

Міністерство освіти і науки України

Криворізький національний університет

Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка

**до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

ТЕМА РОБОТИ:

Розробка системи захисту від пропалювання тигля індукційної печі

Виконав: студент групи ЕЕМ-23ск

Володимир ЛАРІН

Керівник випускної роботи _____ д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Нормо контролер _____ д.т.н., проф. Олег СІНЧУК

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг 2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЛАРІН Володимир Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розробка системи захисту від пропалювання тигля індукційної
печі

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розробка системи захисту від пропалювання тигля індукційної печі
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Параметри ізоляційних матеріалів, що застосовуються в індукційних печах; II. Розробка сигналізатора пошкодження тигля і ізоляції індуктора; III. Схеми контролю стану тигля та ізоляції індуктора.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Схема установки для вимірювання питомих опорів; II. Залежність питомого опору ізоляційних матеріалів індуктора від температури; III. Схема вимірювання опору футерування; IV. Залежність чутливості схеми від внутрішнього опору; V. Застосування методів контролю стану футерування; VI. Схема сигналізатора АСЧВ-1.-

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ім'я, прізвище консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олег СІНЧУК		
II	Олег СІНЧУК		
III	Олег СІНЧУК		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін
1	Основні вимогами до матеріалів ізоляції індукторів	21.05.26
2	Визначення залежностей питомого опору матеріалів	24.05.26
3	Визначення залежностей питомого опору матеріалів	27.05.26
4	Способи безперервного контролю стану тигля	31.05.26
5	Вимірювальна частина сигналізатора стану тигля	07.06.26
6	Застосування методів контролю стану футерування	11.06.26
7	Застосування методів роздільного контролю опорів між розплавленим металом та сіткою	15.06.26

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Володимир ЛАРІН
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Олег СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Розробка системи захисту від пропалювання тигля індукційної печі»

48 с., 12 рис., 27 літературних джерел

Мета роботи: Підвищення рівня промислової безпеки та запобігання аварійним ситуаціям під час індукційного плавлення металів шляхом розробки та вдосконалення високонадійної мікропроцесорної системи безперервного контролю стану футерівки тигля (захисту від пропалювання), а також створення надійного, завадостійкого та швидкодіючого апаратно-програмного комплексу для безперервного діагностичного моніторингу стану вогнетривкої футеровки індукційної тигельної печі з метою своєчасного виявлення критичного зносу та запобігання аварійному прориву рідкого металу до водоохолоджуваного індуктора.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз фізико-хімічних та термодинамічних процесів, що призводять до деградації, ерозії та розтріскування вогнетривкої футерівки індукційних тигельних печей (ІТП).

Провести комплексний аналіз фізико-хімічних та термомеханічних факторів, що спричиняють локальний або рівномірний знос (ерозію) вогнетривкого тигля під час плавки різних типів металів.

Дослідити існуючі методи контролю зносу тигля (електричні, теплові, оптичні, електромагнітні) та обґрунтувати вибір оптимального методу для конкретних умов плавки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дослідити недоліки традиційних систем контролю зносу (сигнальних сіток-антен) та виявити причини їхніх хибних спрацьовувань або відмов у критичних ситуаціях.

Розробити математичну модель електричного кола "індуктор – футерівка – розплав – подовий електрод" для точного розрахунку струмів витоку в нормальних та аварійних режимах.

Розробити модернізовану просторову структуру сигнальної системи, розділивши контрольні електроди на ізольовані зони для точної локалізації місця стоншення футеровки (наприклад, по висоті та периметру тигля).

Спроектувати апаратну частину системи захисту (генератор контрольної напруги, вимірювальні шунти, фільтри перешкод від тиристорного перетворювача) та розробити алгоритм фільтрації хибних спрацьовувань.

Створити алгоритм безперервного вимірювання комплексного електричного опору (імпедансу) між розплавом та сигнальною сіткою, який здатен відфільтровувати наведені електромагнітні завади від потужного змінного поля індуктора.

Запропонувати критерії дворівневої сигналізації: "Попередження" (стоншення футерівки) та "Аварія" (критичне наближення розплаву до індуктора).

Розробити логіку автоматичного аварійного захисту, яка забезпечить миттєве зняття напруги з індуктора та подачу світлозвукової сигналізації персоналу в разі фіксації критичного падіння опору ізоляційного шару.

Сформулювати рекомендації щодо інтеграції розробленої системи в загальну автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУ ТП) ливарного цеху.

ІНДУКЦІЙНА ПІЧ, ПРОПАЛЮВАННЯ ТИГЛЯ, ВОГНЕТРИВКА ФУТЕРІВКА, СТРУМ ВИТОКУ, СИГНАЛІЗАТОР ЗНОСУ, СИГНАЛЬНА СІТКА, КОНТРОЛЬ ОПОРУ, БЕЗПЕКА ПЛАВКИ, ІНДУКТОР

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Параметри ізоляційних матеріалів, що застосовуються в індукційних печах	14
1.1. Основні вимогами до матеріалів ізоляції індукторів	14
1.2. Визначення залежностей питомого опору матеріалів, що застосовуються для ізоляції індукторів від температури	17
Розділ 2. Розробка сигналізатора пошкодження тигля і ізоляції індуктора ...	24
2.1. Способи безперервного контролю стану тигля індукційної печі	24
2.2. Вимірювальна частина сигналізатора стану тигля	26
Розділ 3. Схеми контролю стану тигля та ізоляції індуктора.....	32
3.1. Застосування методів контролю стану футерування	32
3.2. Застосування методів роздільного контролю опорів між розплавленим металом та сіткою, закладеною між індуктором та тиглем, а також між сіткою та індуктором	35
Висновки	38
Список використаних джерел	40
Додаток А.....	43
Додаток Б	44
Додаток В	45
Додаток Г	46
Додаток Д.....	47
Додаток Е	48

Вступ

Роль індукційних печей та специфіка їхньої конструкції

Індукційні тигельні печі (ІТП) є одним із найдосконаліших агрегатів сучасного ливарного виробництва та спеціальної металургії.

Вони забезпечують високу швидкість плавки, відмінну гомогенізацію розплаву завдяки інтенсивному електродинамічному перемішуванню та мінімальний угар легуючих елементів.

Основою конструкції такої печі є мідний багатовитковий індуктор, всередині якого формується робочий простір — тигель.

Тигель виготовляється шляхом набивання та спікання спеціальних вогнетривких мас (кислих, основних або нейтральних).

Вогнетривка футеровка виконує подвійну функцію: вона утримує рідкий метал із температурою понад 1500°C і одночасно слугує електричною та тепловою ізоляцією між металом та індуктором.

Порожнисті витки індуктора під час роботи безперервно охолоджуються водою під тиском.

Природа небезпеки: загроза прориву металу

Актуальність розробки надійних систем захисту зумовлена колосальною потенційною небезпекою, що криється в самій конструкції печі.

Під час експлуатації вогнетривкий тигель піддається екстремальним навантаженням.

Хімічна взаємодія зі шлаками, механічне стирання твердою шихтою під час завантаження, а також термічні удари призводять до поступового стоншення стінок або утворення глибоких радіальних тріщин (так званих "зумпфів").

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Якщо рідкий метал проникне крізь пошкоджену футеровку і торкнеться мідного витка індуктора, виникає коротке замикання колосальної потужності.

Пропалювання мідної трубки призводить до миттєвого викиду води під тиском безпосередньо у ванну з розплавленим металом.

Наслідком цього є паровий та електромагнітний вибух руйнівної сили, який знищує піч, спричиняє пожежу в цеху та несе пряму загрозу життю металургів.

Недоліки існуючих методів контролю

Більшість експлуатованих печей оснащені базовою системою захисту — так званою "сигнальною сіткою".

Це тонкий лист нержавіючої сталі або дротяна сітка, що закладається між зовнішнім шаром футеровки (міканітом) та індуктором.

На дно печі (через подовий електрод) подається невеликий контрольний потенціал на розплавлений метал.

Якщо метал проникає крізь футеровку до сітки, електричне коло замикається, і реле вимикає піч.

Проте ця класична система має ряд суттєвих недоліків:

- Сліпота до поступового зносу. Класична система часто працює у релейному режимі (є контакт / немає контакту) і фіксує аварію лише тоді, коли метал вже безпосередньо досяг сітки, залишаючи мінімум часу на евакуацію розплаву.
- Хибні спрацьовування. В умовах високої вологості під час розігріву нового (сирого) тигля або через осідання струмопровідного пилу опір ізоляції тимчасово падає, що викликає хибні відключення печі, зриваючи технологічний процес.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Відсутність локалізації. Звичайна сітка не дає інформації про те, в якій саме частині тигля (на дні, в зоні шлакового поясу чи на стінках) виникла проблема.

Вектор модернізації та наукова новизна

Сучасний підхід до вирішення цієї проблеми вимагає переходу від пасивного очікування прориву до предиктивного (передбачувального) моніторингу.

Розробка нової системи передбачає застосування мікропроцесорних модулів для безперервного вимірювання динаміки зміни опору футеровки під час плавки.

Впровадження сегментованих сигнальних сіток дозволяє сканувати профіль тигля.

Інтелектуальний алгоритм аналізує швидкість падіння опору: якщо опір знижується плавно — це природний знос, який дозволяє безпечно закінчити плавку; якщо ж фіксується різке падіння — це ознака утворення наскрізної тріщини, що вимагає миттєвого екстреного зняття потужності та нахилу печі для зливу розплаву.

Практичне значення

Впровадження розробленого апаратно-програмного комплексу дозволяє повністю виключити людський фактор із процесу оцінки стану тигля.

Це гарантує абсолютну безпеку персоналу, значно подовжує безпечну кампанію (термін служби) вогнетривких матеріалів за рахунок їх повного використання та запобігає багатомільйонним збиткам від аварійного руйнування дорогого плавильного обладнання.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проблема безпеки індукційного плавлення

Індукційні тигельні печі (ІТП) є основним агрегатом у сучасній ливарній промисловості для плавлення чавуну, сталі та кольорових металів.

Робоча температура розплаву всередині печі може перевищувати **1500°C – 1600°C**. Водночас мідний індуктор, який генерує електромагнітне поле, розташований усього за кілька сантиметрів від розплаву і охолоджується проточною водою.

Бар'єром між рідким металом та водоохолоджуваним індуктором слугує лише шар вогнетривкої набивної маси (футерівка).

У процесі експлуатації футерівка піддається інтенсивному зносу через хімічну взаємодію зі шлаком, механічне стирання шихтою під час завантаження та термічні удари (цикли нагрівання-охолодження).

Якщо рідкий метал проникне через тріщину в футерівці та досягне мідних витків індуктора, відбудеться пропалювання трубки.

Контакт води з рідким металом при таких температурах миттєво призводить до парового вибуху руйнівної сили та викиду розплаву з печі, що становить смертельну небезпеку для персоналу та призводить до знищення обладнання.

Принцип дії електричного захисту (контроль опору)

Найбільш надійним і поширеним методом запобігання такій аварії є використання системи контролю електричного опору футерівки (так званий "сигналізатор витоку на землю").

Принцип базується на вимірюванні електричного опору між розплавленим металом та індуктором.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для цього в дно печі (подину) вмонтовується жаростійкий стрижень — **подовий електрод**, який має прямий електричний контакт із рідким металом.

Математично коло контролю можна описати еквівалентною схемою заміщення, де повний опір вимірювального кола визначається як паралельно-послідовне з'єднання активних і ємнісних складових.

Коли рідкий метал проникає вглиб футерівки, товщина діелектричного шару зменшується, опір різко падає, а струм витoku зростає.

Напруга контрольного джерела (зазвичай це постійний струм напругою **30-60 В** або змінний низькочастотний струм).

При досягненні струмом заданої уставки, мікропроцесорна система миттєво знімає напругу живлення з індуктора і вмикає аварійну сигналізацію.

Порівняльний аналіз систем контролю зносу тигля

Метод контролю	Принцип дії	Переваги	Недоліки
Гальванічний (Подовий електрод)	Вимірювання струму витoku між розплавом та індуктором.	Висока надійність, швидка реакція, відносна простота реалізації.	Неможливість виявити локальні сухі тріщини (до заповнення їх металом), знос самого електрода.

Оптико-волоконний (Термічний)	Прокладання термостійкого оптоволокна навколо індуктора для вимірювання профілю температур.	Точна локалізація місця перегріву, виявлення проблем до проникнення металу.	Висока вартість, складність монтажу при заміні футерівки.
Електромагнітний (Імпедансний)	Аналіз зміни комплексної індуктивності котушки печі.	Відсутність прямого контакту з розплавом (немає подового електрода).	Сильний вплив властивостей шихти та рівня металу на точність, складна математична обробка.

Практичне значення досліджень

Проектування сучасної мікропроцесорної системи захисту дозволяє відійти від застарілих аналогових релейних схем, які часто давали хибні спрацьовування через потужні електромагнітні перешкоди від тиристорних перетворювачів частоти.

Застосування цифрової фільтрації сигналів та розрахунок динаміки зміни опору в реальному часі (градієнт падіння опору) дозволяє операторам-

плавильникам планувати заміну футерівки не за регламентом, а за її фактичним станом.

Це підвищує продуктивність печі та гарантує нульовий ризик пропалювання індуктора.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 1. Параметри ізоляційних матеріалів, що застосовуються в індукційних печах

1.1. Основні вимогами до матеріалів ізоляції індукторів

Основними вимогами до матеріалів ізоляції індукторів є висока механічна стійкість і підвищені електричні властивості при вібраціях 50 Гц і температурах до 250 ° С.

Електрична міцність матеріалів ізоляції визначається з формули:

$$U_{\text{исп}} = (2U + 1000) \text{ В}$$

де U – напруга індуктора.

Електрична ізоляція індуктора може бути наступних видів: повітряна ізоляція між витками, лакова ізоляція витків, обмотувальна ізоляція витків, прокладка із твердих ізоляційних матеріалів між витками, монолітна ізоляція витків.

У літературі [1] наводяться властивості застосовуваних електроізоляційних лаків, емалей та ізоляційних матеріалів індукційних печей.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 1	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Ларін В.О.						14	10
Перевірив	Сінчук О.М.							
Реценз.						КНУ ЕЕМ-23ск		
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.							

Таблиця 1.1. Електроізоляційні лаки та емалі

Матеріал	Теплостійкість по Мартенсу , °С	Питомий об'ємний опір, щонайменше Ом·см	Мінімально допустима електрична міцність за $f = 50$ Гц, кв.
Лаки			
ЕФ-5Т або КО-946	250	1×10^{14}	6
К-44	200	1×10^{13}	28
К-47 або КО-947	200	1×10^{15}	30
Б-55; КО921	250	1×10^{13}	25
КО 87	300	1×10^{14}	20
КО 88 та КО 89	500	1×10^{13}	10
До 65	250	1×10^{14}	10
Емаль КО 911	250	1×10^{13}	10

Таблиця 1.2. Ізоляційні матеріали індукційних печей

№ пп	Найменування	Тип	Розривне навантаження на 30 мм ширини, КМС	Межа міцності , кгс /мм ²	Питомий об'ємний опір, Ом см	Напруга пробою, кВ
1	Склотканина	ЛСК СЕ	110	6	1×10^{14}	4,5
2	Склострічка	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	18–23	-	-	4,5
3	Асболента	50	-	-	-	-
4	Асбестова тканина	АТ-3	-	-	-	4,5
5	Текстоліт	А, В4	-	600	1×10^{10}	6
6	Асбоцементна прокладка	-	-	570	1×10^{10}	6
7	Склотекстоліт	СТК-41	-	1800	1×10^{13}	18

1.2. Визначення залежностей питомого опору матеріалів, що застосовуються для ізоляції індукторів від температури

З метою визначення залежностей питомого опору матеріалів, що застосовуються для ізоляції індукторів від температури, були виконані випробування матеріалів, що застосовуються для ізоляції індукторів, індукційних плавильних печей ІЛТ-6.

Електропровідність матеріалів характеризується величиною питомого опору чи питомої провідності.

У разі високих температур провідність ізоляційних матеріалів різко збільшується.

У звичайних умовах через випробувані матеріали під дією прикладеної до них постійної напруги протікають струм, що має дві складові.

- струм поверхневої провідності обумовлений обложеною вологою на поверхні матеріалу,
- струм, що проходить через обсяг матеріалу - струм об'ємної провідності.

Таким чином, еквівалентна розрахункова схема зразка повинна складатися з двох з'єднаних паралельно опорів.

Перше враховує струми поверхневої провідності; друге - струми об'ємної провідності.

Однак, враховуючи, що в даному випадку інтерес представляє залежність питомого опору ізоляційного матеріалу від температури понад 100 ° С, можна не враховувати складову і отже.

Вимірювання опорів ізоляційних матеріалів індуктора проводилося на зразках, що мають товщину, рівну товщині тих самих матеріалів у реальних умовах при експлуатації печі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Площа поверхні випробуваного матеріалу становила 75 см².

Для надійного контакту поверхні випробуваного матеріалу з електродами, як яких застосовувалася мідна фольга, створювався тиск на поверхні, що контактують, за допомогою вантажу вагою 1 кг.

Зразок спільно з електродами поміщався в лабораторну піч СШОЛ - 2,5 кВ. Вимірювання величини опору проводилося за допомогою мегомметра М 1101.

Крім цього здійснювався контроль температури в печі за допомогою платино -платинородієвої термопари спільно з мілівольтметром типу М252 (рис. 1.1).

Результати вимірювань наведено у табл. 1.3.

Для визначення залежності питомого опору комплексної ізоляції індуктора від температури були проведені вимірювання зазначеного опору на моделі відрізка трубки індуктора з намотаною ізоляцією при площі поверхні, що контактується (як усередині так і зовні), що дорівнює 75 см².

Розподіл ізоляції по шарах був такий: перший шар - слюдопластоленту; другий і третій шари - мікаленти , четвертий - склотканина.

Для зовнішнього електрода використовувалася мідна фольга.

Результати вимірювань наведено до 1 м² ізоляції та представлені у вигляді табл. 2.5 та графіка рис . 1.2.

Критичне значення опору ізоляції індуктора, у якому має спрацювати захист відповідає значенню 500 Ом .

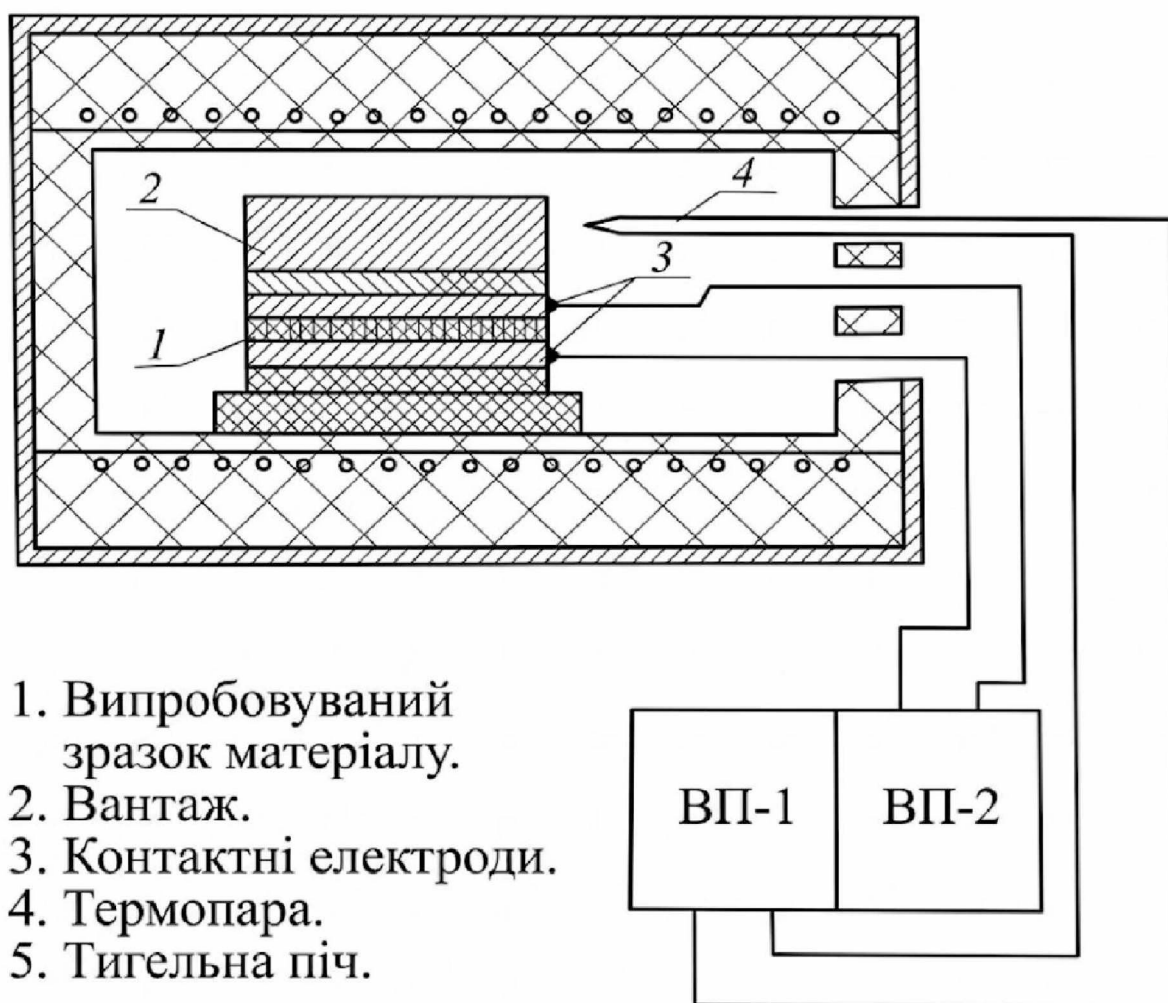


Рис. 1.1. Схема установки для вимірювання питомих опорів

1 - випробуваний зразок матеріалу; 2 - вантаж; 3 - контактні електроди;
 4 - термопара; 5 - тигельна піч; ВП-1, ВП-2 – вимірювальні прилади.

Таблиця 1.3. Результати вимірювань опорів матеріалів, що застосовуються для ізоляції індукторів при підвищених температурах (Опір 1 м² ізоляційних матеріалів, ком)

°C	Склотканина 2 шари (2-х шарів - 0,3 мм)	Мікалента 1, 2 шари - 0,32 мм , ЛМ466-0,13	Мікалента 2, 2 шари - 0,32 мм	Слюдопластолента ЛС54-6Б, 2 шари - 0,3 мм	Азбест δ = 6 мм
0	120	337	450 до	262	1,3
60°	-	262	-	187	-
100 °	52,5	150	750 до	225	-
140 °	-	113	-	337	-
170 °	187	-	750 до	-	0,6
205°	-	-	-	-	-
250°	-	750	-	337	3,75
285°	37,5	750	1500	262	-
340°	-	-	-	-	120
350°	37,5	-	150	-	-
395°	-	18,7	-	90	-
400°	-	-	150	-	300

Продовження табл . 1.3

°C	(3) Мікалента 1	(4) Мікалента 2	(5) Слюдопластолента	(6) Азбест	(7) Склотканина
460°	-37,5	-	52,5	-	-
470°	-	7,5	-	52,5	225
530°	15 до	-	1,5	-	-
550°	-	0,3	-	22,5	150
580°	15	0,236	0,337	-	-
600°	-	-	-	7,5	-
620°	-	-	0	-	75
640°	-	-	0	-	-
660°	-	-	0	0,15	45
670°	-	-	0	-	-
680°	1,13	-	0	0,03	-
705°	0,075	-	0	-	-
730°	0,011	-	0	0,03	15
780°	-	-	0	-	8 до

(К - значення, відмічені індексом "К").

Таблиця 1.4. Результати вимірювань опорів ізоляційних матеріалів для обмотки індуктора

№ пп	°С	Спр . 1 м ² обмотки індуктора, ком	№ пп	°С	Спр . 1 м ² обмотки індуктора, ком
1	0	360	17	375	108
2	100	360	18	405	144
3	205	3,6	19	420	50,3
4	230	10,8	20	450	18
5	230	3,6	21	460	7,2
6	240	72	22	460	3,6
7	245	144	23	500	1,44
8	250	252	24	510	0,72
9	260	503	25	540	0,14
10	265	7,20	26	550	0,072
11	290	720	27	600	0,043
12	290	790	28	620	0,029
13	320	432	29	640	0,029
14	330	360	30	650	0,0108
15	340	288	31	690	0
16	340	144			

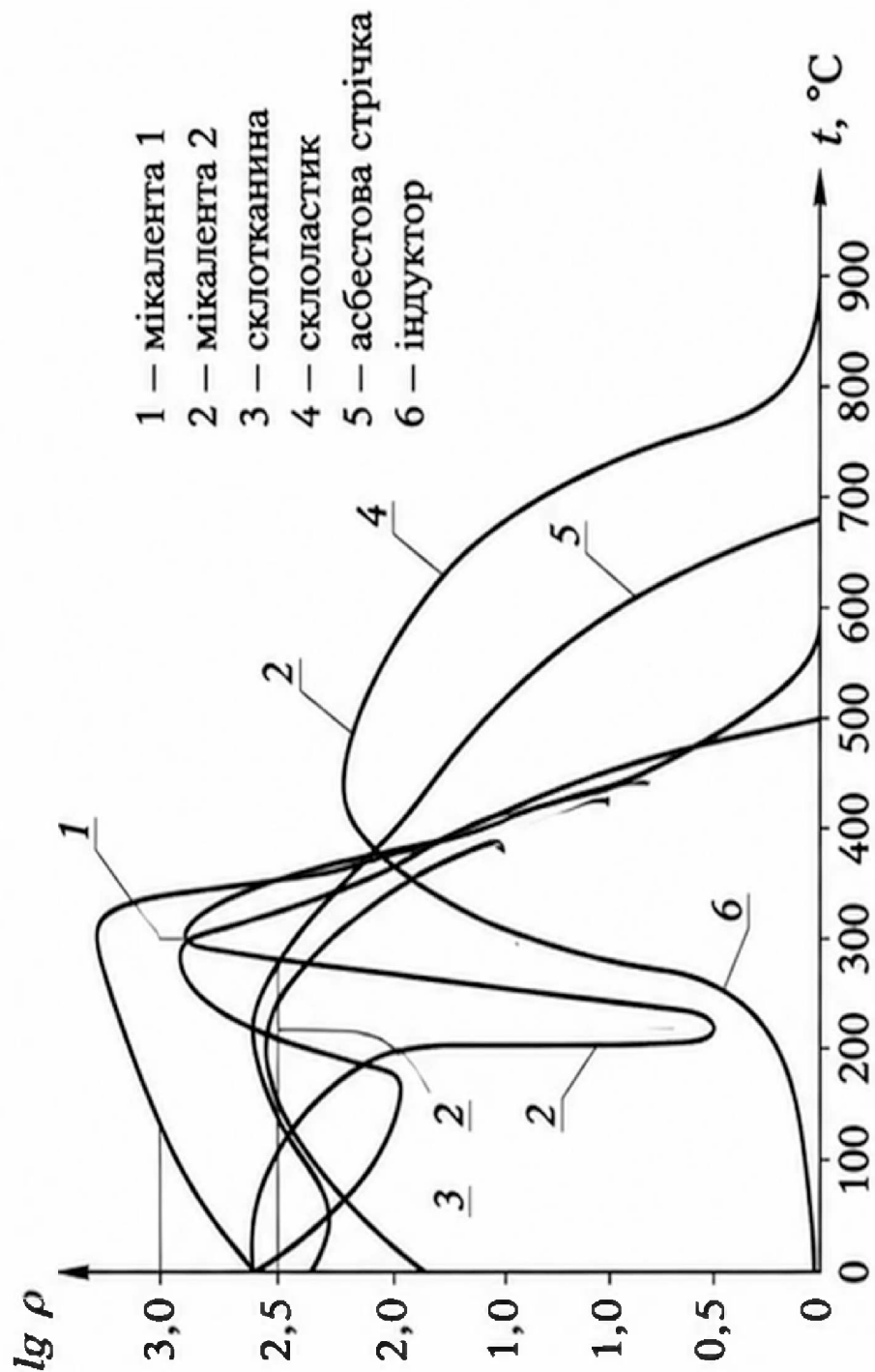


Рис. 1.2. Залежність питомого опору ізоляційних матеріалів індуктора від температури

1 - мікаленту 1; 2 - мікаленту 2; 3 - склотканина; 4 - склопластострічка ; 5 - азбест; 6 - обмотка індуктора. (По осі абсцис - t , °C ; по осі ординат - $\lg \rho$).

Розділ 2. Розробка сигналізатора пошкодження тигля і ізоляції індуктора

2.1. Способи безперервного контролю стану тигля індукційної печі

В даний час найбільш поширеним способом безперервного контролю стану тигля індукційної печі є непрямий спосіб визначення товщини стінки, заснований на вимірі опору тигля постійного оперативного струму [1, 2].

Як електроди, що служать для вимірювання опору тигля використовують розплавлений метал, що знаходиться всередині тигля, сітчастий електрод, що прокладається по зовнішній поверхні тигля (між двома шарами ізоляції) та обмотку індуктора.

При цьому електроди підключають до джерела оперативного струму через послідовно включені чутливий елемент, що реагує на величину струму, що показує прилад, і пробку фільтр для змінного струму, що захищає оперативний ланцюг від силового змінного струму (напруга силового ланцюга досягає значень вище 1000 В).

У практиці роботи з індукційними печами іноді застосовують метод визначення стану тигля, що ґрунтується на контролі енергетичних показників роботи печі [4].

При значному зносі тигля внаслідок його розмиття обсяг металу збільшується, що знижує еквівалентний опір навантаження, веде до зростання споживаної потужності та зміни коефіцієнта потужності печі.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив	Ларін В.О.				Розділ 2	Літ.	Лист
Перевірів	Сінчук О.М.						24
Реценз.							8
Н. Контр.	Сінчук О.М.					КНУ ЕЕМ-23ск	
Затвердив	Пересунько І.І.						

Однак, такий метод не можна вважати ефективним, оскільки ці ж показники визначаються і завантаженням печі, крім того, захист заснований на такому методі не здатна виявити вихід металу до індуктора з появою тріщин у тиглі, наприклад, у початковий період кампанії.

Найбільш прийнятним методом контролю цілості тигля, що зарекомендував себе на практиці, є метод заснований на вимірі постійного оперативного струму, що проходить через стінку тигля.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Вимірювальна частина сигналізатора стану тигля

Аналогічно можна контролювати стан ізоляції індуктора.

Вимірювальна частина сигналізатора стану тигля, що реалізує зазначений спосіб контролю може бути представлена послідовно включеними елементами: реле - Р; дроселем - Др ; міліамперметром - мА і вимірюваним опором $R_{\text{изм}}$ (рис. 2.1 а). Причому величини опорів реле, дроселя, міліамперметра доцільно підсумувати і подати у вигляді внутрішнього опору $R_{\text{вн}}$ схеми заміщення сигналізатора, рис. 2.1 б.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

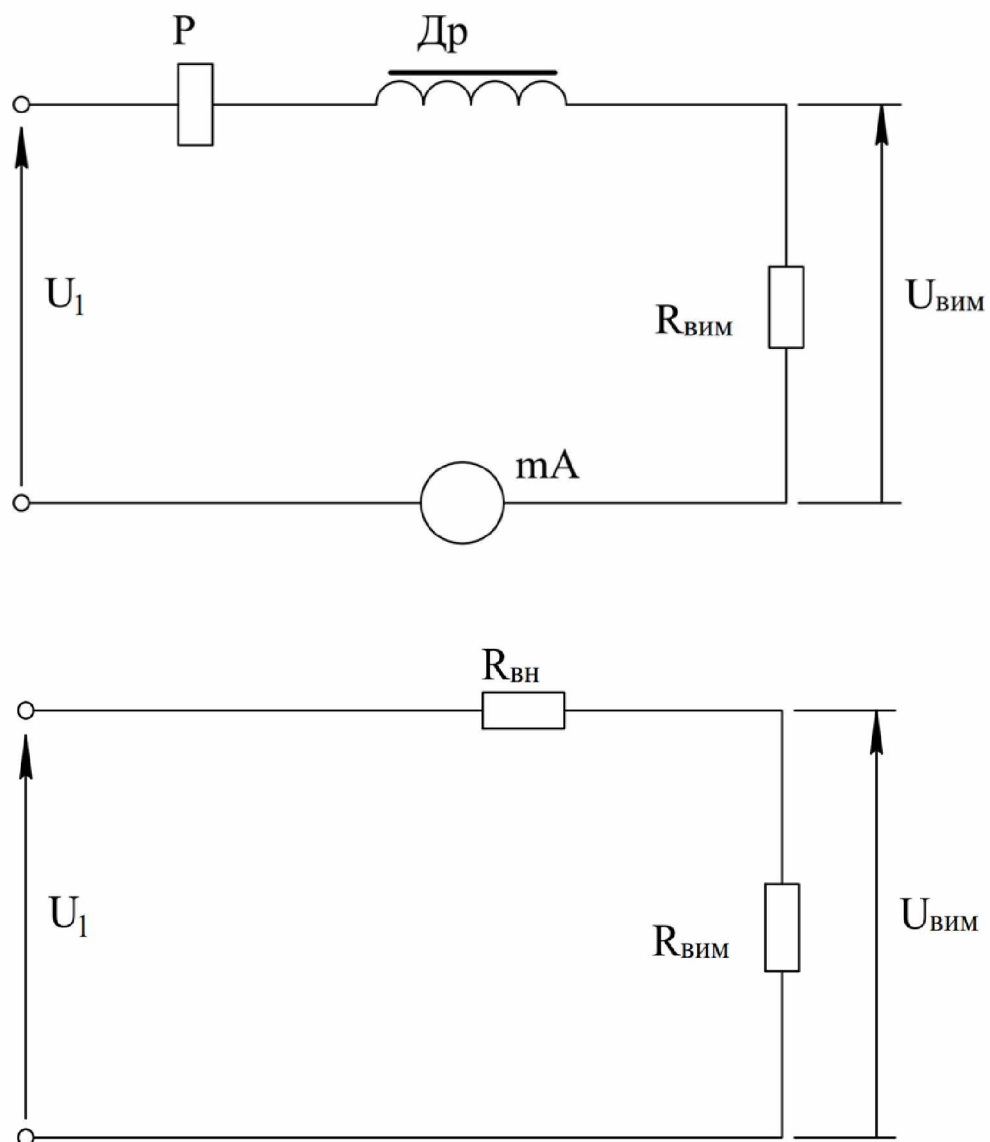


Рис. 2.1. Схема вимірювання опору футерування

а) важлива схема; б) схема заміщення. (Позначення: P — реле; Dr — дросель; mA — міліамперметр; $R_{изм}$ — опір, що вимірюється; $R_{вн}$ — внутрішній опір; U_1 — напруга живлення; $U_{изм}$ — напруга, що вимірюється).

Для оцінки якісних показників такої схеми при різних параметрах - напрузі живлення і внутрішньому опорі, зручно скористатися коефіцієнтом чутливості схеми K_c , представивши його ставленням зміни струму ΔI_y вимірювальному ланцюгу до зміни контрольованого опору $\Delta R_{\text{изм}}$:

$$K_c = \frac{\Delta I \cdot 10^3}{\Delta R_{\text{изм}}} \left(\frac{\text{мА}}{\text{Ом}} \right) \quad (2.1)$$

Причому ΔI є різниця струмів I' і I'' , знайдених відповідно при вимірюваних опорах $R'_{\text{изм}}$ і $R''_{\text{изм}}$.

Величину $R'_{\text{изм}}$ прирівнюємо опору уставки приладу, на 20% більше, тобто:

$$\left. \begin{aligned} R'_{\text{изм}} &= R_{\text{уст}} \\ R''_{\text{изм}} &= 1,2 R_{\text{уст}} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

При цьому ми отримуємо можливість оцінити чутливість схеми у зоні спрацьовування сигналізатора (захисту).

Відповідно до схеми заміщення, рис. 2.1 б, збільшення струму в зоні спрацьовування захисту:

$$\Delta I = I' - I'' = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{вн}} + R'_{\text{изм}}} - \frac{U_{\text{пит}}}{R_{\text{вн}} + R''_{\text{изм}}} = U_{\text{пит}} \frac{\Delta R_{\text{изм}}}{R_{\text{вн}}^2 + R'_{\text{изм}} R_{\text{вн}} + R''_{\text{изм}} R_{\text{вн}} + R'_{\text{изм}} R''_{\text{изм}}} \quad (2.3)$$

де $R_{\text{вн}} = R_{\text{др}} + R_{\text{р}} + R_{\text{мА}}$ - Внутрішній опір схеми, що включає опір дроселя $R_{\text{др}}$, опір реле $R_{\text{р}}$ і опір вимірювального приладу $R_{\text{мА}}$.

А коефіцієнт чутливості схеми :

$$K_c = \frac{U_{\text{пит}} \cdot 10^3}{R_{\text{вн}}^2 + R'_{\text{изм}} R_{\text{вн}} + R''_{\text{изм}} R_{\text{вн}} + R'_{\text{изм}} R''_{\text{изм}}} \quad (2.4)$$

Розрахункові криві коефіцієнта чутливості схеми для ланцюга «сітка-метал», що має порівняно невисоку уставку і відповідно вимагає більш чутливого захисту наведено на рис. 2.2.

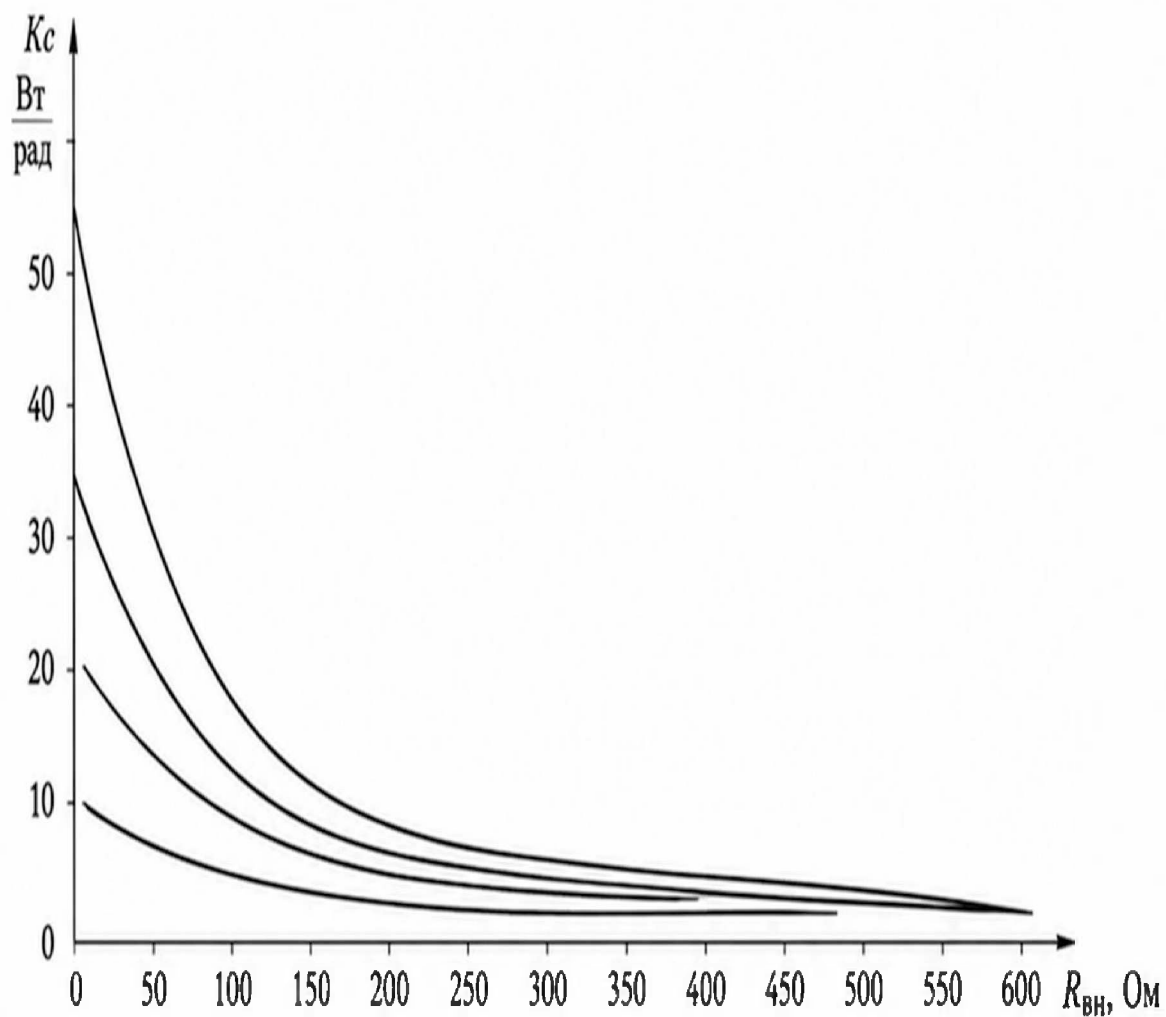


Рис. 2.2. Залежність чутливості схеми від внутрішнього опору (по осі абсцис - $R_{вн}$, Ом; по осі ординат - K_c , мА/Ом). Криві 1, 2, 3, 4 розраховані при стабільних напругах живлення 10, 20, 30, 40 Ст.

Аналіз розрахункових кривих показує, що чутливість схеми (рис. 2.1 а) прямо пропорційна напрузі живлення і обернено пропорційна внутрішньому опору схеми.

Для розробки сигналізатора доцільно проаналізувати існуючі схеми та намітити шляхи їх удосконалення.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3. Схеми контролю стану тигля та ізоляції індуктора

3.1. Застосування методів контролю стану футерування

Найбільш проста схема, яка контролює стан тигля, наведена на рис. 3.1 а, застосовується на заводі «Армаліт» (м. Запоріжжя).

У ній контролюється опір «Індуктор-метал», що складається із суми опорів - тигля, прокладки азбесту між тиглем та індуктором, ізоляції індуктора.

Оскільки опір футерування тигля в десятки разів менший за інші, точність контролю стану тигля знижується і практично зводиться до вимірювання опору ізоляції індуктора та азбестової прокладки.

Сигналізатор спрацьовує лише при виході металу до індуктора, що супроводжується перегріванням ізоляції.

У зв'язку з цим схема такого сигналізатора не може вважатися ефективною і може використовуватися лише для додаткового контролю ізоляції індуктора.

Контроль цілісності тигля в донній частині, який відсутній у попередній схемі, іноді здійснюють шляхом встановлення спеціальної електрод-сітки, пов'язаної з індуктором, на постійну подину та нижню котушку індуктора, рис. 3.1 б.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Ларін В.О.				Розділ 3	Літ.	Лист	Листів
Перевірів	Сінчук О.М.						32	3
Реценз.								
Н. Контр.	Сінчук О.М.							
Затвердив	Пересунько І.І.					КНУ ЕЕМ-23ск		

Такий сигналізатор експлуатується на заводі «Водоприлад».

Тут як сітка застосовується вогнестійка металізована тканина, що електрично зв'язується з середньою точкою індуктора.

Захисні характеристики такої схеми краще, ніж попередньої, оскільки сигналізатор спрацьовує при наближенні металу до сітки, захищаючи нижню котушку і сигналізує про прохід металу через подину (хоча це мало ймовірно).

Підключення сигналізатора до середньої точки індуктора знижує вдвічі найбільшу величину змінної напруги вимірювальної частини схеми.

Спільний контроль опорів «сітка-метал» та «індуктор-метал» за схемою рис. 3.1 б має деякі недоліки:

1. Уставка спрацьовування для ланцюга сітки та індуктора приймається однаковою, хоча ці опори відрізняються на порядок.
2. Знижується чутливість захисту, оскільки на тлі сумарного витоку важче виділити струм ушкодження.
3. Без розбирання схеми не можна визначити область пошкодження (на сітку чи індуктор).

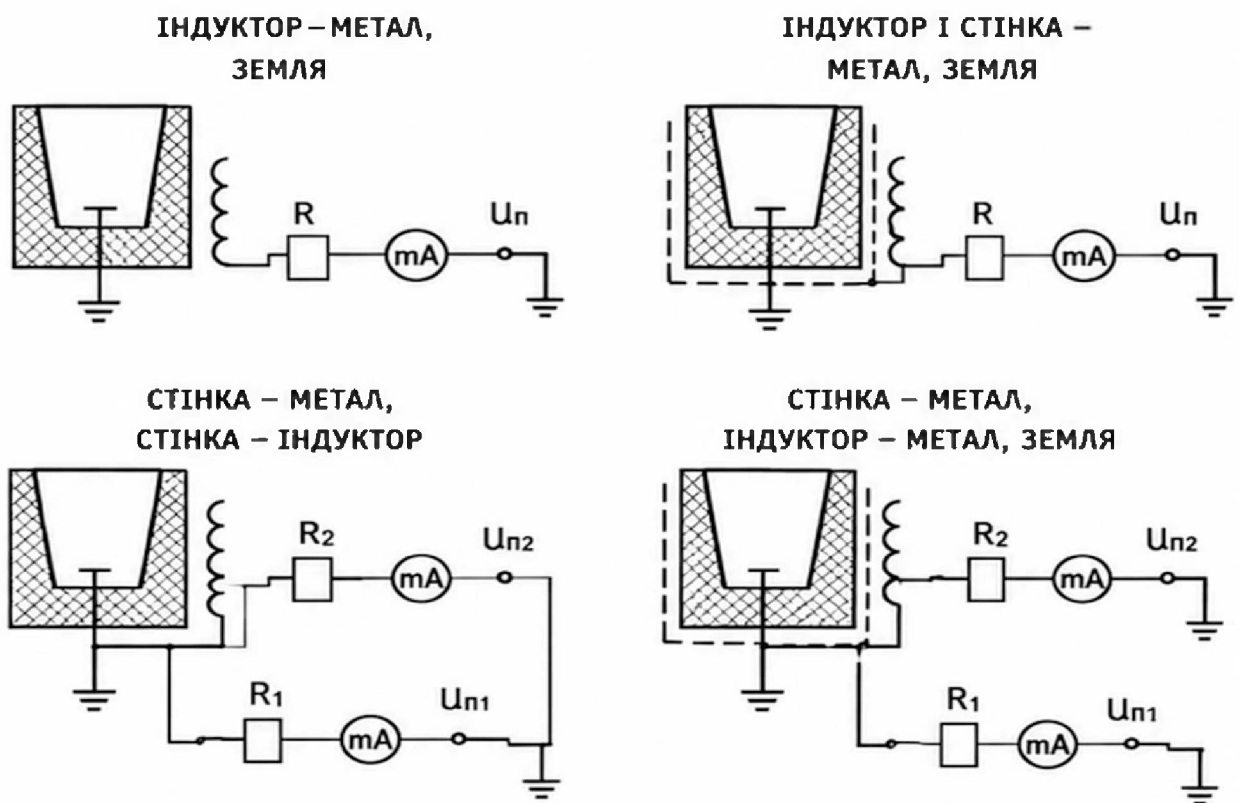


Рис. 3.1. Застосування методів контролю стану футерування (схеми контролю ланцюгів: «індуктор-метал, земля»; «сітка-метал, земля»; «сітка-метал, індуктор»).

Більш раціональні схеми з роздільним контролем опору тигля та ізоляції індуктора (рис. 3.1 в, г), що забезпечують більш надійну роботу сигналізатора і вимагають меншого часу для визначення характеру і місця пошкодження.

3.2. Застосування методів роздільного контролю опорів між розплавленим металом та сіткою, закладеною між індуктором та тиглем, а також між сіткою та індуктором

Одним із варіантів цих схем є сигналізатор АСЧВ-1, який застосовувався на рудоремонтному заводі (м. Кривий Ріг) (рис. 3.2).

Схема передбачає роздільний контроль опорів між розплавленим металом та сіткою, закладеною між індуктором та тиглем, а також між сіткою та індуктором.

При зниженні будь-якого з цих опорів до встановлених меж спрацьовує сигналізація та відключається живлення індуктора.

Живлення пристрою здійснюється від стабілізатора СН.

Опір $2R$ шунтується перемикачем 2УП при нормальному стані тигля і входить у ланцюг при зниженні опору тигля, що відповідає «загрубленому» режиму роботи.

Живлення контрольних реле РПТ (контроль опору тигля) та РАС (контроль ізоляції між сіткою та індуктором) регулюється потенціометрами $1R$, $4R$.

Регулювання уставок захисту здійснюється зміною напруги живлення контрольних реле та налаштуванням чутливості самих реле.

Скидання аварійного сигналу при випадкових спрацьовуваннях здійснюється кнопкою КУ.

Дослідженнями [2], встановлено, що сигналізатор АСЧВ має високий внутрішній опір (результуюче значення близько 1000 Ом).

За низького контрольованого опору (50–250 Ом) захист має низьку чутливість.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Чутливість схеми відповідно до (2.4):

$$K_c = 0,036 \frac{\text{мА}}{\text{Ом}}$$

Для контролю справності тигля ($R_{\text{уст}} = 750\text{Ом}$) при оперативному напрузі 42 В.

Низька надійність роботи сигналізатора АСЧВ визначилася також недосконалістю конструктивних рішень висновків та підключень елементів схеми до електродів (сітки, металу, індуктора).

Відомі сигналізатори, що використовують вищеописаний принцип контролю стану тигля шляхом вимірювання величини струму через його стінку і в зарубіжній практиці.

Так шведська фірма ASEA оснащує піч, що випускається LED -12 сигналізатором, в якому оперативний постійний струм пропускається через стінку тигля по ланцюгу індуктор-метал, а чутливий елемент захисту - реле підключається паралельно первинній стороні трансформатора, що живить випрямляч оперативного ланцюга.

Збільшення оперативного струму призводить до зниження повного опору трансформатора і відповідно до перерозподілу напруг у первинному ланцюгу і на чутливому елементі — реле, викликаючи його спрацювання [1].

Однак така схема контролює в основному опір ізоляції індуктора, має високий внутрішній опір, що знижує чутливість і не може бути визнана досконалим засобом контролю стану тигля.

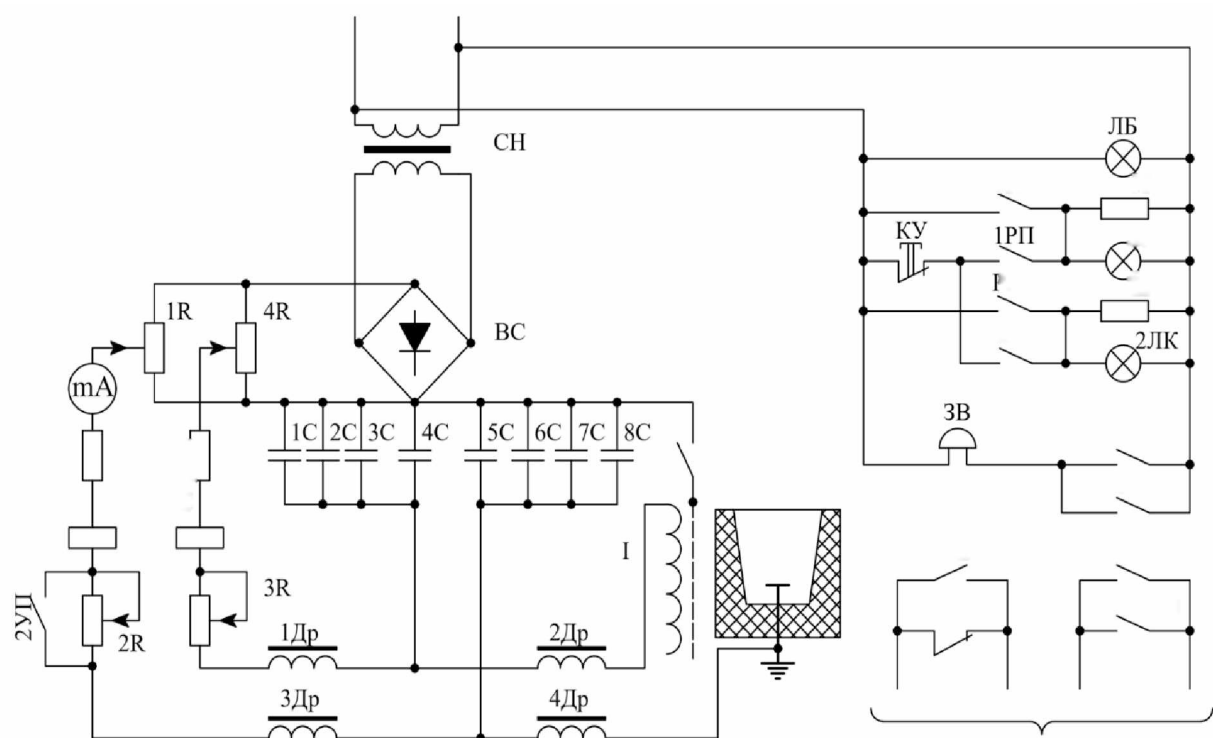


Рис. 3.4. Схема сигналізатора АСЧВ-1

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09

Арк.

37

Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Провести аналіз фізико-хімічних та термодинамічних процесів, що призводять до деградації, ерозії та розтріскування вогнетривкої футерівки індукційних тигельних печей (ІТП).

Провести комплексний аналіз фізико-хімічних та термомеханічних факторів, що спричиняють локальний або рівномірний знос (ерозію) вогнетривкого тигля під час плавки різних типів металів.

Дослідити існуючі методи контролю зносу тигля (електричні, теплові, оптичні, електромагнітні) та обґрунтувати вибір оптимального методу для конкретних умов плавки.

Дослідити недоліки традиційних систем контролю зносу (сигнальних сіток-антен) та виявити причини їхніх хибних спрацьовувань або відмов у критичних ситуаціях.

Розробити математичну модель електричного кола "індуктор – футерівка – розплав – подовий електрод" для точного розрахунку струмів витоку в нормальних та аварійних режимах.

Розробити модернізовану просторову структуру сигнальної системи, розділивши контрольні електроди на ізольовані зони для точної локалізації місця стоншення футеровки (наприклад, по висоті та периметру тигля).

Спроектувати апаратну частину системи захисту (генератор контрольної напруги, вимірювальні шунти, фільтри перешкод від тиристорного перетворювача) та розробити алгоритм фільтрації хибних спрацьовувань.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Створити алгоритм безперервного вимірювання комплексного електричного опору (імпедансу) між розплавом та сигнальною сіткою, який здатен відфільтровувати наведені електромагнітні завади від потужного змінного поля індуктора.

Запропонувати критерії дворівневої сигналізації: "Попередження" (стоншення футерівки) та "Аварія" (критичне наближення розплаву до індуктора).

Розробити логіку автоматичного аварійного захисту, яка забезпечить миттєве зняття напруги з індуктора та подачу світлозвукової сигналізації персоналу в разі фіксації критичного падіння опору ізоляційного шару.

Сформулювати рекомендації щодо інтеграції розробленої системи в загальну автоматизовану систему управління технологічним процесом (АСУ ТП) ливарного цеху.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаних джерел

1. Muhlbauer, A. (2008). History of Induction Heating and Melting. Vulkan-Verlag GmbH.
2. Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. (2017). Handbook of Induction Heating (2nd ed.). CRC Press.
3. Baukal Jr, C. E. (Ed.). (2013). Industrial Burners Handbook. CRC Press. (Містить загальні відомості щодо промислової безпеки плавильних агрегатів).
4. Lupi, S., Forzan, M., & Alifirov, A. (2014). Induction and Direct Resistance Heating: Theory and Numerical Modeling. Springer.
5. Robles, G., Martinez-Tarifa, J. M., & Rojas-Moreno, M. V. (2015). Condition monitoring of refractory linings in induction furnaces. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(8), 5032-5039.
6. Bose, B. K. (2006). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends. Academic Press. (Контекст перешкод від перетворювачів частоти).
7. Rowe, C. N. (1998). Earth leakage protection of coreless induction furnaces. Foundry Trade Journal, 172, 34-36.
8. Kennedy, C. (2003). Crucible induction furnace safety. Modern Casting, 93(10), 38-41.
9. Zinoviev, G. S. (2010). Fundamentals of Power Electronics. NSTU.
10. Sumpena, S., & Widodo, P. (2018). Design of leakage current detector on induction furnace based on microcontroller. International Journal of Applied Engineering Research, 13(10), 8345-8350.
11. Bollen, M. H. J. (2000). Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. IEC 60519-3:2005. Safety in electroheating installations - Part 3: Particular requirements for induction and conduction heating and induction melting installations. International Electrotechnical Commission.

13. Muhlbauer, A. (2008). History of Induction Heating and Melting. Vulkan-Verlag.

14. Lupi, S., Forzan, M., & Aliferov, A. (2014). Induction and Direct Resistance Heating: Theory and Numerical Modeling. Springer.

15. Rudnev, V., Loveless, D., & Cook, R. L. (2017). Handbook of Induction Heating (2nd ed.). CRC Press.

16. Totev, J. (2013). Refractory lining of coreless induction furnaces. Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 48(4), 415-420.

17. Robledo, R., & Gutierrez, J. (2011). Diagnostics and monitoring of refractory wear in metallurgical furnaces. Iron and Steel Technology, 8(5), 72-81.

18. Standard NFPA 86:2019. Standard for Ovens and Furnaces. National Fire Protection Association.

19. Kondratiev, A., & Pleshivtseva, Y. (2018). Optimal control of melting process in induction coreless furnaces. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, 37(1), 32-44.

20. Sadowski, T., & Golewski, P. (2013). Multidisciplinary analysis of the operational temperature range of an induction furnace crucible. Computational Materials Science, 68, 57-65.

21. Nikanorov, A., & Njegic, A. (2015). Advanced safety systems for coreless induction furnaces. Foundry Trade Journal, 189(3730), 22-26.

22. Sampaio, R., & Tavares, J. (2016). Sensor networks for predictive maintenance of refractory linings. Sensors, 16(11), 1850-1865.

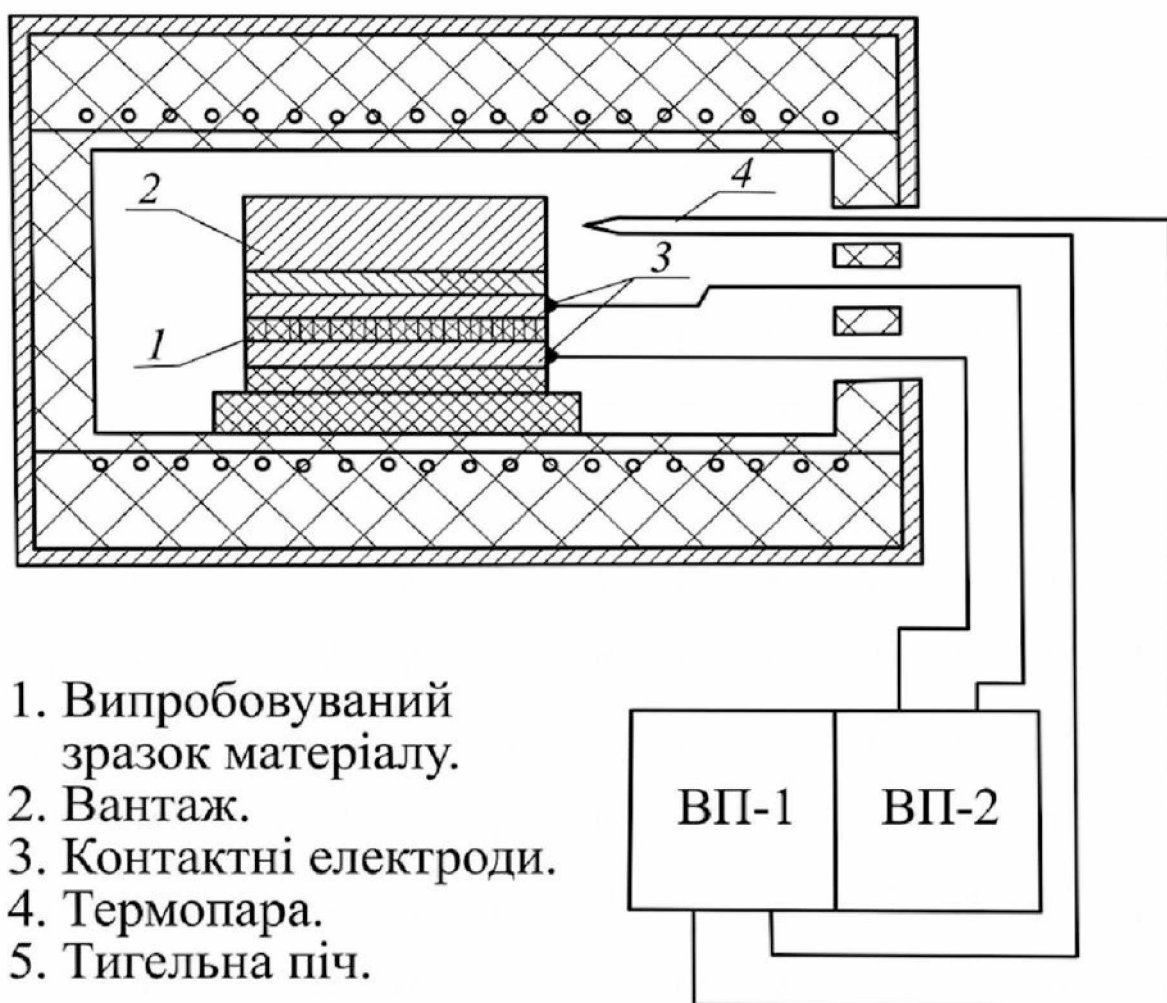
					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

23. Chen, X., & Wang, Y. (2019). Online monitoring of induction furnace crucible wear based on impedance spectroscopy. *Measurement*, 134, 301-309.
24. Golkar, M. A. (2007). Analysis of electrical parameters of coreless induction melting furnaces. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(4), 2188-2195.
25. Brown, J. R. (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. Butterworth-Heinemann.
26. Zolotarev, V. (2012). Safety operation principles of medium frequency induction furnaces. *Metallurgy and Foundry Engineering*, 38(2), 145-152.
27. Ali, M., & Das, A. (2020). Predictive modeling of refractory wear in steelmaking using machine learning algorithms. *Ironmaking & Steelmaking*, 47(8), 891-902.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Схема установки для вимірювання питомих опорів

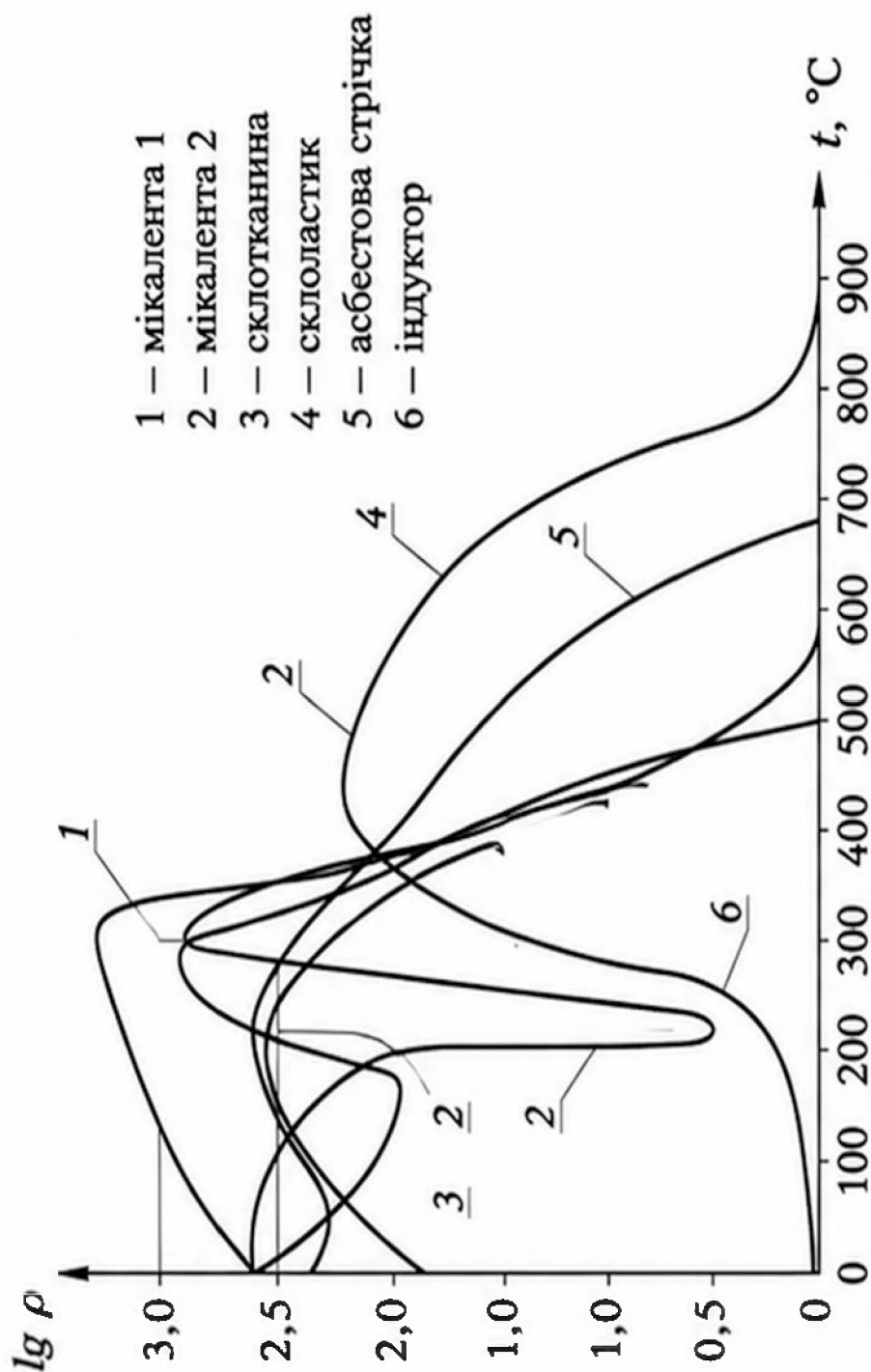
1 - випробуваний зразок матеріалу; 2 - вантаж; 3 - контактні електроди;
4 - термопара; 5 - тигельна піч; ІП-1, ІП-2 – вимірювальні прилади.



Додаток Б

Залежність питомого опору ізоляційних матеріалів індуктора від температури

1 - мікаленту 1; 2 - мікаленту 2; 3 - склотканина; 4 - склопластострічка ;
5 - азбест; 6 - обмотка індуктора. (По осі абсцис - t , °C ; по осі ординат - $\lg \rho$).



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

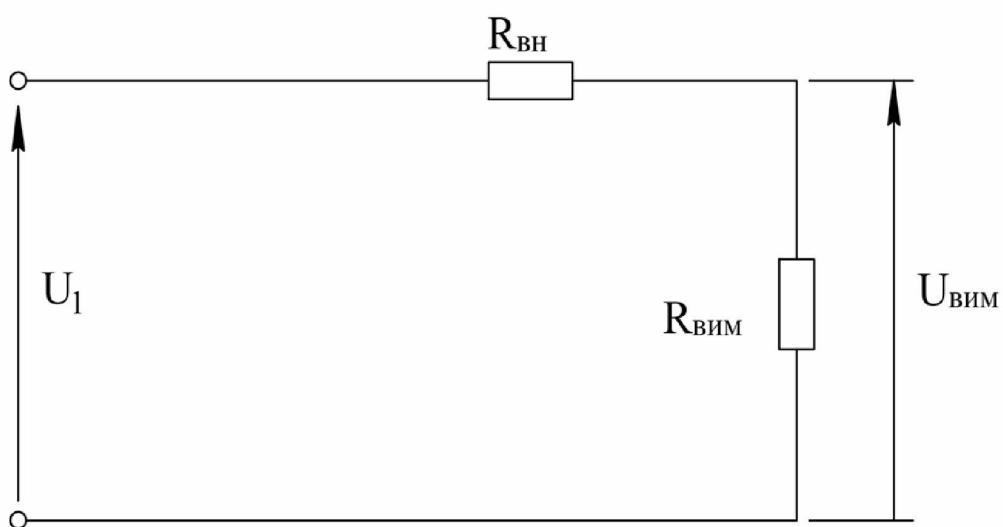
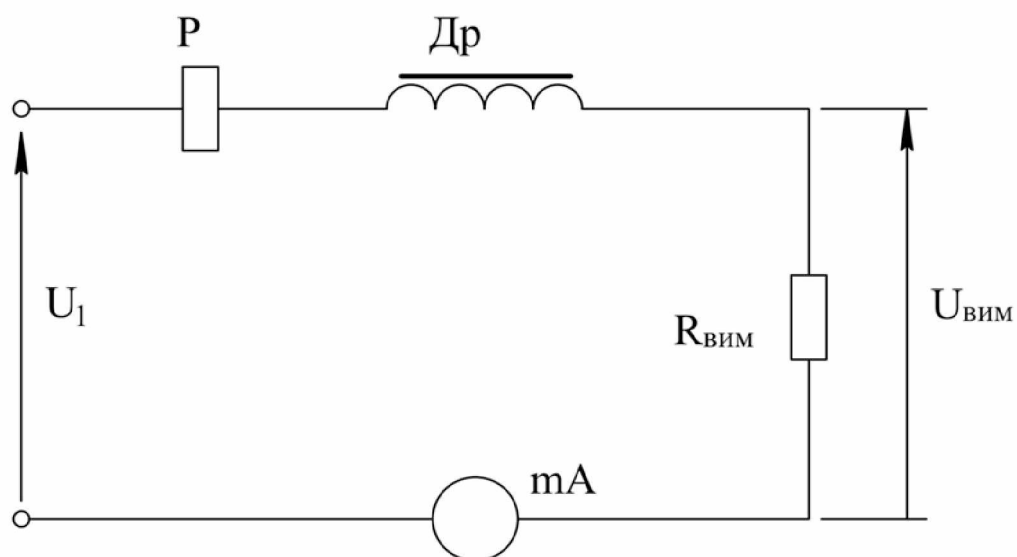
ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.250-09

Арк.

44

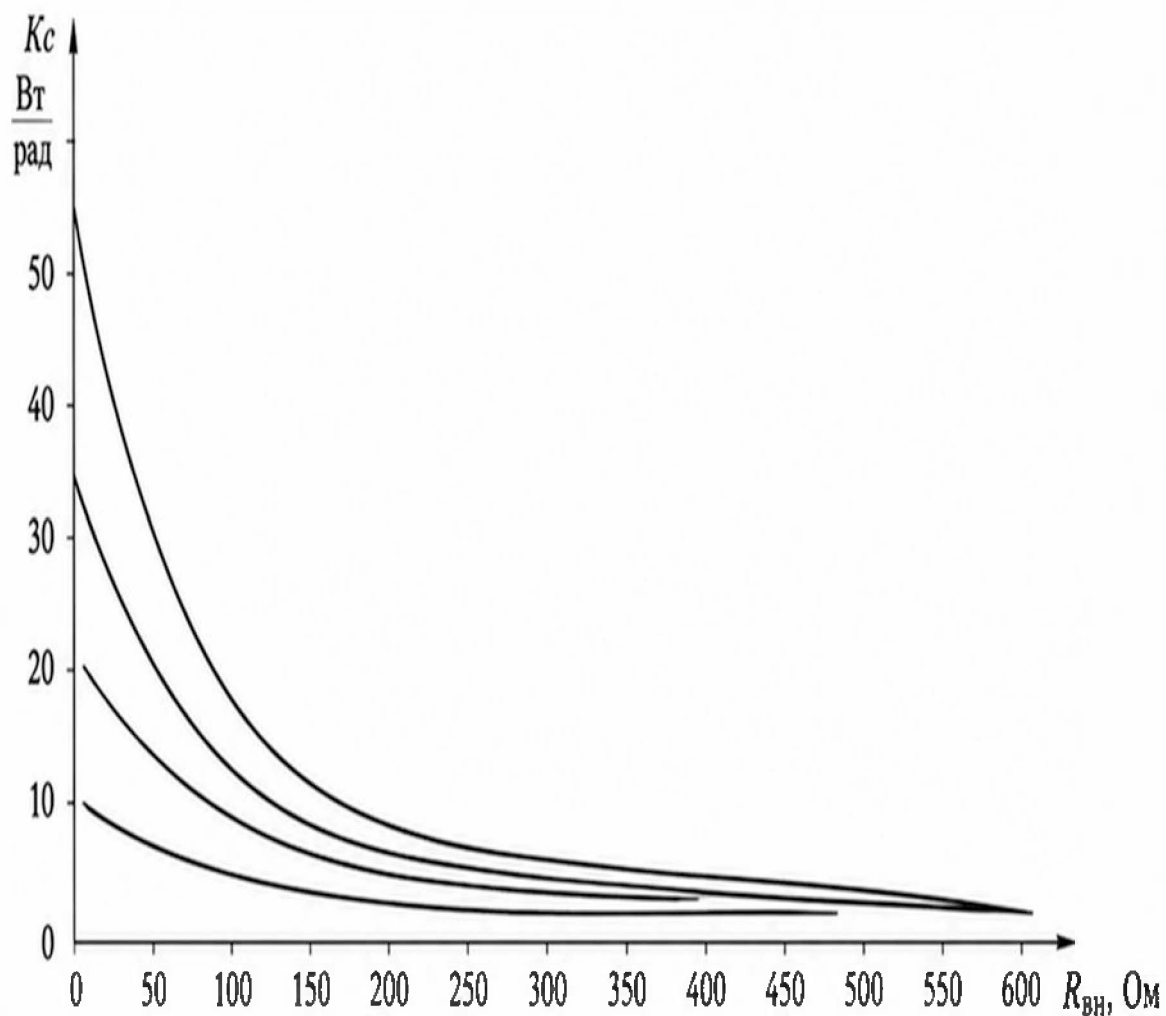
Схема вимірювання опору футерування

а) важлива схема; б) схема заміщення. (Позначення: Р — реле; Др — дросель; мА — міліамперметр; $R_{\text{изм}}$ — опір, що вимірюється; $R_{\text{вн}}$ — внутрішній опір; U_1 — напруга живлення; $U_{\text{вим}}$ — напруга, що вимірюється).



Додаток Г

Залежність чутливості схеми від внутрішнього опору (по осі абсцис - $R_{вн}$, Ом; по осі ординат - K_c , мА/Ом). Криві 1, 2, 3, 4 розраховані при стабільних напругах живлення 10, 20, 30, 40 Ст.



Застосування методів контролю стану футерування (схеми контролю ланцюгів: «індуктор-метал, земля»; «сітка-метал, земля»; «сітка-метал, індуктор»).

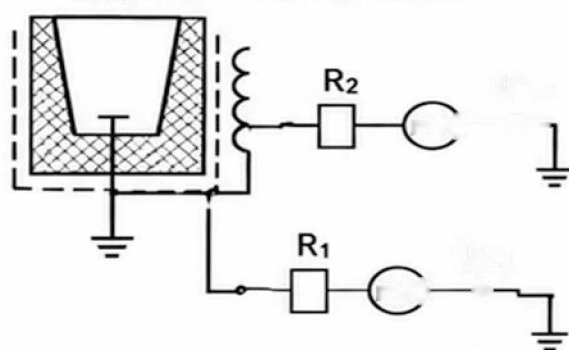
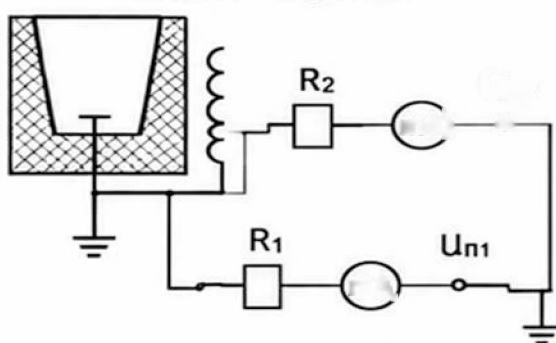
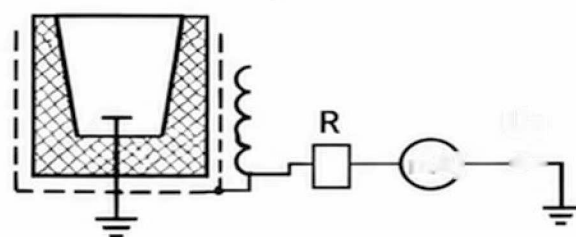
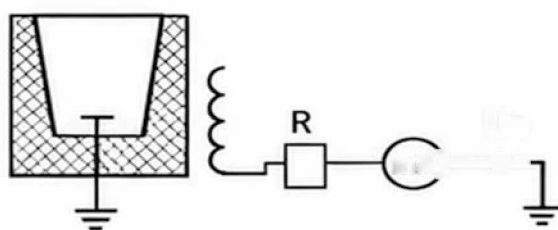


Схема сигналізатора АСЧВ-1

