{\rho^2} + i \mu \sigma \omega \right) A_{\phi} = 0$$

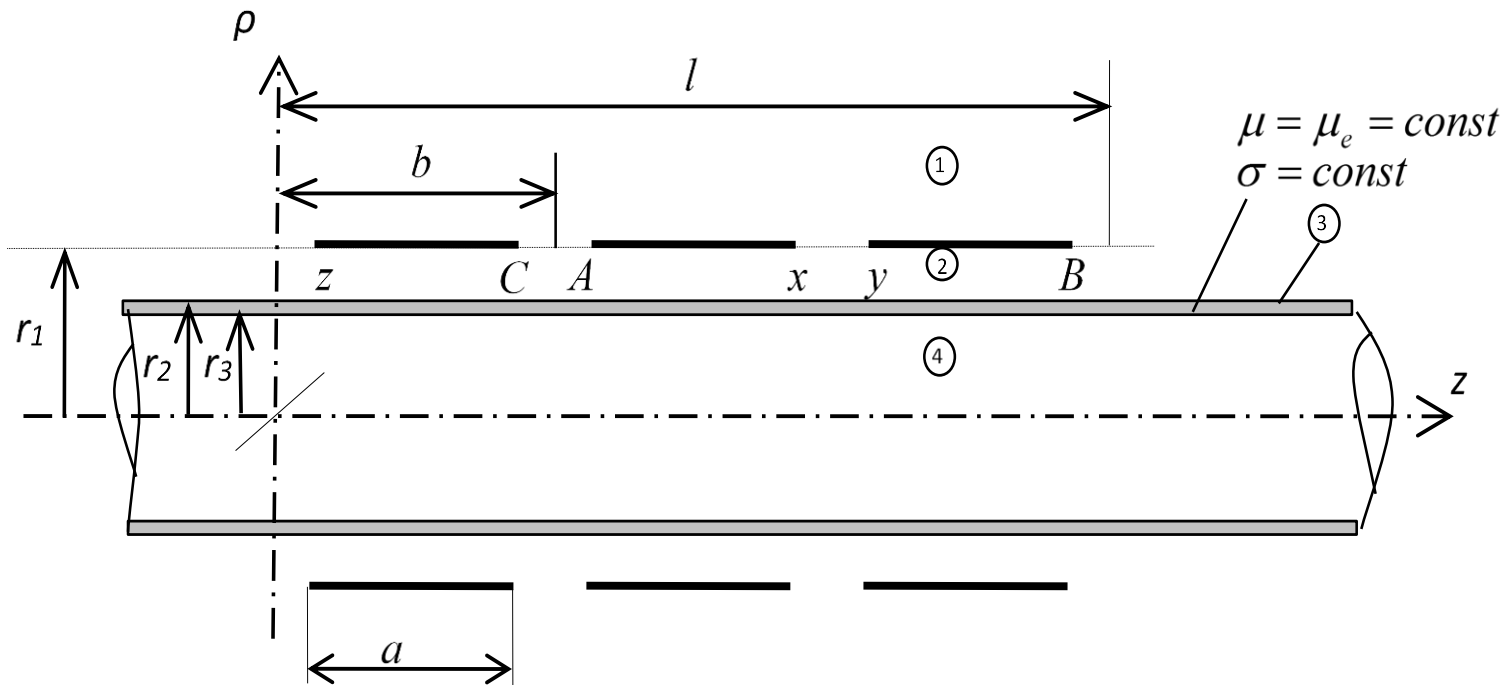
Комплексний опір, що вноситься, при завантаженні індуктора одним феромагнітним стержнем буде визначатись за формулою:

$$z_{m1} = \frac{U_m}{I_m} = -i 32 \pi^2 f r_1^2 \mu_0 \frac{w^2}{a^2 l} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{p_k^2} K_1(p_k r_1) (M_k K_1(p_k r_1) - I_1(p_k r_1)) \sin\left(p_k \frac{a}{2}\right)$$

Враховавши опори на схемі заміщення отримаємо вираз для визначення комплексного опору що вноситься для індуктора, що завантажений пучком феромагнітних елементів:

$$z_{mn} = n \cdot z_{m1} - z_{xx} \cdot (n - 1)$$

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ ТРИФАЗНОГО ІНДУКТОРА ПОВЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ



Розподіл векторного магнітного потенціалу в повітряному проміжку (область 2):

$$A_{\varphi 2} = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_2 \sin(p_k z) = -\frac{4\mu_0}{al} \sum_{k=1}^{\infty} r_1 K_1(p_k r_1) L_k T_k \sin\left(p_k \frac{a}{2}\right) \sin(p_k z)$$

ІНДУКТОР ПОВЗДОВЖНЬОГО ПОЛЯ ДЛЯ НАГРІВУ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ В КОМПЛЕКСІ ДЛЯ СУШІННЯ ЗЕРНА

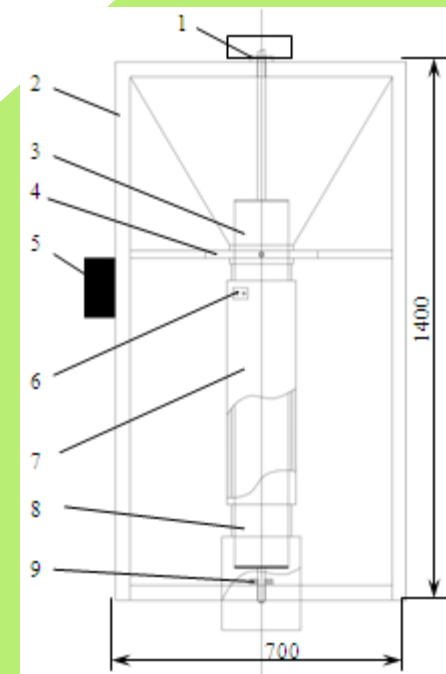
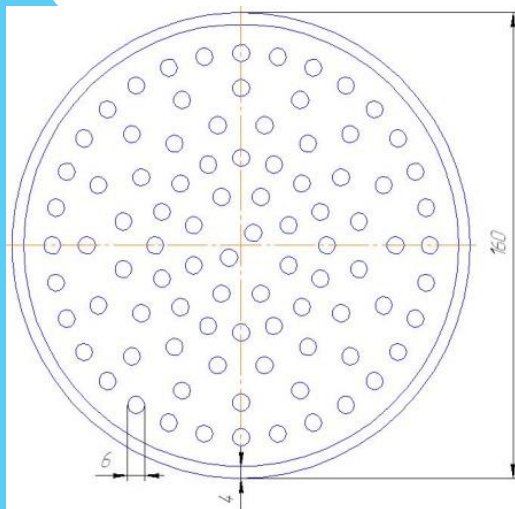


**КОМПЛЕКС ДЛЯ
СУШІННЯ ЗЕРНА НА
БАЗІ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА
ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ**



УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА РІПАКУ ІЗ ДОПОМОГОЮ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Розрахункові параметри індуктора	
Діаметр індуктора, м	0,6
Довжина індуктора, м	0,165
Кількість витків індуктора, шт	180
Кількість шарів обмотки, шт	3
Кількість мотків в одному шарі, шт	60
Довжина проводу ПДС 3х6, м	99



Загальний вигляд експериментальної установки:
1 – редуктор; 2 – каркас;
3 – феромагнітні стрижні; 4 – кріплення корпусу; 5 – панель керування; 6 – клеми живлення індуктора; 7 – індуктор; 8 – немагнітний корпус; 9 – опорний підшипник.

Розташування феромагнітних стрижнів по об'єму зернового каналу

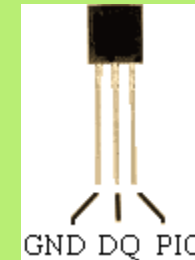
ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА РІПАКУ



Вихідний отвір для
регулювання продуктивності
установки



Встановлення датчиків
температури



Зовнішній вигляд температурного
датчика DS18B20 без захисного та в
захисному корпусі PIO – порт
уведення/виводу; DQ – введення/вивід
даних; GND – «земля».



Встановлення редуктора



Кріплення двигуна



Вхідна горловина
установки

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ

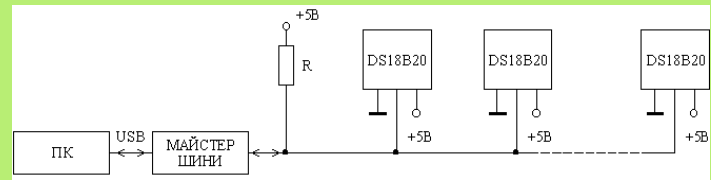
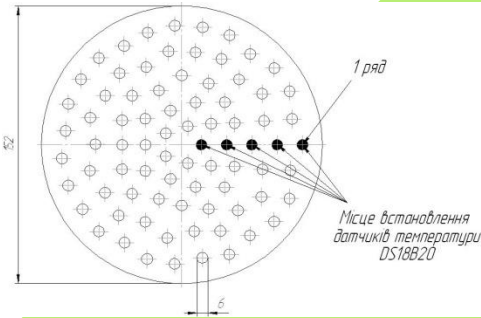
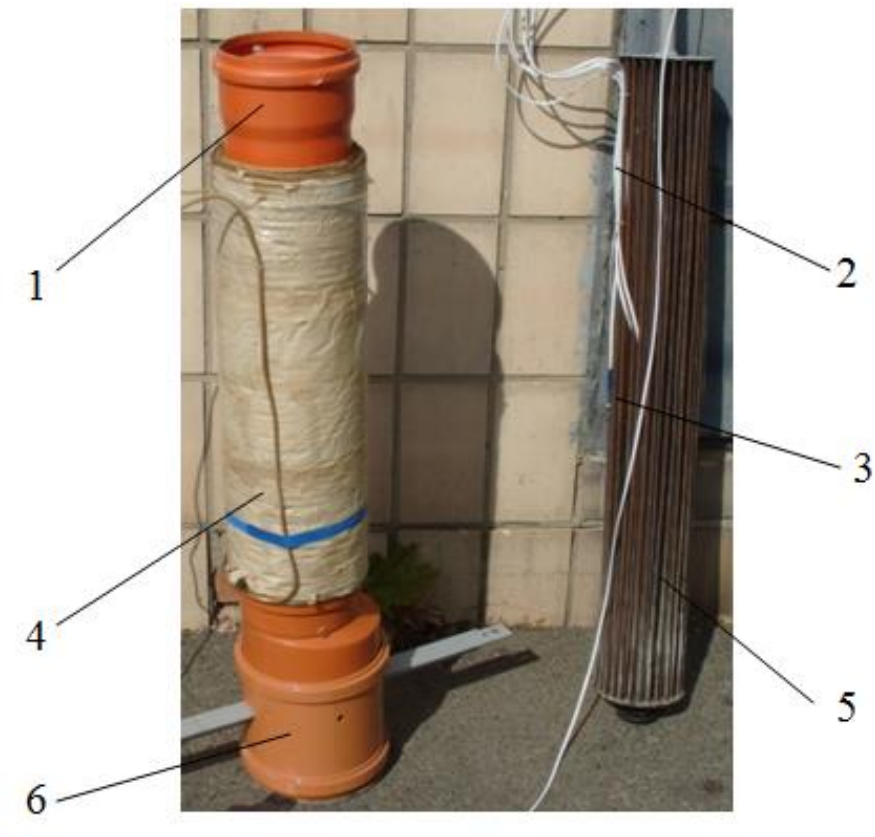
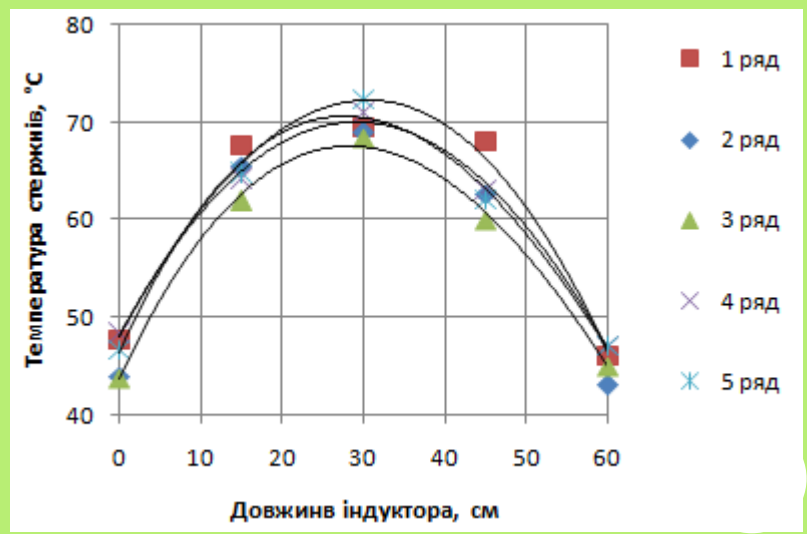


Схема розміщення датчиків температури на стрижнях та схема підключення датчиків температури до ПК

УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕРМООБРОБКИ ЗЕРНА РІПАКУ.

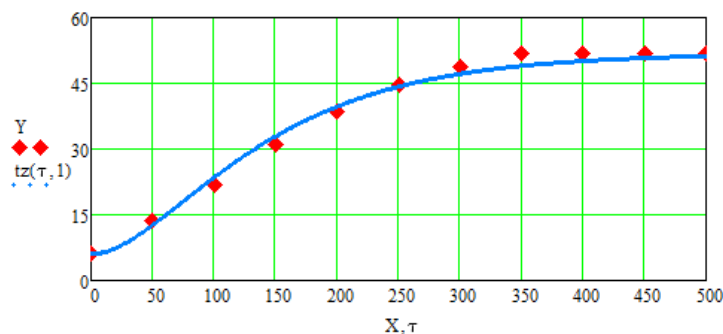
- 1 – ВХІДНИЙ ОТВІР;
- 2 – З'ЄДНУВАЛЬНІ ШИНИ;
- 3 – ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ;
- 4 – ІНДУКТОР; 5 – ФЕРОМАГНІТНІ СТРИЖНІ; 6 – ВИХІДНИЙ ОТВІР.



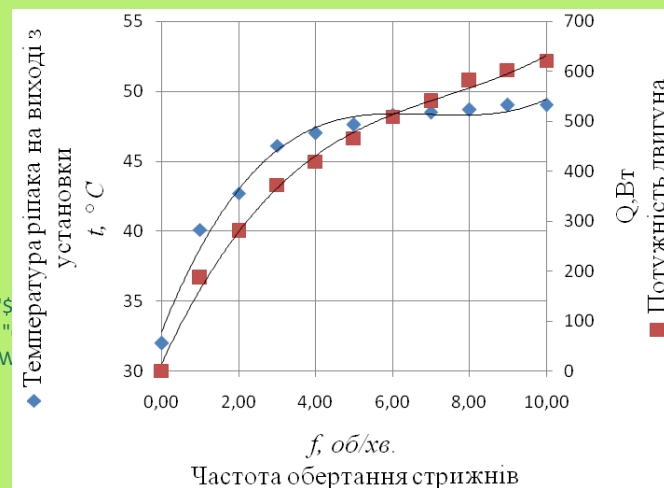
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАНОВКИ

Розроблена програма для опитування датчиків температури DS18B20 та управління електронними ключами мережі 1-wire на базі ОС Linux Ubuntu 12.04 LTS

Ідентифікація математичної моделі теплових процесів



Дослідження температури зерна при зміні частоти обертання стрижнів



```
#!/bin/sh
CL_RED='\033[1;31m'
CL_GREEN='\033[1;32m'
CL_YELLOW='\033[1;33m'
CL_BLUE='\033[1;34m'
CL_MAGENTA='\033[1;35m'
CL_CYAN='\033[1;36m'
CL_WHITE='\033[1;37m'
CL_38='\033[1;38m'
CL_NORM='\033[0;39m'
FLAG1="0"
CELDIR="mnt/1wire"
NUM=0
CELDATA_1="28.48324B030000/temperature";
CELDATA_2="28.E73B4B030000/temperature";
CELDATA_3=""; CELDATA_4=""; CELDATA_5=""; KEYDATA_1=""; KEYDATA_2="";
KEYDATA_3="12.EF897F000000/PIO.A";
FLAG1="0"

fi
TEMP1=$(cat /$CELDIR/$CELDATA_1) TEMP2=$(echo $TEMP1)
RES=$(echo "scale=0; $TEMP2*100000/10" | bc); if [ "$RES" -ge "400000" ]
then echo 0 > /$CELDIR/$KEYDATA_3
else
echo 1 > /$CELDIR/$KEYDATA_3
fi
echo -ne "${CL_GREEN}" | ""${CL_CYAN}" $FLAG1""${CL_GREEN}" | ""${CL_RED}"10.0000""${CL_GREEN}" | ""${CL_RED}"20.0000""
""${CL_RED}"30.0000""${CL_GREEN}" | ""${CL_RED}"40.0000""${CL_GREEN}" | ""${CL_RED}"50.0000""${CL_GREEN}" | ""${CL_RED}"
| ""${CL_RED}"70.0000""${CL_GREEN}" | ""${CL_YELLOW}"0""${CL_GREEN}" | ""${CL_YELLOW}"1""${CL_GREEN}" | ""${CL_YELLOW}
echo -ne `date` "$TEMP2\r" >> base
#NUM=$((NUM + 1))
sleep 1
done
```

Обробка результатів розрахунку показала, що похибка моделі становить 3,759%.

ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА УСТАНОВКИ



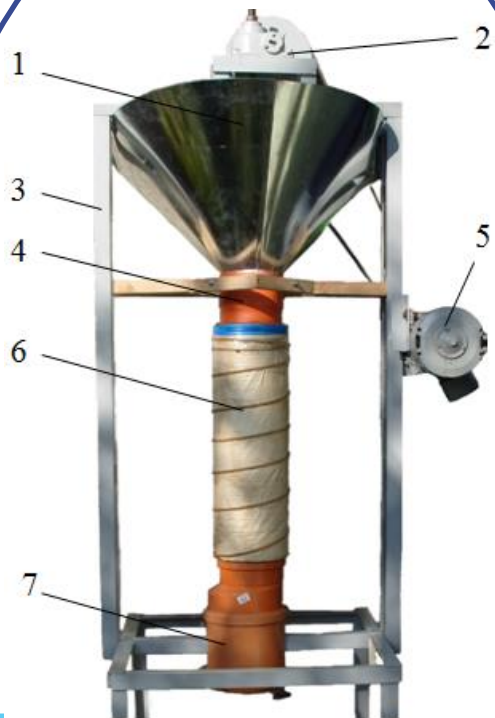
Монтаж установки та САУ перед пресом ПХП-100 та ЕК 75/1200



Використання додаткової установки теплової обробки для пресуванні олійного матеріалу забезпечило підвищення виходу олії при методі «холодного» пресування (ПХП-100) на 2.62 %, при «гарячому» пресуванні (ЕК75/1200) на 2.42 %.

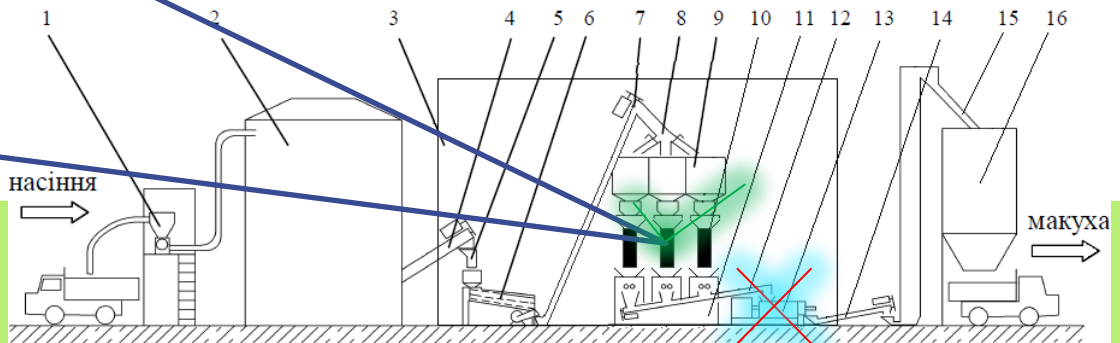
ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

Технологія виробництва масла на пресах з використанням попереднього індукційного нагріву олієнасіння



- 1 - завантажувальний бункер; 2 - редуктор;
- 3 - рама; 4 - корпус;
- 5 - двигун;
- 6 - індуктор;
- 7 - випускний отвір.

Нагрівання зерна безпосередньо перед подачею в прес забезпечило збільшення виходу олії на 2-3%, що дозволяє відмовитися від використання в лінії виробництва масла пресів дожима.



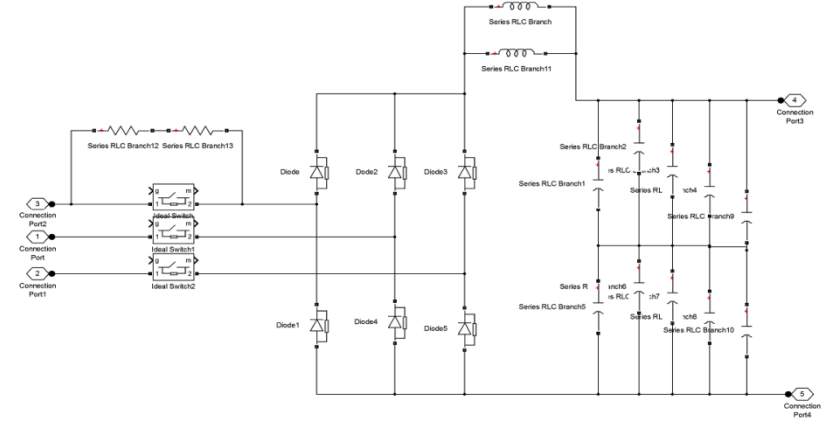
Конструктивно-функціональна схема лінії виробництва олії з використанням енергоощадного комплексу: 7 – пружинний транспортер; 8 – розподільний рукав; 9 – проміжні бункери для зерна; 10 – установка для термооброблення олійного матеріалу (електротехнічний комплекс); 11 – прес-екструдер. 13 – прес дожима.

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

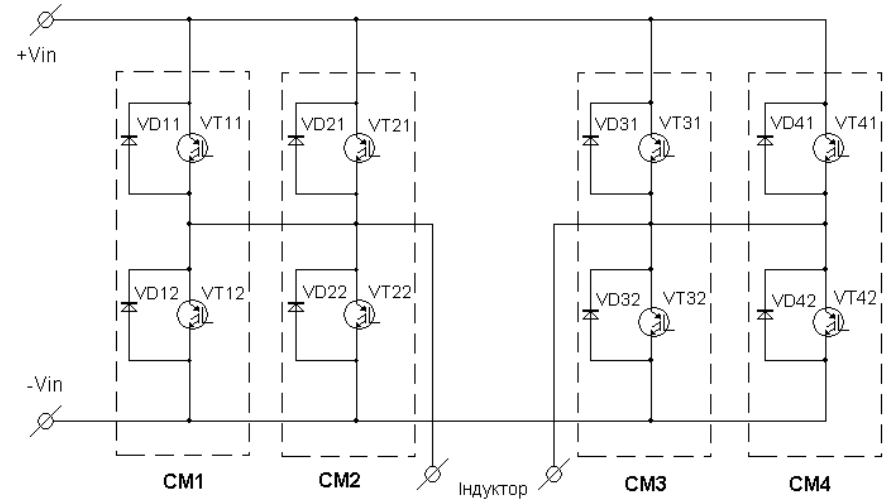
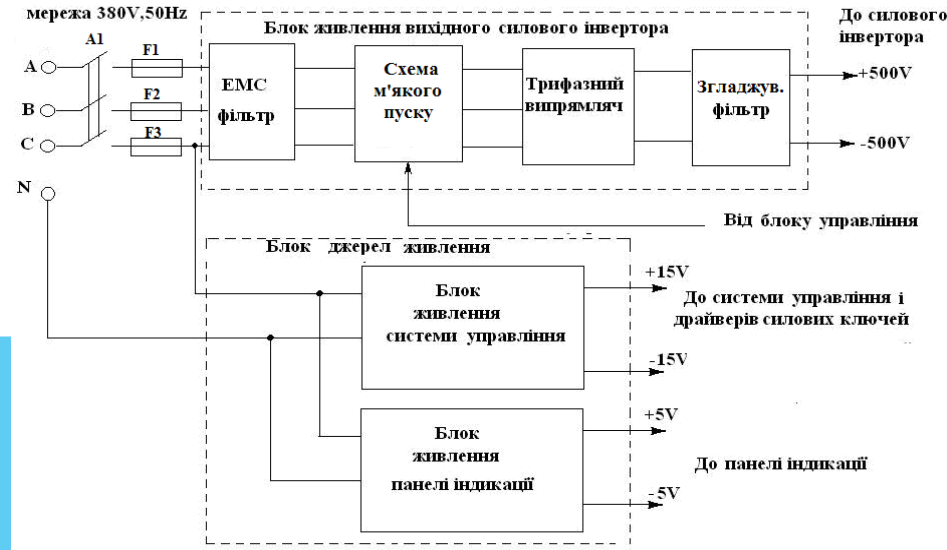
Силовий напівпровідниковий перетворювач ЕТУ-250

складається з:

- трифазного випрямляча, який виконаний на збірках типу SKKD 260/12 (1200 V, 600A);
 - ємнісного згладжуючого фільтра, що складається з послідовно-паралельного з'єднання 12-ти електролітичних конденсаторів типу KEMET ємністю 4700,0 μF (415V);
 - однофазного високочастотного інвертора резонансного типу, який виконано на основі інтелектуальних IGBT модулів типу SEMIX 604GB12E4S (600A, 1200V)
 - системи управління та захисту
- Індуктори заданої конфігурації (задаються видом деталей та вузлів, що нагріваються)



Випрямляч з входним зарядним пускачем і вихідним згладжуючим фільтром



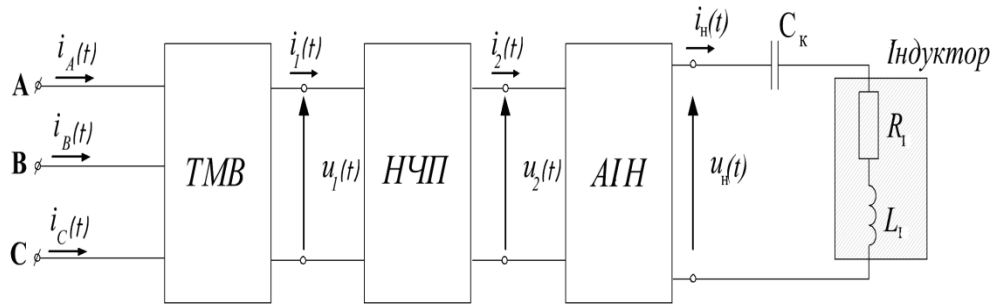
Структурна схема блоків електроживлення установки ЕТУ-250

Схема електрична принципова силового інвертора установки ЕТУ-250

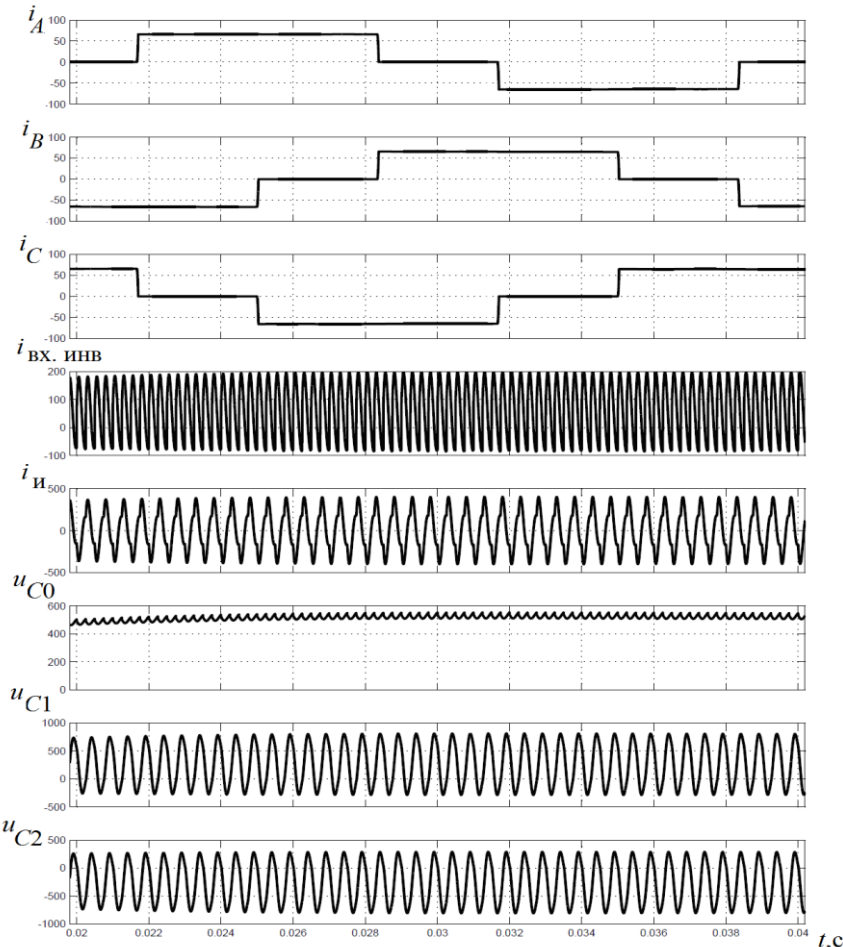
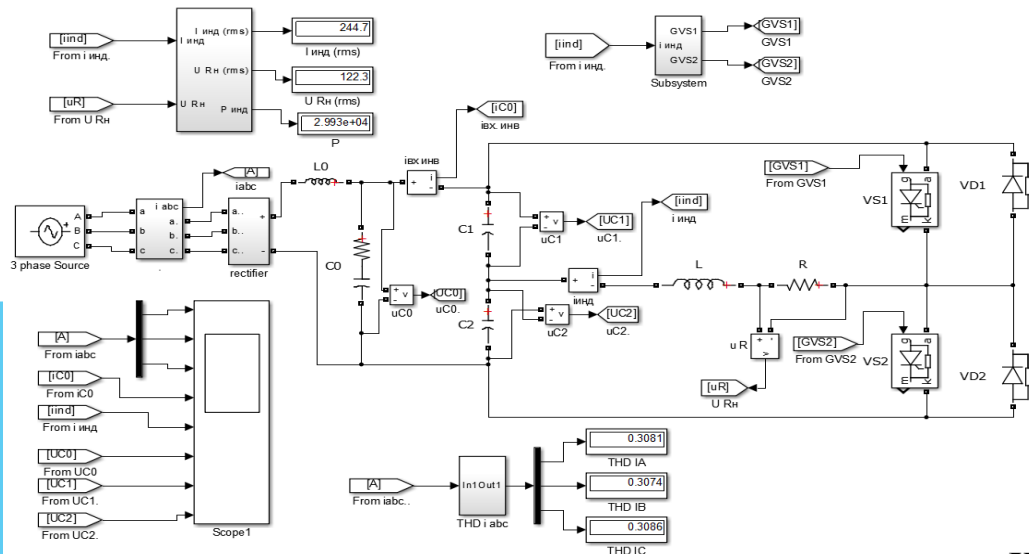
ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

Установка високочастотного індукційного нагрівання ЕТУ-250 призначена для електротермічної обробки деталей важкої транспортної техніки подвійного призначення.

Сфери використання ЕТУ-250: термообробка деталей і заготовок та їх нагрівання при ремонті промислового, енергетичного і транспортного обладнання.



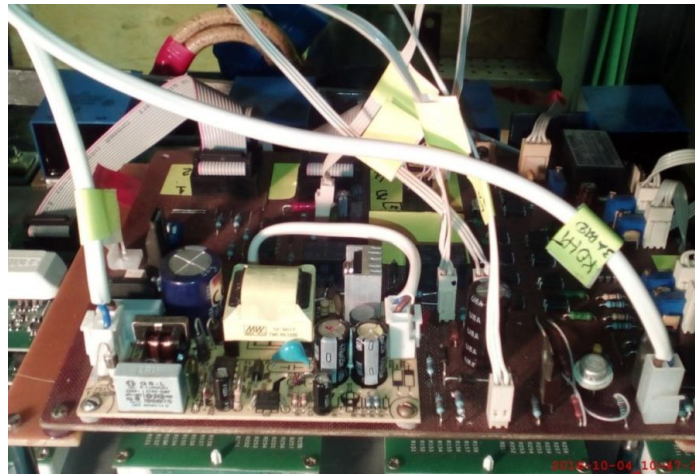
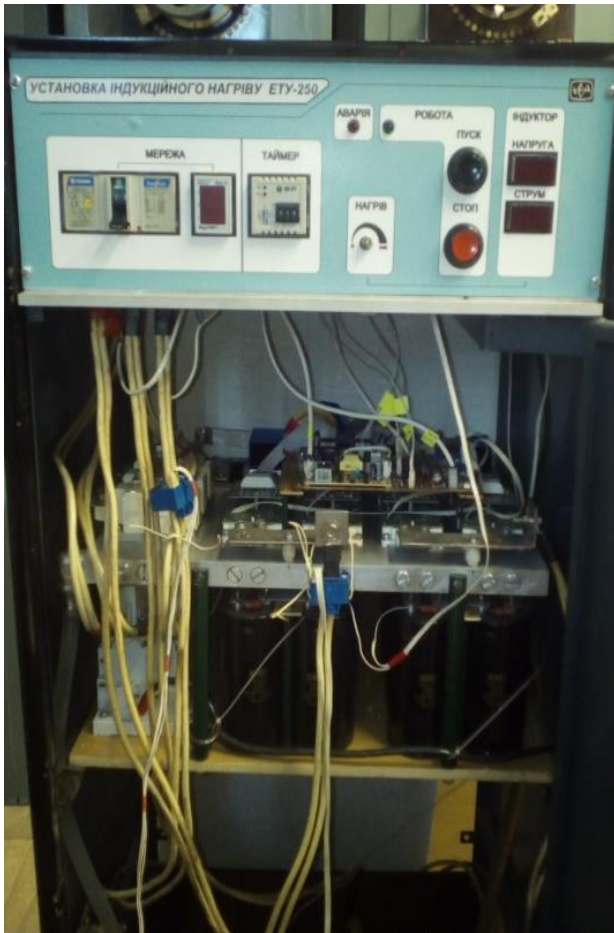
Силовая схема напівпровідникового перетворювача ЕТУ з поліпшеною електромагнітною сумісністю



Імітаційна *SIMULINK* – модель ЕТУ-250, яку виконано на основі напівмостового інвертора

Часові діаграми миттєвих значень струмів і напруг ЕТУ-250, які отримані за допомогою її імітаційної *SIMULINK* – моделі

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ



Фотографії зовнішнього вигляду установки ЕТУ-250, плати системи управління потужним інвертором перетворювача частоти, а також процесу нагрівання чавунного гальмівного башмака редуктора вагону метро.

Основні технічні характеристики:

- напруга живлення – 380В/50Гц
- максимальна повна вихідна потужність – 250 кВА;
- регульована частота струму в індукторі – від 0,5 кГц до 30 кГц;
- коефіцієнт корисної дії – до 95 %;
- питома швидкість нагріву – (30-50)°С/кг·сек;
- температура нагріву (max) – 900°С;

Переваги:

- дозволяє знизити споживання електричної енергії у середньому на (20-40) % за рахунок збільшення електричного і теплового ККД;
- підвищити продуктивність роботи ЕТУ в 1,5-2 рази за рахунок збільшення швидкості нагріву;
- значно підвищити ККД установки, знизити в кілька разів витрати матеріальних ресурсів на виготовлення та ремонт індукторів ЕТУ;
- дозволяє поліпшити екологію виробництва;
- дає змогу робити заміну індукторів ЕТУ різних типорозмірів і конфігурації при підтримці на заданому рівні параметрів електротермічного процесу.

ВИСНОВОК

Представлені результати наукових досліджень в сукупності вирішують важливу науково-прикладну актуальну проблему встановлення взаємозв'язків між параметрами пристроїв індукційного нагріву та характеристиками джерел живлення, що дозволило підвищити енергоефективність технічних засобів для теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ на базі пристроїв індукційного нагріву шляхом врахування динаміки нагрівання та визначення оптимальної частоти і величини струму в індукторах, за умови зміни параметрів завантаження, без виконання додаткових налаштування параметрів перетворювача.

Впровадження результатів роботи при проектуванні систем індукційного нагріву потужністю 2 – 12 кВт дозволило розробити ефективне індукційне обладнання в однофазному та трифазному виконанні для проточного нагріву води з ефективністю використання електричної енергії на рівні не менше 90%, а також підігріву повітря в індукційній установці потужністю 35 кВт в системах сушіння зернових.