МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-енергетичний факультет

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Електротехнології в агропромисловому комплексі

методичні рекомендації

для виконання лабораторних робіт
здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти
ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв
2023

УДК 621.31:631.3
Е50

Рекомендовано до друку науково-методичною комісією Інженерноенергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету (протокол № 8 від 30.03.2023 р.).

Укладачі:

Бацуровська І.В. – д-р. пед. наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Грубань В. А. – канд. техн. наук, доцент кафедри тракторів та сільськогосподарських машин, експлуатації та технічного сервісу, Миколаївський національний аграрний університет.

Ставинський А. А. – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний аграрний університет, 2023

1. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

Лабораторна робота – це форма навчального заняття, при якому студентпід керівництвом викладача особисто проводить натурні або імітаційні е ксперименти з метою практичного підтвердження окремих теоретичних п оложень навчальної дисципліни. При цьому він набуває навичок у роботі з л абораторним устаткуванням, обладнанням, обчислювальною технікою, в імірювальною апаратурою, методикою експериментальних досліджень у конкретній галузі.

Лабораторні роботи завжди виконуються після вивчення певного розділу (чи розділів) теоретичного курсу, оскільки вони є практичним підтвердженнямтеоретичних положень і висновків. Крім того, лабораторні заняття п рищеплюють любов до предмета і сприяють розвитку навичок, які п отрібні для практичної і винахідницької діяльності.

Лабораторні роботи відіграють важливу роль у підготовці фахівців черезсамостійну виконавчу діяльність. Виконуючи лабораторну роботу, студенти повинні проявляти ініціативу в подоланні труднощів. Звертатися до в икладача лише тоді, коли вичерпано всі можливості вирішення питань по виконанню окремого етапу лабораторної роботи.

Дидактичні цілі проведення лабораторних робіт:

− опанування методами експериментальних досліджень (обробка результатів дослідів);
− формування відчуття спеціалізованої техніки та оволодіння специфікою практичної роботи;
− набуття навичок з безпеки проведення експериментальних досліджень;
− узагальнення, систематизація та поглиблення теоретичного матеріалу завдяки його практичному застосуванню;
− формування умінь застосовувати отримані знання в практичній діяльності, формування компетенцій;
− розвиток аналітичних та проектувальних вмінь;
− вироблення самостійності, відповідальності і творчої ініціативи.

Отримані на понятійно-аналітичному рівні уміння та навички є суттєвим компонентом компетенції фахівця. Тематика лабораторних робіт визначається робочою програмою дисципліни.

Студентам потрібно самим вибрати спосіб виконання лабораторної роботи. Роботи, що носять пошуковий характер, відрізняються тим, що студентиповинні вирішити нову для них проблему, спираючись на наявні у них теоретичні знання.

Лабораторні заняття проводяться в спеціально обладнаних навчальних лабораторіях з використанням спеціального устаткування. В окремих випадках лабораторні заняття можуть проводитися в умовах реального професійного середовища.

Лабораторні роботи здебільшого належать до класу «жорстких», що виконуються згідно із заздалегідь підготовленим планом. Такі заняття мають на меті придбання та закріплення базових знань, відповідних умінь та навичок за в ідомим алгоритмом. Заняття передбачають активність студентів, але н авчальні цілі обмежені відсутністю творчості студентів.

При організації підготовки до лабораторних робіт і їх виконання особливу увагу необхідно приділяти техніці безпеки.

Студент під час проведення лабораторних робіт повинен:

− беззаперечно дотримуватись правил охорони праці;

− ознайомитись з методичними рекомендаціями щодо проведення лабораторних робіт;

− виконати лабораторну роботу за відповідною методикою;

− скласти звіт про виконання лабораторної роботи;

− захистити результати лабораторної роботи;

− одержати оцінку за лабораторну роботу через визначену форму контролю.

Викладач повинен:

− провести інструктаж студентів щодо правил безпеки;

− керувати проведення лабораторної роботи;

− здійснити поточний контроль опанування студентами методичних рекомендацій;

− забезпечити дотримування правил безпеки при виконанні лабораторної роботи;

− скласти графік консультацій;

− оцінити навчальну діяльність студента у процесі виконання лабораторної
роботи.

У ході проведення лабораторного заняття викладач зобов’язаний забезпечити якісне виконання завдань, спрямувати студентів на творчий пошук.

Результати вимірювань та спостережень, отримані в процесі виконання лабораторної роботи, частково опрацьовують на поточному занятті, а остаточно – на аудиторних самостійних заняттях під керівництвом викладача. Тому, студенти при собі повинні мати обчислювальну техніку, засоби для креслення електричних схем і побудови графіків тощо. На заключному етапі складається звіт про виконану лабораторну роботу.

Правила з техніки безпеки під час виконання лабораторнихробіт у лабораторії електронагрівання та електротехнологій

Під час виконання лабораторних робіт необхідно точно виконувати правила техніки безпеки. На першому лабораторному занятті викладач проводить інструктаж з техніки безпеки, під час якого в загальних рисах характеризує основне обладнання лабораторії і більш докладно – об’єкти, які являють собою велику небезпеку. При цьому особливу увагу приділяють установкам з напругою понад 1000 В і установкам, які мають конденсатори значної ємності. Увага студентів звертається на те, що багато електронагрівальних установок є небезпечними не тільки через можливість ураження електричним струмом, але й отримання променевих та контактних опіків.

Студенти повинні бути ознайомлені зі схемою електроживлення робочих місць, розміщенням апаратури для відключення живлення всієї лабораторії, місцями знаходження вогнегасників і засобів виклику 101 і 103. Крім того, студенти мають дотримуватись основних правил з техніки безпеки під час експлуатації електроустановок:

⇒ вмикати складну схему установки, яка підлягає випробуванню, можна лише після дозволу керівника занять і, переконавшись у тому, що жоден з оточуючих не може потрапити під напругу;

⇒ при кожному вмиканні установки під напругу попереджувати оточуючих словом “вмикаю”;

⇒ забороняється виконувати будь-які зміни в електричних колах установки під напругою, якщо це не передбачено програмою роботи;

⇒ при появі будь-яких ознак ненормальної роботи обладнання (дим, запах гару, іскріння, підвищений шум тощо) слід негайно вимкнути

живлення установки і повідомити про це керівника занять. Без дозволу викладача повторне вмикання установки не дозволяється.

Після проведення інструктажу всі студенти розписуються в спеціальному журналі і після цього несуть особисту відповідальність за дотримання правил з техніки безпеки та збереження обладнання лабораторії.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

Дослідження відкритих нагрівальних елементів

Мета роботи: дослідження залежності усталеної температури нагрівальних елементів від їх конструкції та умов охолодження. Визначення коефіцієнтів монтажу і середовища.

Загальні відомості

Одним з основних факторів, які обумовлюють термін служби нагрівальних елементів, є температура, при якій вони працюють тривалий час. При підвищенні робочої температури поверхня нагрівача інтенсивно окислюється, зменшуються його живий переріз і потужність, яка виділяється, знижується термін служби.

Для кожного матеріалу встановлено максимально допустиму робочу температуру, починаючи з якої різко посилюється процес окислення. Так, максимально допустима робоча температура для сталевого оцинкованого дроту становить 300 ^{o}C, ніхрому – 1100 ^{o}C.

Згідно з теорією нагрівання однорідного тіла процес нагрівання елементів струмом, який проходить через них, описується рівнянням:

$$\tau = \tau_y \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad , \qquad (1.1)$$

де τ – перевищення температури нагрівача над температурою навколишнього середовища (перегрівання) в момент часу *t;*

τ_o – початкове перегрівання елемента;

τ_y – усталене перевищення температури нагрівача над температурою навколишнього середовища;

T – стала часу нагрівання елемента;

t – час проходження струму.

В усталеному режимі кількість теплоти Q, що виділяється струмом в елементі за одну секунду, дорівнює кількості теплоти, яка віддається ним в навколишнє середовище за той самий період часу:

$$Q = \tau_y A, \qquad (1.2)$$

де A – тепловіддача нагрівача в навколишнє середовище за одну секунду при різниці температур нагрівача і середовища 1 ^oC, кДж/(с·^oC).

Оскільки кількість теплоти, яка виділяється в нагрівачі, пропорційна потужності, що підводиться до нього $(Q \equiv P)$, то усталене перевищення температури нагрівального елемента $\tau_y = Q/A$ залежить від потужності, яка до нього підводиться, і тепловіддачі з його поверхні. Тепловіддача нагрівального елемента залежить від його конструкції (прямий дріт; дротяна спіраль без каркаса; дріт, який накручений на ізоляційний каркас тощо) та умов навколишнього середовища (нерухоме повітря, потік повітря, вода, молоко тощо).

Аналітичне визначення τ_y досить складне. Під час розрахунку нагрівальних елементів величину τ_y визначають за експериментальною залежністю $\tau_y = f(I)$, яка досліджується для різних перерізів дроту нагрівача. В літературі наводяться криві $\tau_y = f(I)$ (або таблиці) для нагрівача, що має вигляд прямого дроту, розміщеного горизонтально в спокійному повітряному середовищі з температурою 20 ^oC. Для нагрівачів іншої конструкції (спіраль без каркаса, дріт, який накручений на керамічний каркас тощо) або для тих, що працюють в інших умовах (в потоці повітря, у воді тощо), усталене перевищення температури також можна визначити за цими ж кривими $\tau_y = f(I)$. А вплив конструкції нагрівального елемента та навколишнього середовища на усталену температуру елемента τ_{yc} враховується відповідно коефіцієнтами монтажу $k_м$ і середовища k_c. У цьому випадку усталене перевищення температури визначається за формулою:

$$\tau_{yc} = \frac{\tau_{yд}}{k_м \cdot k_c}, \qquad (1.3)$$

де $\tau_{yд}$ – усталене перевищення температури прямого дроту, розміщеного в спокійному повітрі, ^oC.

Коефіцієнт монтажу $k_м$ характеризує погіршення умов тепловіддачі нагрівача порівняно з прямим дротом, розміщеним горизонтально, і дорівнює $k_м \leq 1$. Для дротяної спіралі без каркаса $k_м$=0,8...0,9, тому

усталена температура спіралі τ_{yc} більша температури нагрівача, що має вигляд прямого дроту при тій же силі струму.

Коефіцієнт середовища k_c характеризує покращення умов тепловіддачі нагрівача порівняно з нагрівачем, що розміщений у нерухомому повітряному середовищі, і дорівнює $k_c>1$.

Програма роботи

1. Ознайомитися з обладнанням робочого місця.
2. Дослідити і побудувати залежність усталеного перевищення температури від струму $\tau_{yo}=f(I)$ для нагрівальних елементів у вигляді прямого дроту і дротяної спіралі без каркаса в нерухомому повітрі.
3. Визначити коефіцієнти монтажу для дротяної спіралі без каркаса.
4. Дослідити і побудувати залежність усталеного перевищення температури від швидкості повітря $\tau_y=f(V)$ при $I=const$ для дротяної спіралі без каркаса.
5. Визначити коефіцієнти середовища при різних швидкостях повітряного потоку і побудувати залежність $k_c=f(V)$.

Методика виконання роботи

Нагрівальні елементи з ніхрому, що виготовлені у вигляді прямого дроту і дротяної спіралі без каркаса, вмикають за схемою рис. 1.1. Перевищення температури нагрівального елемента над температурою навколишнього середовища вимірюють за допомогою термопари, що приєднана до середини елемента, і магнітоелектричного мілівольтметра.

Під час дослідження залежності $\tau_y=f(I)$ різні температури нагрівача встановлюють автотрансформатором і при кожному значенні сили струму записують усталене перевищення температури нагрівача. При цьому силу струму в нагрівачі підтримують постійною доти, поки температура не досягне усталеного значення. Максимальна температура нагрівача при використанні термопар мідь-константан не повинна перевищувати 300 ^{o}C.

Результати дослідів заносять у табл.1.1.

1.1. Результати дослідів

I ,A	$\tau_{уд}$, ^{o}C	$\tau_{ус}$, ^{o}C	$k_м$

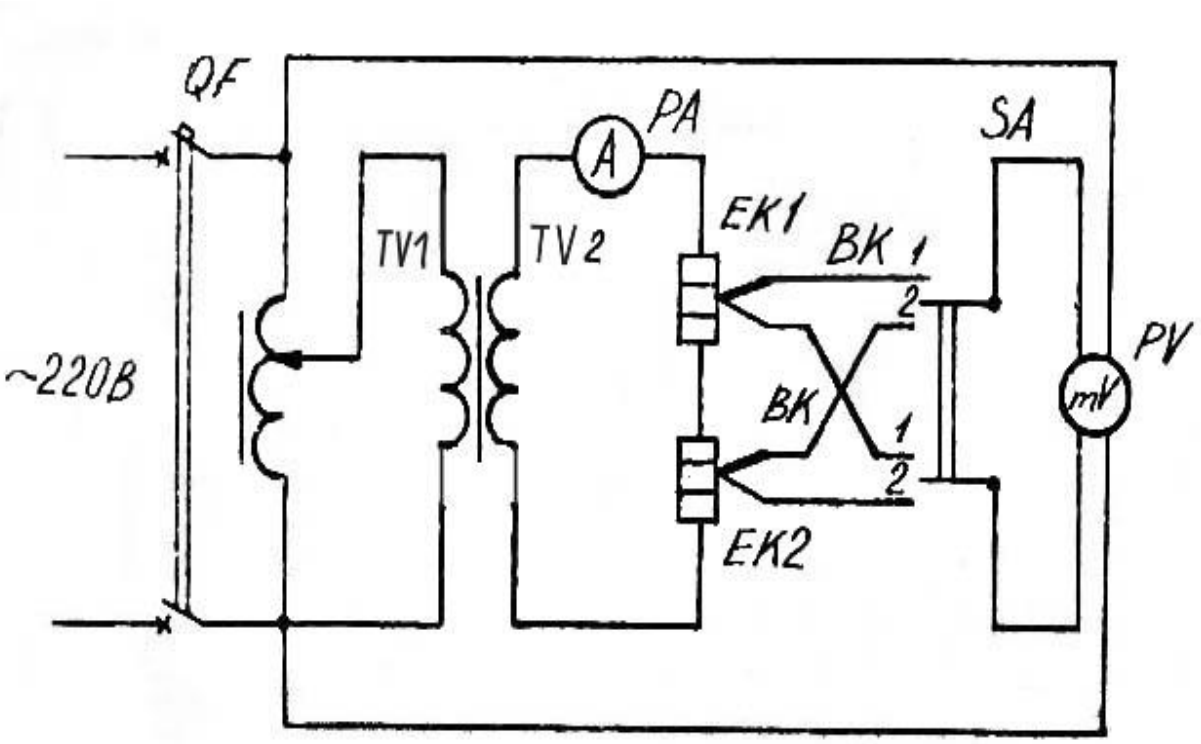


Рис 1. 1. Схема дослідження нагрівальних елементів

Коефіцієнт монтажу нагрівача, виконаного у вигляді спіралі без каркаса, визначають за виразом:

$$k_m = \frac{\tau_{уд}}{\tau_{ус}} \quad . \qquad (1.4)$$

Коефіцієнти $k_м$ обчислюють при різних струмах, після чого визначають їх середнє значення.

За отриманими даними будують залежності $\tau_{уд}=f(I)$ і $\tau_{ус}=f(I)$.

Для дослідження залежності $\tau_у=f(V)$ нагрівальний елемент встановлюють у повітропровід, який приєднаний до вентилятора. Останній приводиться в дію двигуном постійного струму за схемою генератор-двигун (рис.1.2), що дозволяє в широких межах змінювати швидкість повітря.

Швидкість повітря вимірюють анемометром або визначають за графіком (рис.1.3). При нерухомому вентиляторі підбирають такий струм нагрівача, щоб усталене перевищення температури його було 250 – 300 ^{o}C. Після цього, підтримуючи силу струму постійною, змінюють швидкість руху повітря від 1 до 5 м/с шляхом зміни напруги на якорі двигуна (рис.1.2). При кожному значенні швидкості повітря записують

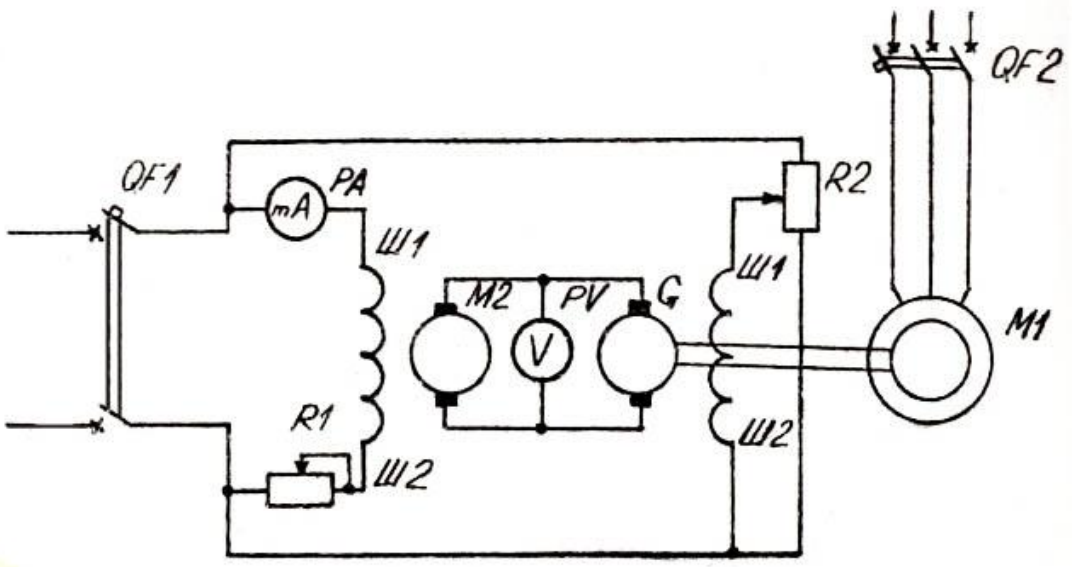


Рис 1. 2. Схема вмикання двигуна вентилятора

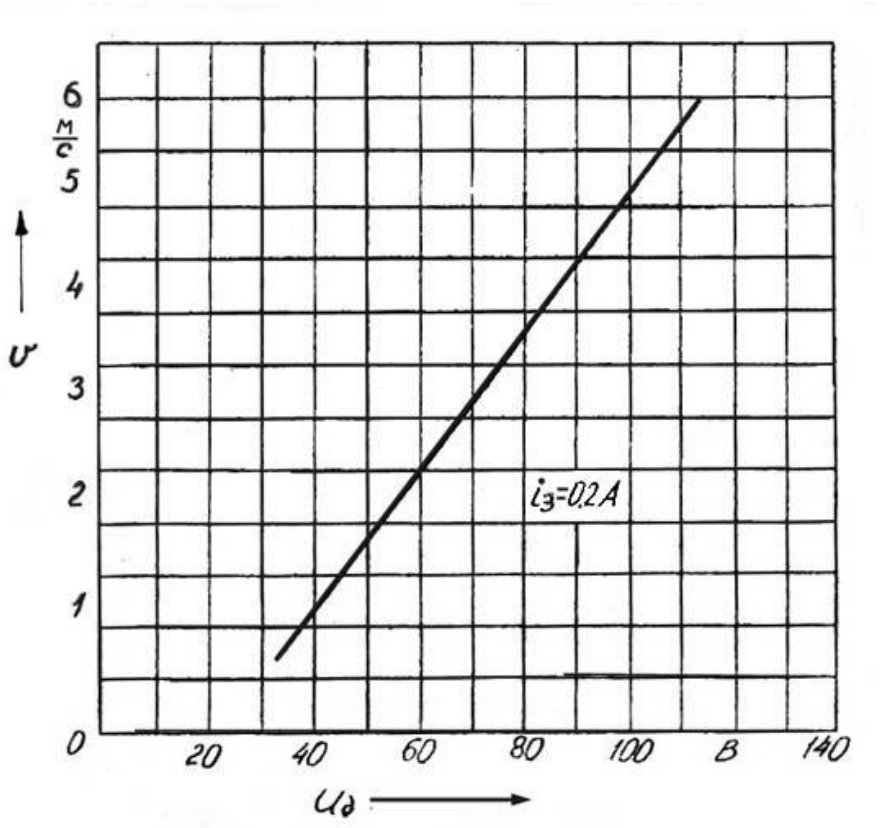


Рис 1. 3. Залежність швидкості повітря від напруги на якорі двигуна вентилятора

усталене значення перевищення температури нагрівача. Силу струму збудження двигуна підтримують постійною $I_з$=0,2 А.

Коефіцієнт середовища для різних швидкостей повітряного потоку визначають за виразом:

$$k_c = \frac{\tau_{yc}}{\tau_{yv}} \quad , \qquad (1.5)$$

де τ_{yc} і τ_{yv} – усталений перегрів нагрівача відповідно у спокійному повітрі і при заданій швидкості повітря, °С.

Результати дослідів і розрахунків заносять у табл.1.2.

1.2. Результати дослідів і розрахунків

$I_з$=

I , А	τ_{yc},°С	V , м/с	$U_я$, В	τ_{yv}, °С	k_c

За отриманими даними будують залежності $\tau_{yv}=f(V)$ та $k_c=\varphi(V)$.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електричні схеми.
3. Перелік обладнання і вимірювальних приладів.
4. Таблиці експериментальних і розрахункових даних .
5. Графіки залежностей $\tau_{yc}=\varphi(I)$, $\tau_{yv}=f(V)$, $k_c=\varphi(V)$, $\tau_{yд}=f(I)$.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Умова настання усталеної температури нагрівача.
2. За яким законом змінюється температура нагрівача при незмінній споживаній потужності?
3. Вплив робочої температури на термін служби нагрівача.
4. Для яких нагрівачів та умов середовища наведені криві (або таблиці) $\tau_y=f(I)$ у довідковій літературі?
5. Від чого залежить температура нагрівального елемента?
6. Що таке коефіцієнт монтажу $k_м$ і яка його фізична суть?
7. Що таке коефіцієнт середовища k_c і яка його фізична суть?
8. Що таке термопара? Як вона працює?

9. Практичне застосування коефіцієнтів монтажу $k_м$ і середовища $k_с$.
10. Переваги і недоліки відкритих нагрівальних елементів, у т.ч. із сталевого дроту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

Дослідження трубчастих електричних нагрівачів

Мета роботи: вивчення будови, правил монтажу та експлуатації трубчастих електронагрівачів (ТЕНів). Дослідження залежності температури ТЕНа від питомої потужності на поверхні трубки під час роботи в різних середовищах.

Загальні відомості

ТЕНи призначені для перетворення електричної енергії в теплову. Вони застосовуються як комплектуючі вироби у водонагрівачах, калориферах, інфрачервоних опромінювачах, побутових та інших електронагрівальних приладах. ТЕН складається з металевої трубки 1 (рис.2.1), всередину якої запресовано в наповнювачі 2 ніхромову спіраль 3. Кінці спіралі приєднані до вивідних шпильок 4, які служать для підключення нагрівача до мережі.

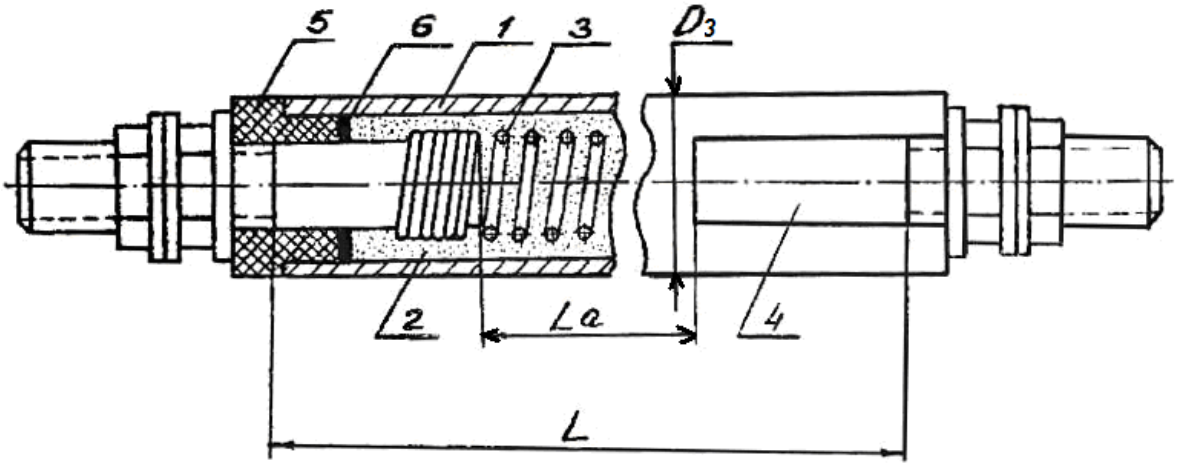


Рис.2.1. Розріз ТЕНа

Залежно від робочої температури і виду середовища, яке нагрівається, трубки електронагрівачів виготовляються з вуглецевої або нержавіючої сталі, латуні, міді та алюмінієвих сплавів.

Для збільшення поверхні тепловіддачі і зниження температури нагрівання ТЕНів, які встановлюються в опалювальних електрокалориферах, на трубку нагрівачів намотують на ребро алюмінієву стрічку, оскільки при температурі понад 180 ^{o}C відбувається суха сублімація пилу і повітря забруднюється продуктами згоряння.

Наповнювач повинен мати малу електропровідність (для ізоляції спіралі від трубки) і хорошу теплопровідність (для передачі тепла від спіралі до трубки). Такі властивості притаманні периклазу (плавлений окис магнію *MgO*), який використовується як наповнювач у ТЕНах.

Під час виготовлення ТЕНів після засипки наповнювача трубку під великим тиском опресовують, у результаті чого периклаз перетворюється на твердий моноліт і надійно фіксує та ізолює спіраль всередині трубки. Торці трубки герметизують вогнетривким кремнійорганічним герметиком та ізолюючими втулками. Оскільки опресовування трубки та її герметизація можливі лише в заводських умовах, то під час експлуатації доробка ТЕНів (розбирання, згинання з новим радіусом, приварювання і припаювання кріпильної арматури) забороняється.

Перевагою ТЕНів перед нагрівачами відкритого і захищеного типу є їх універсальність, надійність, довговічність і безпечність обслуговування. Оскільки спіраль ізольована від зовнішньої трубки, то ТЕНи можна розміщувати безпосередньо в середовище, яке буде нагріватися (вода, молоко, відвійки тощо). Внаслідок герметизації спіралі від повітря термін служби ТЕНів досягає 10000 год, вони ударовібростійкі.

ТЕНи виготовляються одиничною потужністю від 100 Вт до 25 кВт, довжиною від 250 до 6300 мм, із зовнішнім діаметром від 6,5 до 18,5 мм на номінальну напругу від 12 до 380 В в одно- і триелементному виконанні.

Основним параметром, який характеризує режим роботи ТЕНів, є питома потужність, яка вимірюється у Вт/см^2. Питома потужність залежить від умов роботи (середовища), матеріалу трубки і наповнювача (табл.2.1).

Робота ТЕНів допускається лише в тому середовищі, для якого вони призначені.

2.1. Параметри , які характеризують режим роботи ТЕНа

Умовне позначення нагрівного середовища	Нагрівне середовище	Характер нагрівання	Питома потуж-ність, Вт/см^2, не більше	Матеріал оболонки ТЕНа
1	2	3	4	5
X	Вода, слабкий розчин лугів і кислот (pH від 5 до 9)	Нагрівання, кип’ятіння з максимальною температурою на оболонці 100 °С	9,0	Мідь, латунь з покриттям
J	Вода, слабкий розчин кислот (pH від 5 до 7)	Те ж саме	15,0	Нержавіюча жаростійка сталь
P	Вода , слабкий розчин лугів (pH від 7 до 9)	----//----	15,0	Вуглецева сталь
Q	Вода, слабкий розчин кислот (pH від 7 до 9)	-----//----	9,5	Алюмінієві сплави
S	Повітря та інші гази і суміші газів	Нагрівання в спокійному газовому середовищі до робочої температури на оболонці ТЕНа 450 °С	2,2	Вуглецева сталь

Продовження табл. 2.1

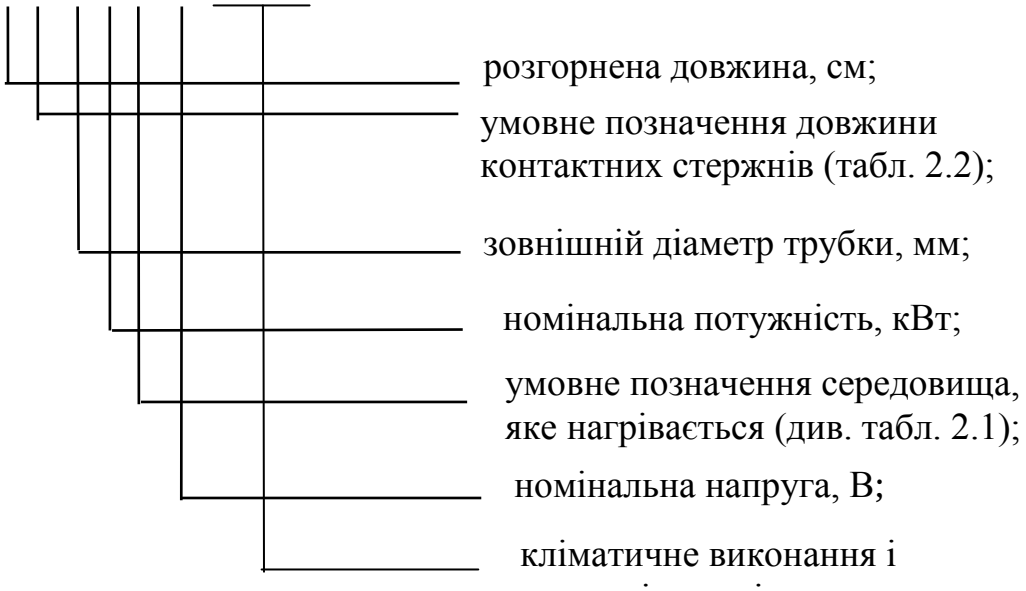
1	2	3	4	5
Т	Повітря та інщі гази і суміші газів	Нагрівання у спокійному газовому середовищі з температурою на оболонці ТЕНа більше 450 °С	5,0	Нержавіюча сталь
О	Те ж саме	Нагрівання у середовищі рухомого повітря (швидкість не менше 6 м/с) до робочої температури на оболонці ТЕНа 450 °С	5,5	Вуглецева сталь
К	----//----	Нагрівання у середовищі рухомого повітря (швидкість не менше 6 м/с) до робочої температури на оболонці ТЕНа 450 °С	6,5	Нержавіюча жаростійка сталь
R	----//----	Нагрівання у середовищі рухомого повітря (швидкість не менше 6 м/с) до робочої температури на оболонці ТЕНа 450 °С	3,5	Вуглецева сталь

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5
N	Повітря та інші гази і суміші газів	Нагрівання у середовищі рухомого повітря (швидкість не менше 6 м/с) з робочою температурою на оболонці ТЕНа 450 °С	5,1	Нержавіюча жаростійка сталь
Z	Жири, масла	Нагрівання у ваннах та інших місткостях	3,0	Вуглецева сталь

Умовне буквено-цифрове позначення трубчастого електронагрівача розшифровується так:

ТЕН-100А 13/2 Р220 УХЛ4



2.2. Лінійний розмір контактного стержня в заробці

Позначення контактного стержня	A	B	C	D	E	F	G	H
Довжина, мм	40	65	100	125	160	250	400	630

Опір ізоляції ТЕНа у холодному стані повинен бути не менше 1 МОм. Якщо він менше 1 МОм, але не нижче 0,1 МОм, то нагрівач необхідно просушити при температурі 100 – 120 ^{o}С протягом 4 – 5 год.

Програма роботи

1. Ознайомитися з будовою, правилами монтажу та експлуатації ТЕНів.
2. Виміряти опір ізоляції ТЕНів.
3. Дослідити залежність усталеного перевищення температури ТЕНа від питомої потужності на поверхні трубки $\tau_y=f(P_{num})$ під час роботи в такому середовищі:
   а) у нерухомому повітрі;
   б) у потоці повітря при швидкості 3 і 6 м/с;
   в) у воді.

Методика виконання роботи

Будову, правила монтажу та експлуатації ТЕНів вивчають за методичною розробкою та за розрізаним трубчастим нагрівачем на стенді.

Опір ізоляції ТЕНа вимірюють мегаомметром.

ТЕН, який досліджується, розрахований для роботи у воді при напрузі живлення 220 В. Тому, щоб не допустити перегрівання і виходу його з ладу під час дослідження залежності $\tau_y=f(P_{num})$ у повітряному середовищі, до нагрівача постійно підводять знижену напругу від автотрансформатора (рис.2.2). Вимірювання перевищення температури τ поверхні трубки ТЕНа над температурою навколишнього середовища виконують за допомогою термопари *ВК* і магнітоелектричного мілівольтметра *PV2*. Температура ТЕНа θ,°С, при цьому буде:

$$\theta=\tau+\theta_{OT}, \qquad (2.1)$$

де θ_{OT} – температура навколишнього середовища, °С.

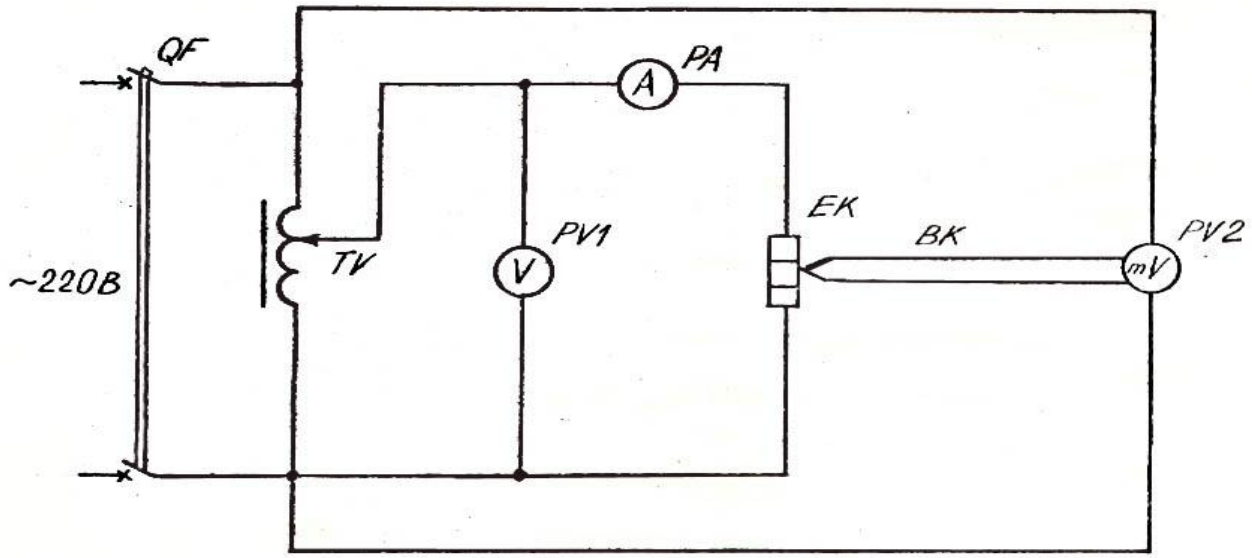


Рис 2.2. Схема дослідження ТЕНа

При цьому необхідно мати на увазі, що трубка досліджуваного ТЕНа виготовлена з алюмінієвого сплаву, гранична температура нагрівання якого не повинна перевищувати 250 ^{o}C.

Для дослідження залежності $\tau_y=f(P_{пит})$ у рухомому повітрі і воді нагрівач встановлюють по черзі в повітропроводі вентилятора і в бачку з водою. Регулювання і вимірювання швидкості повітря у повітропроводі виконуються так, як і в лабораторній роботі 1.

Під час дослідження залежностей $\tau_y=f(P_{пит})$ силу струму підтримують постійною доти, поки температура на поверхні трубки ТЕНа не досягне усталеного значення θ_y , і отримують, як мінімум, по 5 точок для кожного досліджуваного середовища.

Питома потужність на поверхні трубки ТЕНа, Вт/см^2, визначається за формулою:

$$P_{пит}=P/F_{ба}\text{ ,} \qquad (2.2)$$

де P – потужність, споживана ТЕНом, Вт;

$F_{ба}$ – площа бічної поверхні активної частини ТЕНа, см^2.

Площу бічної поверхні ТЕНа розраховують за формулою:

$$F_{ба}=\pi D_з L_a\text{ ,} \qquad (2.3)$$

де $D_з$ – зовнішній діаметр трубки ТЕНа, см;

L_a – активна довжина ТЕНа (в розгорнутому вигляді), см.

Результати дослідів і розрахунків заносять у табл.2.3.

2.3. Результати дослідів і розрахунків

$F_{ба}$= $\theta_{ОТ}$=

Середовище, що нагрівається	U, В	I, А	P, Вт	$P_{пит}$, Вт/см^2	θ_y, °С

За отриманими даними будують залежності $\theta_y=f(P_{пит})$ для ТЕНа, який працює в нерухомому повітрі та в рухомому повітрі при швидкості останнього 3 і 6 м/с, і у воді.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Ескіз ТЕНа .
3. Електрична схема.
4. Перелік обладнання і вимірювальних приладів.
5. Таблиця експериментальних і розрахункових даних.
6. Графіки залежностей $\theta_y=f(P_{пит})$.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Переваги герметичних нагрівальних елементів (ТЕНів).
2. Конструкція трубчастих нагрівальних елементів (ТЕНів).
3. Матеріали, які застосовуються для виготовлення ТЕНів.
4. Призначення і вимоги до матеріалу наповнювача.
5. Призначення оребрення ТЕНів.
6. Структура умовного позначення ТЕНів.
7. Поняття питомої поверхневої потужності ТЕНа та його практичне значення.
8. Нормоване значення опору ізоляції ТЕНа та спосіб його підвищення.
9. Що необхідно знати перед вмиканням ТЕНа в мережу?
10. Чи можна ТЕН-100Д13/2Р220 використовувати для нагрівання повітря тваринницького приміщення і чому?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

Визначення питомого опору води і розрахунок основних параметрів електродного водонагрівача

Мета роботи: освоїти методику визначення питомого опору води і розрахунку електродних водонагрівачів.

Загальні відомості

Всі матеріали за їх електрофізичним властивостями поділяються на провідники і діелектрики. Хімічно чиста вода (дистильована) електричний струм не проводить, тобто є діелектриком. Природна вода із звичайних джерел містить у собі домішки солей, лугів і кислот, які, дисоціюючи на іони, надають їй іонну провідність. Таким чином, природна вода – провідник другого роду.

Мірою електропровідності є питома електрична провідність σ, яка має розмірність См/м (сіменс на метр). Величина, обернена питомій електропровідності, є питомим електричним опором, що має розмірність Ом·м:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \ . \qquad (3.1)$$

Таким чином, електропровідність води може характеризуватися або питомою електропровідністю, або оберненою величиною - питомим опором.

На електропровідність води, крім її хімічного складу, впливає температура. Залежність питомої електропровідності води від температури має такий вигляд:

$$\sigma_\theta = \sigma_{20} \cdot [1 + \alpha_\sigma \cdot (\theta - 20)] \quad , \qquad (3.2)$$

де σ_θ – питома електропровідність води при температурі θ, См/м;

σ_{20} – питома електропровідність води при температурі 20 ^{o}C, См/м;

α_σ – температурний коефіцієнт провідності, 1/^{o}C;

Зростання електропровідності води при підвищенні її температури пояснюється підвищенням рухомості іонів. На практиці частіше користуються оберненою величиною – питомим опором.

Якщо підставити у вираз (3.2) значення α_σ =0,025 1/^{o}C, то отримаємо рівняння для знаходження питомого опору води при заданій

температурі:

$$\rho_\theta = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{20 + \theta} \ , \qquad (3.3)$$

де $\rho_{20} = \frac{1}{\sigma_{20}}$ – питомий електричний опір води при θ =20 °С, Ом·м.

Останнє рівняння не дає прийнятних результатів при кипінні, оскільки в ньому не враховується збільшення питомого опору за рахунок утворення бульбашок пари, яка є діелектриком.

Питомий опір пароводяної суміші для системи плоских електродів можна визначити за емпіричною формулою:

$$\rho_{kun} = \rho_{100} \cdot 0{,}925 \cdot e^{1{,}5 \cdot j} \ , \qquad (3.4)$$

де j – густина струму на електродах, А/см^2.

Необхідність у визначенні питомого опору води виникає під час проектування електродних водонагрівачів і котлів, а також у процесі їх експлуатації. Заводами-виготівниками вказуються питомий опір води, при якому ця установка має номінальну потужність, а також допустимі межі його зміни. Якщо питомий опір води більший або менший вказаного в паспорті, потужність установки буде відрізнятися від номінальної. Використання води із значно нижчим питомим опором в електродних установках, призначених для нагрівання води з високим питомим опором, призводить до збільшення густини струму на електродах, утворенню грімучого газу, пробою проміжка між електродами.

Якщо природна вода не відповідає за питомим опором паспортним даним електродної установки, необхідно виконати доведення води. Останнє полягає в тому, що у воду з високим питомим опором додають концентрований розчин карбонату натрію (кальцинованої соди), який має низьку корозійну дію на електродну систему. Воду з низьким питомим опором розбавляють водою з великим питомим опором (конденсат, дистилят, дощова або снігова вода). Водні розчини солей з достатнім ступенем точності підпорядковуються правилу адитивності, тобто властивості суміші розчинів тотожні сумі властивостей складових розчинів (за умови, що розчини однакового характеру і при їх змішуванні розчинені речовини не вступають у взаємодію один з одним). Згідно з правилом адитивності питомий електричний опір суміші двох типів води буде дорівнювати:

$$\rho_{сум} = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2}} \quad , \tag{3.5}$$

де m_1, ρ_1 – маса і питомий опір води одного типу (вихідна вода);

m_2 і ρ_2 – те ж, для води другого типу (доведена вода).

Основним завданням теплового розрахунку електродних водонагрівачів є визначення потужності установки. Завданням електричного розрахунку – знаходження конструктивних розмірів електродної системи. Необхідну потужність установки можна отримати при різному співвідношенні площі електродів і відстані між ними. Проте розміри електродів і відстань між ними лімітуються максимально допустимими значеннями густини струму на електродах та напруженості поля. При великій напруженості поля між електродами відбувається пробій, а при великій густині струму – електролітичне розкладання води з утворенням вибухонебезпечного гримучого газу (суміш кисню і водню).

Допустима густина струму на електродах для плоских електродів становить 0,5 А/см^2, для циліндричних – 2 А/см^2.

Допустима напруженість поля між електродами (В/см), визначається за виразом:

$$E_{доп} = j_{доп}\, \rho_к \quad , \tag{3.6}$$

де $\rho_к$ – питомий опір води в кінці нагрівання, Ом·см.

У будь-якому випадку повинні виконуватися умови:

$$j_{max} \leqslant j_{доп}\,, \quad E_{max} \leqslant E_{доп}\,. \tag{3.7}$$

Слід зазначити, що для систем із циліндричними електродами розрахунок необхідно робити за внутрішнім електродом (електродом з меншим діаметром), який має меншу площу поверхні.

Біля поверхні цього електрода спостерігаються найбільші густина струму і напруженість електричного поля.

Програма роботи

1. Засвоїти методику і дослідити експериментальним шляхом залежність питомого опору води від температури $\rho_е = f(\theta)$.
2. Розрахувати залежність $\rho_\theta = \varphi(\theta)$ за емпіричною формулою і обидві криві побудувати в одних координатах.
3. За дослідними даними та емпіричною формулою визначити коефіцієнт збільшення питомого опору води при кипінні.

4. Виконати розрахунок по доведенню води за питомим опором за завданням викладача.
5. Розрахувати основні конструктивні і режимні параметри електродного водонагрівача.

Методика виконання роботи

Питомий опір води при різних температурах визначають за допомогою установки, схема якої наведена на рис.3.1. У вимірювальний бачок наливають воду і, вимірявши висоту стовпа води *H*, нагрівають до кипіння, безперервно помішуючи скляною паличкою. Покази амперметра, вольтметра і термометра записують, починаючи з 15 ^{o}C, через кожні 5 ^{o}C, а починаючи з 95 ^{o}C - через 1 ^{o}C. Після того, як вода закипить, температура буде залишатися незмінною, проте сила струму почне знижуватися внаслідок збільшення питомого опору пароводяної суміші.

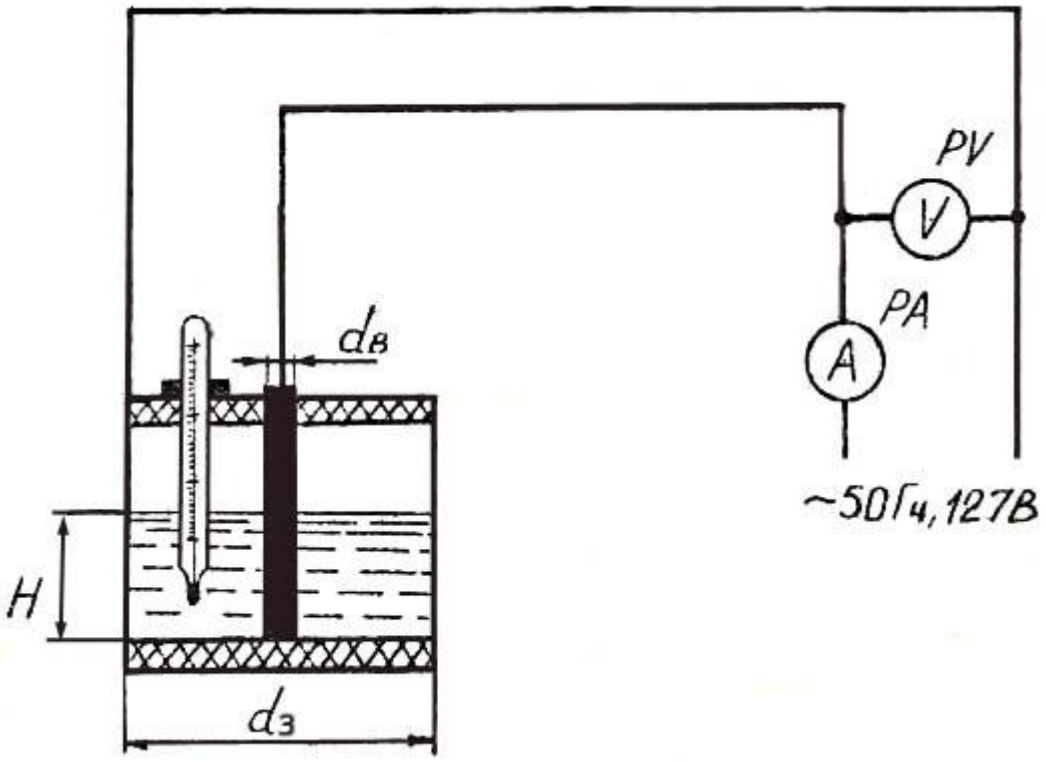


Рис 3.1. Схема установки для визначення питомого опору води

При цьому слід продовжувати запис значень напруги і струму через кожні дві хвилини аж до практично постійного значення останнього. Після закінчення досліду необхідно виміряти висоту стовпа води H для визначення питомого опору в режимі кипіння. Експериментальне значення питомого опору ρ_e, Ом·см, розраховують за формулою:

$$\rho_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot H \cdot U}{2{,}3 \cdot I \cdot \lg \frac{d_з}{d_в}}, \qquad (3.8)$$

де H – висота стовпа води, см;

U – напруга між електродами, В;

I – сила струму, який протікає через воду, А;

$d_з$ і $d_в$ – діаметри зовнішнього і внутрішнього електродів, см.

Підставляючи в рівняння (3.8) значення напруги і струму при різних температурах води, вираховують питомий опір і будують залежність $\rho_e = f(\theta)$. Для точки кипіння води у формулу необхідно підставити значення $H_к$, виміряне після закінчення досліду.

Розрахункові значення питомого опору $\rho_p = f(\theta)$ визначають за емпіричною формулою (3.3).

Дані досліду і результати розрахунків записують у табл.3.1.

3.1. Результати розрахунків

$H =$, $H_к =$, $d_з =$, $d_в =$.

θ, °С	I, А	U, В	ρ_e, Ом·см	ρ_p, Ом·см

За результатами досліду і розрахунку в одній системі координат будують криві $\rho_e = f(\theta)$ і $\rho_p = \varphi(\theta)$.

Коефіцієнти збільшення питомого опору води при кипінні визначають:

а) за дослідними даними:

$$\beta = \frac{\rho_{kun}}{\rho_{\min}}, \qquad (3.9)$$

б) за емпіричною формулою:

$$\beta = 1 + 27{,}4 \cdot \left(\frac{P_{kun}}{d_в \cdot H \cdot Z_\theta \cdot \gamma_n}\right)^3, \qquad (3.10)$$

де $P_{кип} = U \cdot I_{кип}$ – потужність електродної системи при кипінні, Вт;

Z_θ – питома теплота пароутворення, Дж/кг, (для води Z_θ=2,26 10^{-6} Дж/кг);

γ_n – густина пари при заданому тиску (в лабораторній установці γ_n=0,634 кг/м^3).

Розрахунок параметрів для доведення води за питомим опором виконується за формулою (3.5) і варіантом з табл.3.2, вказаним викладачем.

3.2. Варіанти завдань

Варіант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
$\rho_{сум}$, Ом·м	10	20	30	40	50	60	50	15	25	35	45	65
m_1, л	140	100	300	650	420	280	850	120	260	260	910	590
ρ_1, Ом·м	5	30	25	45	10	70	20	20	40	40	30	40
ρ_2, Ом·м	20	10	40	5	80	1	60	5	30	30	60	80

Розрахунок основних конструктивних і електричних параметрів електродного водонагрівача виконується для трифазної установки з плоскопаралельними електродами. Об`єм води, яка нагрівається, V=10 л. Питомі електричні опори води ρ_{20} і $\rho_{кін}$ беруться з експериментальних даних, інші параметри з табл. 3.3 згідно із вказаним викладачем варіантом.

3.3. Варіанти завдань

Варіант	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
U, В	380	220	380	220	380	220	380	220	380	220	380	220
t, год	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2
$\theta_п$, °С	20	10	5	10	15	20	5	10	15	20	10	20
$\theta_к$, °С	40	35	30	60	50	65	20	45	70	90	75	85

Мінімальна відстань $a_{\min}$, см, між електродами визначається за виразом:

$$a_{\min} = \frac{U}{E_{доп}} \quad , \tag{3.11}$$

де $E_{доп}$ – допустима напруженість поля, В/см, див. (3.6).

Мінімальна площа електродів, см^2, на одну фазу:

$$S_e = 107 \frac{V \cdot \rho_{20} \cdot a}{U^2 \cdot m \cdot t \cdot \eta} \lg \frac{20 + \theta_k}{20 + \theta_n} \ , \qquad (3.12)$$

де V – об`єм води, що нагрівається, л;

U – напруга між електродами, В;

m – кількість фаз установки,

t – час нагрівання води, год;

η – ККД водонагрівача (η=0,92...0,97);

θ_n і θ_k – початкова і кінцева температури води, ^{o}С.

Середня, початкова і кінцева потужності, кВт, водонагрівача:

$$P_{сер} = \frac{V \cdot C \cdot (\theta_k - \theta_n)}{3600 \cdot t \cdot \eta} \ , \qquad (3.13)$$

де C – теплоємність води, C =4,19 кДж/(л·^{o}С);

$$P_н = \frac{U^2 \cdot S_e \cdot m}{40 \cdot \rho_{20} \cdot a \cdot \eta} \cdot (20 + \theta_n) \cdot 10^{-3} \ ; \qquad (3.14)$$

$$P_k = \frac{U^2 \cdot S_e \cdot m}{40 \cdot \rho_{20} \cdot a \cdot \eta} \cdot (20 + \theta_k) \cdot 10^{-3} \ . \qquad (3.15)$$

Після виконання розрахунку перевіряють, чи не перевищує густина струму в кінці нагрівання води допустиме значення:

$$I_{кін} = \frac{P_k}{3 \cdot U \cdot S} \le j_{gon} = 0{,}5 \quad \text{А/см}^2. \qquad (3.16)$$

Якщо ця умова не виконується, то збільшують відстань між електродами, а отже і площу електродів, і виконують повторний розрахунок потужності.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Ескіз установки для визначення питомого опору води.
3. Перелік обладнання і вимірювальних приладів.
4. Таблиця експериментальних і розрахункових даних .
5. Графіки залежностей $\rho_e = f(\theta)$ і $\rho_p = \varphi(\theta)$.
6. Обчислення параметрів β, m_2, a_{min}, S_{min}, $P_{сер}$, P_n, P_k, $I_{кін}$.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Що обумовлює електропровідність природної води?
2. Від чого залежить електропровідність води?

3. Чим пояснюється зниження питомого опору води при підвищенні її температури?
4. Чому відбувається підвищення питомого опору води при кипінні?
5. До чого призводить використання води з більшим або меншим питомим опором порівняно з паспортним значенням для електродної установки?
6. Що таке доведення котлової води і як воно здійснюється?
7. Основні завдання теплового та електричного розрахунку електродних водонагрівачів.
8. Назвіть граничні режимні параметри, які накладають обмеження на конструктивні параметри електродних систем.
9. Які наслідки може викликати перевищення густини струму на електродах та напруженості електричного поля між електродами?
10. Особливості розрахунку електродних систем з циліндричними електродами.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

Дослідження і перевірний розрахунок електродного водонагрівача

Мета роботи: вивчення будови, принципу роботи і правил експлуатації електродних водонагрівачів. Експериментальне дослідження енергетичних параметрів лабораторного електродного водонагрівача.

Загальні відомості

В електродних водонагрівачах вода нагрівається в результаті проходження через неї електричного струму. Водонагрівач – це металевий бак з теплоізоляцією, всередині якого на ізоляційній основі кріпляться електроди. Напруга до них подається через прохідні ізолятори, які встановлюються на кришці бака водонагрівача.

У результаті проходження електричного струму через воду на корпусі електродного водонагрівача може виникнути небезпечний потенціал. Особливо велика напруга дотику в разі втрати однієї з фаз. Для захисту від несиметричного режиму електродних водонагрівачів використовують реле обриву фаз або струмове реле в нульовому проводі.

Згідно з вимогою ПУЕ електродні водонагрівачі потрібно приєднувати до системи подачі і забору води через ізолюючі вставки.

Довжина вставки визначається розрахунком, але повинна бути не менше 1 м. Розрахунок довжини ізоляційної вставки проводиться з таких міркувань. При відомому діаметрі (перерізі) ізоляційної вставки необхідно вибрати її довжину так, щоб у випадку дотикання до металевих елементів водопровідної мережі або до теплообмінника (під час роботи по замкненому контуру) сила струму, що протікає через тіло людини, була безпечною. Практично можна вважати безпечною силу струму 10 мА. Ізолююча вставка виконуватиме свої функції, якщо напруга дотику буде менше 65 В у приміщеннях без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом, 36 В у приміщеннях з підвищеною небезпекою, 12 В у приміщеннях особливо небезпечних.. З метою запобігання появі високого потенціалу в струмені води за межами ізолюючої вставки рекомендується не ближче, ніж на 0,3 м від штуцерів водонагрівача вставляти захисні металеві трубки і заземлювати їх через металевий провід.

У разі живлення електродних пристроїв від мережі з глухозаземленною нейтраллю корпуси їх повинні бути занулені. При теплопостачанні споживачів, які розташовуються в особливо небезпечних приміщеннях, занулення корпусів допускається лише за наявності в цих приміщеннях пристроїв для вирівнювання потенціалу, які забезпечують напругу дотику не більше 12 В. В іншому випадку їх потрібно встановлювати на ізоляторах, ізолювати від мережі занулення (заземлення) і приєднувати до системи трубопроводів через ізолюючі вставки. Електродні апарати з ізольованим корпусом повинні мати індивідуальну суцільну огорожу або огорожу з дверима, які замикаються замком і мають блокіровку, що не допускає відкривання дверей при ввімкненому апараті і вмикання останнього при відчинених дверях.

До обслуговування електроустановок з електродними водонагрівачами і котлами допускаються особи, які мають класифікаційну групу не нижче третьої.

У процесі експлуатації електродних установок необхідно контролювати питомий опір води і здійснювати її доведення, якщо це необхідно, а також періодично очищати електроди від накипу і відкладень продуктів корозії для запобігання зниженню потужності установки.

Перевагою установок електродного нагрівання води порівняно з елементними є простота і надійність в роботі, низька металоємність, високий ККД, можливість отримання в невеликих об`ємах великої

потужності, знезараження води під час протікання по ній електричного струму.

Недоліками електродних водонагрівачів є підвищена електронебезпечність, непостійність потужності в процесі нагрівання, її залежність від хімічного складу води, а також можливість забруднення води продуктами електрохімічного розчинення електродів. У зв`язку з цим слід пам`ятати, що використовувати воду для питних потреб можна тільки в разі застосування водонагрівачів з нерозчинними електродами (титан, графіт, деякі марки нержавіючої сталі тощо) або використовувати теплообмінні апарати для підігрівання питної води.

Робота електродного водонагрівача на замкнену систему з теплообмінником дозволяє спростити доведення води за питомим опором і знизити утворення накипу.

Програма роботи

1. Вивчити будову, принцип роботи та правила експлуатації електродних водонагрівачів.
2. Накреслити ескіз електродної системи лабораторного водонагрівача, виміряти площу електродів і відстань між ними.
3. Для лабораторного електродного водонагрівача розрахунковим шляхом визначити:
   а) максимальну лінійну напругу мережі, при якій може працювати водонагрівач;
   б) початкову, кінцеву і середню споживані потужності;
   в) час нагрівання води від 15 до 80 ^{o}C;
   г) продуктивність установки.
4. Експериментальним шляхом дослідити і побудувати залежності споживаної потужності P та густини струму на електродах j від температури води θ.
5. Порівняти експериментальні та розрахункові значення основних виробничих і енергетичних параметрів лабораторного водонагрівача (табл. 4.2).
6. Визначити коефіцієнт корисної дії водонагрівача і питомі витрати електроенергії на нагрівання води.
7. Визначити величину потенціалу корпуса водонагрівача відносно заземленого нульового провода у разі обриву кола заземлення корпуса для випадків симетричного живлення і втрати фази.

Методика виконання роботи

Під час перевірного розрахунку електродного водонагрівача вимірюють об`єм води, що нагрівається (рекомендований об`єм V=10 л), площу електрода однієї фази S_e та відстань між електродами a.

Розрахункові параметри лабораторного водонагрівача визначають за умови: U=220 В, V=10 л, θ_k=80 °С, θ_n=15 °С, m=3 , η=0,95. Питомий опір води ρ_{20} беруть з даних, отриманих у лабораторній роботі 3.

Розрахункові параметри:

а) максимальна лінійна напруга мережі (В), при якій може працювати лабораторний водонагрівач:

$$U_{max} = E_{доп} a \ , \qquad (4.1)$$

де $E_{доп}$ – допустима напруженість електричного поля між електродами (див. лаб. роботу 3);

б) початкова потужність установки, кВт:

$$P_n = \frac{U^2 \cdot Se \cdot m}{40 \cdot \rho_{20} \cdot a \cdot \eta} \cdot (20 + \theta_n) \cdot 10^{-3}; \qquad (4.2)$$

де U – напруга між електродами, В;

S_e – площа електродів однієї фази, см^2;

ρ_{20} – питомий електричний опір води при θ=20 °С, Ом·см;

в) кінцева потужність установки, кВт:

$$P_k = \frac{U^2 \cdot Se \cdot m}{40 \cdot \rho_{20} \cdot a \cdot \eta} \cdot (20 + \theta_k) \cdot 10^{-3}; \qquad (4.3)$$

г) середня потужність установки, кВт:

$$P_{сер} = \frac{V \cdot c \cdot (\theta_k - \theta_n)}{3600 \cdot t \cdot \eta}, \qquad (4.4)$$

де V – об`єм води, що нагрівається (рекомендується 10 л);

c = 4,19 – питома теплоємність води, кДж/(л·°С);

t – час нагрівання води, год.

Середня потужність визначається за формулою:

$$P_{сер} = \frac{P_n + P_k}{2}; \qquad (4.5)$$

д) час нагрівання води від початкової θ_n=15 °С до кінцевої θ_k=80 °С температури:

$$t = 107 \cdot \frac{V \cdot \rho_{20} \cdot a}{U^2 \cdot Se \cdot m \cdot \eta} \cdot \lg \frac{20 + \theta_k}{20 + \theta_n} \ ; \qquad (4.6)$$

е) продуктивність установки (л/год) при нагріванні води з указаною різницею температур:

$$Q = \frac{V}{t} \ . \qquad (4.7)$$

Для експериментального дослідження залежностей $P=f(\theta)$, $j=\varphi(\theta)$ і визначення параметрів t і Q складається схема за рис.4.1. Водонагрівач заповнюється водою (V=10 л), вмикається в мережу і вода нагрівається до θ_k=80 °С. Покази приладів (термометра, амперметра, вольтметра, ватметра) записують, починаючи з температури θ_n=15 °С через кожні 2 хв. Покази лічильника електроенергії записують у разі досягнення температури θ_n=15 °С і θ_k=80 °С.

Експериментальні і розрахункові дані записують у табл.4.1.

4.1. Експериментальні і розрахункові дані

K_{mc}= , S_e= .

t, хв	θ, °С	P, кВт	I_A, А	I_B, А	I_C, А	I_{cep}, А	J, А/см^2	Покази лічильника електроенергії

Витрати електричної енергії W, кВт·год, на нагрівання води визначають за різницею показів лічильника в кінці і на початку досліду із врахуванням коефіцієнта трансформації трансформаторів струму K_{mc}.

Середнє значення струму електродів розраховується як середнє арифметичне струмів електродів різних фаз:

$$I_{cep} = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} \ . \qquad (4.8)$$

Густина струму j, А/см^2, на електродах визначається із співвідношення:

$$j = \frac{I_{cep}}{Se} \ . \qquad (4.9)$$

Порівняння експериментальних і розрахункових значень основних виробничих та енергетичних параметрів лабораторного електродного водонагрівача виконують за даними, наведеними в табл. 4.2.

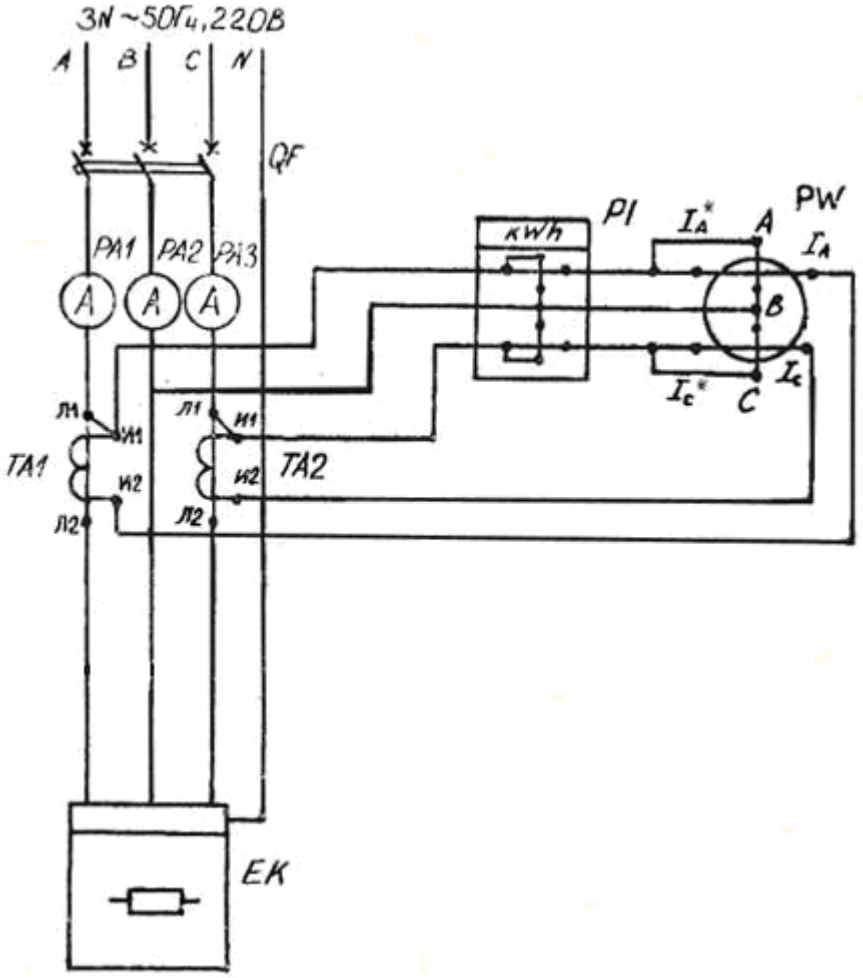


Рис 4.1. Схема дослідження електродного водонагрівача

Розрахункова густина струму в кінці нагрівання визначається за виразом:

$$j_k = \frac{P_k}{3 \cdot U \cdot S_e} \quad . \tag{4.10}$$

Коефіцієнт корисної дії водонагрівача:

$$\eta = \frac{V \cdot c \cdot (\theta_k - \theta_n)}{3600 \cdot W} \cdot 100\% \quad , \tag{4.11}$$

де W – витрати електроенергії за час досліду, кВт·год.

Питомі витрати електроенергії, кВт·год/л ^{o}С, на нагрівання води:

$$a = \frac{W}{V \cdot (\theta_k - \theta_n)} \quad . \qquad (4.12)$$

Потенціал корпуса водонагрівача відносно заземленого нульового проводу вимірюється вольтметром з високим внутрішнім (вхідним) опором для симетричного режиму живлення, а також у випадку обриву однієї та двох фаз. Результати дослідів заносять у табл. 4.3.

4.2. Порівняльна характеристика водонагрівача

Параметр	Розрахункове значення	Експеримен-тальне значення	Оцінка збіжності (причина)
1.Напруга між електродами, В: допустима фактична			
2.Початкова потужність установки, кВт			
3.Кінцева потужність установки, кВт			
4.Середня потужність установки, кВт			
5.Час нагрівання води від 20 до … ^{o}C, год			
6.Продуктивність установки, л/год			
7.Густина струму на електродах в кінці нагрівання, А/см^2			

4.3. Результати дослідів

Режим живлення	Повнофазний	Обрив однієї фази	Обрив двох фаз

$U_{K\text{-}N}$, В

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Ескіз електродної системи водонагрівача.
3. Електрична схема.
4. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
5. Таблиця експериментальних і розрахункових даних (див. табл.4.1).
6. Графіки залежностей $P=f(\theta)$, $j=\varphi(\theta)$.
7. Обчислення параметрів U_{max}, P_n ,$P_к$, $P_{сер}$, t, Q, $j_к$, η, a.
8. Таблиця порівняння розрахункових і експериментальних даних (див. табл.4.2).
9. Дані вимірювання потенціалів на корпусі водонагрівача (див. табл.4.3).
10. Висновки.

Контрольні запитання

1. Переваги і недоліки електродних водонагрівачів порівняно з елементними.
2. Правила заземлення чи занулення електродних установок.
3. Призначення ізолюючих вставок на трубопроводах. У чому полягає розрахунок їх довжини?
4. В яких умовах корпус електродного водонагрівача не заземлюється?
5. Правила експлуатації електродних установок.
6. Коли допускається використання води, нагрітої електродним водонагрівачем, для питних потреб?
7. Переваги електродних установок, що працюють на замкнену систему з теплообмінником.
8. До чого може призвести перевищення допустимої лінійної напруги?
9. До чого може призвести перевищення допустимої густини струму на електродах у кінці нагрівання?
10. Чому в процесі нагрівання води зростають потужність водонагрівача і густина струму на електродах?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

Дослідження установки індукційного нагрівання

Мета роботи: вивчення та експериментальне дослідження установки для індукційного нагрівання деталей машин.

Загальні відомості

Принцип індукційного нагрівання полягає в тому, що провідники, розміщені в змінному магнітному полі, нагріваються вихровими струмами, які наводяться в них за законами електромагнітної індукції. Це нагрівання використовується для плавлення металів, поверхневого загартування деталей та їх наскрізного нагрівання з метою зняття внутрішніх напруг.

Індукційне нагрівання характеризується високою питомою поверхневою потужністю, яка досягає значень $P_{пит.пов.}$= 3 кВт/см^2, що дозволяє знехтувати у деяких випадках теплопровідністю металів.

У технології індукційного нагрівання існує поняття глибини проникання струму: це товщина шару матеріалу *Z,* в якому густина індукційного струму зменшується в *e*=2,7 рази:

$$j = j_{\max} \cdot e^{-\frac{h}{z}} \quad , \qquad (5.1)$$

де j – густина струму на глибині h;

$j_{\max}$ – максимальна густина струму на поверхні матеріалу.

У цьому шарі виділяється 87 % від загальної потужності, яка виділяється в матеріалі, що нагрівається.

Необхідно зазначити, що глибина проникання струму *Z,* м, залежить від частоти *f* напруги живлення:

$$Z = 503 \cdot \sqrt{\frac{\rho_m}{\mu_2 \cdot f}} \quad , \qquad (5.2)$$

де ρ_m – питомий електричний опір матеріалу, Ом м;

μ_2 – відносна магнітна проникність матеріалу ;

f – частота струму, Гц.

З останнього виразу видно, що чим вища частота, тим менші глибина проникання струму та товщина поверхневого нагрівання деталі. Цей ефект використовується в технологічному процесі поверхневого загартування деталей із збереженням в`язкої внутрішньої структури

матеріалу. Такий технологічний прийом особливо важливий під час виготовлення деталей машин, поверхні яких потребують високої стійкості до спрацювання і здатності витримувати значні ударні навантаження (наприклад, колінчасті вали двигунів внутрішнього згоряння).

Основними елементами установки індукційного нагрівання є генератор підвищеної (для наскрізного нагрівання) або високої (для поверхневого загартування) частоти, індуктор, знижувальний трансформатор, батарея конденсаторів змінної ємності.

Для індукційного нагрівання застосовують електромашинні генератори частотою до 10 кГц і лампові частотою вище 10 кГц.

Індуктор застосовується для концентрації електромагнітного поля в провіднику, що нагрівається, і являє собою котушку з невеликою кількістю витків (іноді один виток) мідного проводу великого перерізу. Провід часто виконується порожнистим для циркуляції охолоджуючої рідини. Конструктивне виконання індуктора залежить від форми нагрівних деталей, мети та умов нагрівання. При цьому прагнуть забезпечити мінімальний повітряний зазор між індуктором і поверхнею деталі, яка нагрівається. Це забезпечує вищі коефіцієнти потужності і корисної дії установки.

Знижувальні трансформатори використовують для узгодження номінальної напруги генератора з опором індуктора.

Індуктор з деталлю являє собою повітряний трансформатор із значним розсіюванням і споживає великий намагнічуючий струм ($cos\varphi$=0,2...0,5). Для компенсації реактивної потужності та розвантаження генератора від індуктивних струмів паралельно індуктору підключають батарею статичних конденсаторів з можливістю регулювання ємності (в разі підключення різних конструкцій індукторів).

Лабораторна установка для індукційного нагрівання складається з машинного перетворювача частоти, знижувального трансформатора, батареї конденсаторів з можливістю регулювання ємності та індуктора.

Індуктор являє собою трубку з вогнетривкого матеріалу, на яку намотана спіраль з мідної шини. Для зниження теплових витрат індуктор має теплоізоляцію.

Програма роботи

1. Вивчити обладнання робочого місця і скласти електричну схему для дослідження установки індукційного нагрівання (рис.5.1).

2. Дослідити і побудувати залежність сили струму, споживаного установкою, від ємності, яка увімкнена паралельно контуру "трансформатор - індуктор", $I=f(C)$.
3. Дослідити основні енергетичні показники установки під час нагрівання в індукторі сталевої деталі.
4. Визначити витрати електроенергії і ККД установки під час нагрівання від 20 до 200 і 400 ^{o}C.
5. За результатами експерименту і розрахунків побудувати графіки залежностей: $P_1=f(t)$, $P_2=f(t)$, $\theta=f(t)$, $P_1=\varphi(\theta)$, $P_2=\varphi(\theta)$, $V_\theta=f(\theta)$.

Методика виконання роботи

Для дослідження установки індукційного нагрівання складається електрична схема за рис. 5.1.

Дослідження залежності сили струму від ємності конденсатора проводять з метою визначення ємності, яка забезпечує повну компенсацію реактивної потужності, споживаної контуром "знижувальний трансформатор – індуктор". Дослід проводять при закладеній в індуктор деталі без термопари. Ємність конденсаторної батареї змінюють від 0 до 10 мкФ через кожні 0,5 мкФ. Дослід слід проводити швидко, щоб запобігти нагріванню індуктора. Результати дослідів заносять у табл. 5.1.

5.1. Результати дослідження залежності сили струму від ємності конденсатора

C, мкФ	0	0,5	1,0	1,5 ... 9,5	10,0
I, А					

За результатами досліду будують графік $I=f(C)$ і визначають величину ємності, при якій контур споживає найменшу (чисто активну) силу струму. Це значення ємності встановлюється для подальших досліджень. Потім індуктор охолоджують до температури навколишнього середовища.

Для дослідження енергетичних параметрів установки в індуктор встановлюють деталь з вмонтованою термопарою і вмикають струм. У момент включення і через кожні 2 хв протягом 14 хв записують покази приладів у такій послідовності: термометр (мілівольтметр *PV2*), амперметр *PA,* ватметри *PW1* і *PW2*, частотомір *PF*.

Дані вимірювань заносять у табл.5.2.

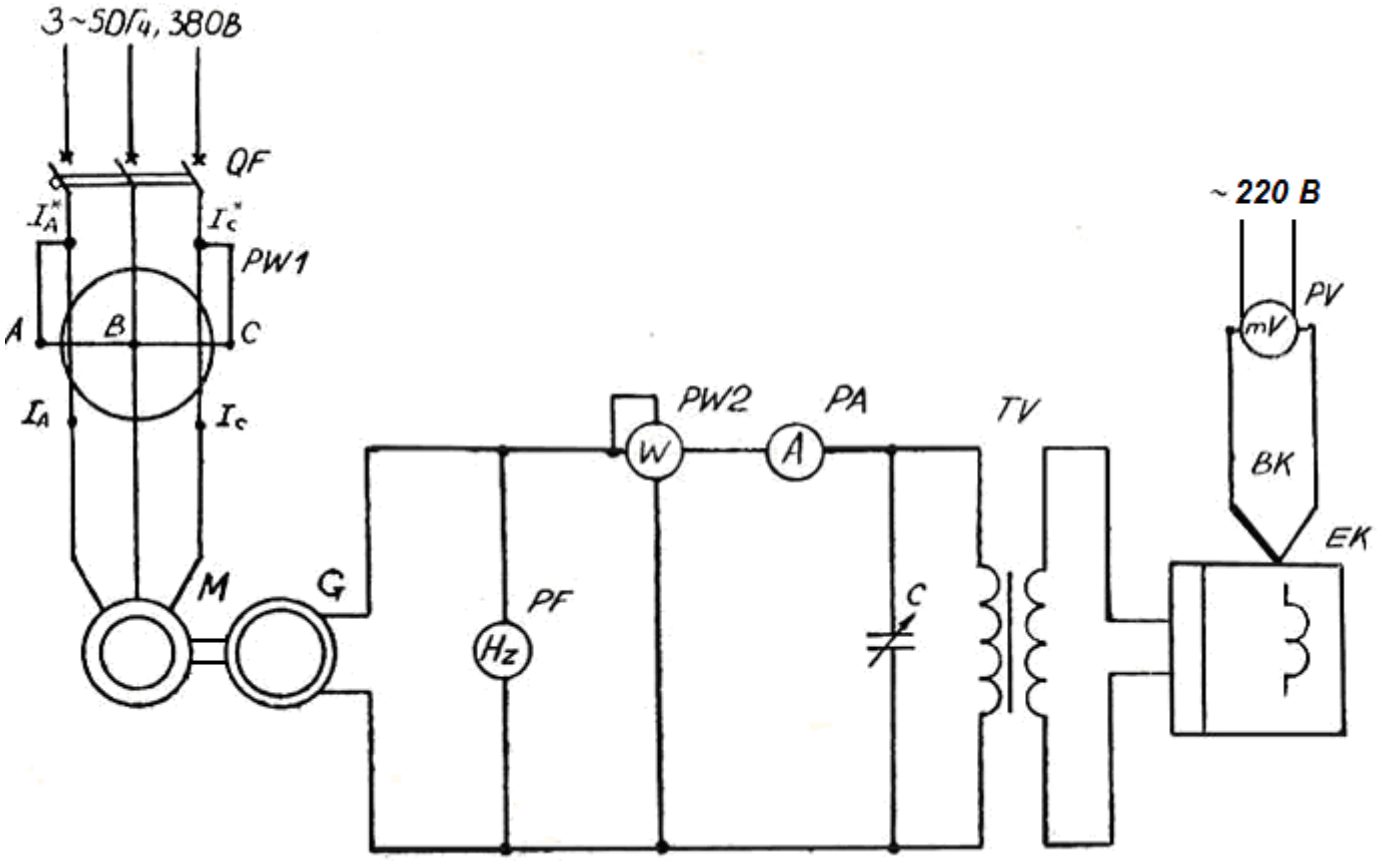


Рис 5.1. Схема установки для індукційного нагріваннчя

5.2. Дані дослідження індукційної електронагрівальної установки

$\theta_{от}$=

t, хв	τ, °С	I, А	P_1, кВт	P_2, кВт	f, Гц	θ, °С	$\Delta\theta$, °С	V_θ, °С/хв

У дослідній установці використано термоелектричний метод вимірювання за допомогою термопари *ВК*. Прилад *PV* показує перевищення температури τ,°С, над температурою навколишнього середовища $\theta_{от}$. Температура деталі визначається за виразом:

$$\theta = \tau + \theta_{от}. \qquad (5.3)$$

Температуру $\theta_{от}$ вимірюють за допомогою лабораторного рідинного термометра.

Швидкість нагрівання деталі розраховують за формулою:

$$V_\theta = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}, \ ^{o}\text{С хв}^{-1}, \qquad (5.4)$$

де $\Delta\theta$ – приріст температури за час δt між двома відліками (δt=2 хв).

За результатами дослідів і розрахунків будують графіки залежностей: $P_1=f(t)$, $P_2=f(t)$, $\theta=f(t)$, $P_1=\varphi(\theta)$, $P_2=\varphi(\theta)$, $V_\theta=f(\theta)$.

Кількість енергії, кВт·год, що споживається установкою, визначають за виразом:

$$A = P_{1сер}t, \qquad (5.5)$$

де $P_{1сер}$ – середня потужність, яка споживається установкою з мережі за час нагрівання, кВт;

t – час нагрівання деталі, с.

Корисні витрати енергії на нагрівання деталі:

$$A_к = cm(\theta_к - \theta_п), \qquad (5.6)$$

де c – питома теплоємність сталі, кДж/(кг°С);

m – маса деталі, кг (вказана на деталі);

θ_k і θ_n – відповідно кінцева і початкова температури деталі,°С.

Коефіцієнт корисної дії установки:

$$\eta = \frac{A_k \cdot 100\%}{A}. \qquad (5.7)$$

Вказані параметри розраховують для нагрівання деталі від 20 до 200 і 400 ^{o}C.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електрична схема установки.
3. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
4. Таблиця експериментальних даних.
5. Графік залежності $I=f(C)$.
6. Таблиця дослідних і розрахункових даних.
7. Графіки залежностей: $P_1=f(t)$, $P_2=f(t)$, $\theta=f(t)$, $P_1=f(\theta)$, $P_2=\varphi(\theta)$, $V_\theta=f(\theta)$.
8. Розрахунок параметрів: $P_{1сер}$, A, A_k, η.
9. Висновки.

Контрольні запитання

1. Суть індукційного способу нагрівання, його переваги і недоліки порівняно з прямим нагріванням.
2. Що таке глибина проникання струму?
3. Вплив частоти струму на глибину його проникання в матеріал.
4. Основні елементи установки індукційного нагрівання.
5. Призначення індуктора та вимоги до його параметрів.
6. Призначення узгоджуючого трансформатора.
7. Призначення батареї статичних конденсаторів.
8. Принцип підбору ємності для компенсації реактивної потужності.
9. Чому зменшуються сила струму і потужність, яка споживається індуктором, у процесі нагрівання деталі?
10. Пояснити причини зменшення швидкості нагрівання деталі при підвищенні її температури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

Дослідження зварювального трансформатора ТД-300

Мета роботи: вивчення будови, принципу роботи, правил експлуатації та експериментальне визначення основних характеристик зварювального трансформатора ТД-300. Вивчення і дослідження пристрою для автоматичного відключення зварювального трансформатора під час холостого ходу.

Загальні відомості

Електродугове зварювання є найбільш розповсюдженим видом електродугового нагрівання. Живлення зварювальної дуги здійснюється від спеціальних джерел, які класифікують за родом струму, потужністю, призначенням, конструктивним виконанням.

Джерело зварювального струму повинно відповідати таким основним вимогам:

1. Напруга холостого ходу має бути достатньою для надійного запалювання дуги і безпечною для людини.
2. Після запалювання дуги напруга має зменшуватися до значень, що відповідають напрузі горіння дуги.
3. При зміні довжини дуги коливання сила зварювального струму повинна бути мінімальною.
4. При коротких замиканнях сила струму в колі не повинна перевищувати робочу силу струму під час зварювання більше, ніж на 20…40 %.
5. Забезпечити можливість плавного регулювання зварювального струму.

Джерелами дуги змінного струму найчастіше є зварювальні трансформатори, які широко застосовуються під час ремонту сільськогосподарської техніки. Для ручного зварювання використовують відкриту дугу, в якій вольт-амперна характеристика $U_d = f(I_d)$ при малих струмах є крутоспадною, а потім при збільшенні струму переходить в пологу і жорстку (рис.6.1). Під час ручного зварювання довжина дуги і, відповідно, спад напруги на ній змінюється, що призводить до зміни величини струму дуги. Для отримання якісного зварювального шва коливання струму дуги при зміні її довжини повинні бути мінімальними. Це забезпечується при крутоспадній зовнішній характеристиці джерела живлення дуги *U=f (I)* (рис.6.1).

Кратність струму короткого замикання у зварювальних трансформаторах знаходиться в межах 1,2… 1,4.

Зварювальний трансформатор типу ТД-300 призначений для живлення електричної дуги однофазним змінним струмом частотою 50 Гц під час ручного дугового зварювання, різання, наплавлення металів.

Трансформатор складається з осердя, нерухомої первинної та рухомої вторинної обмоток. Первинна обмотка намотана проводом із скловолокняною ізоляцією марки АПСД, вторинна – голою алюмінієвою

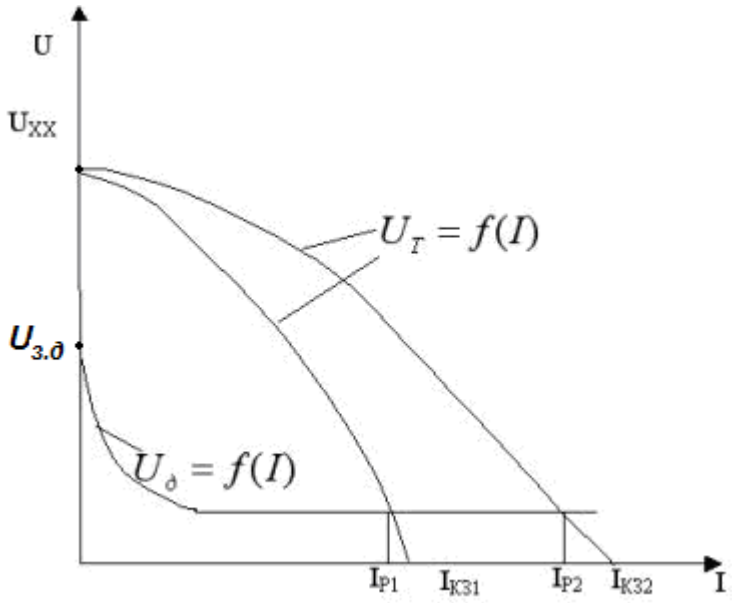


Рис 6. 1. Вольт-амперні характеристики зварювального трансформатора і відкритої дуги

шиною АМ. Первинна і вторинна обмотки мають по дві котушки. Залежно від способу з'єднання останніх трансформатор може працювати на двох ступенях зварювальних струмів: "великі" струми, коли котушки первинної і вторинної обмоток з'єднані паралельно, і "малі" струми, коли котушки кожної обмотки з'єднані послідовно (рис. 6.2). В останньому випадку невелика частина витків первинної обмотки відключається, в результаті чого підвищується напруга холостого ходу, що необхідно для підвищення стійкості дуги під час зварювання на малих струмах. Перемикання ступенів зварювального струму виконується перемикачем, рукоятка якого знаходиться на верхній кришці кожуха трансформатора.

Плавне регулювання зварювального струму на кожному ступені здійснюється шляхом зміни відстані між котушками первинної і вторинної обмоток за допомогою рукоятки, яка знаходиться на верхній кришці трансформатора. При збільшенні відстані між обмотками потік магнітного розсіювання зростає, а струм зменшується. Величину зварювального струму вказує спеціальний покажчик, який зв'язаний з рухомою обмоткою трансформатора.

Ємнісний фільтр *С1-С2* призначений для зниження радіоперешкод. Конденсатори включаються між затискачами первинної обмотки і кожухом трансформатора. Оскільки при пробої конденсатора первинна

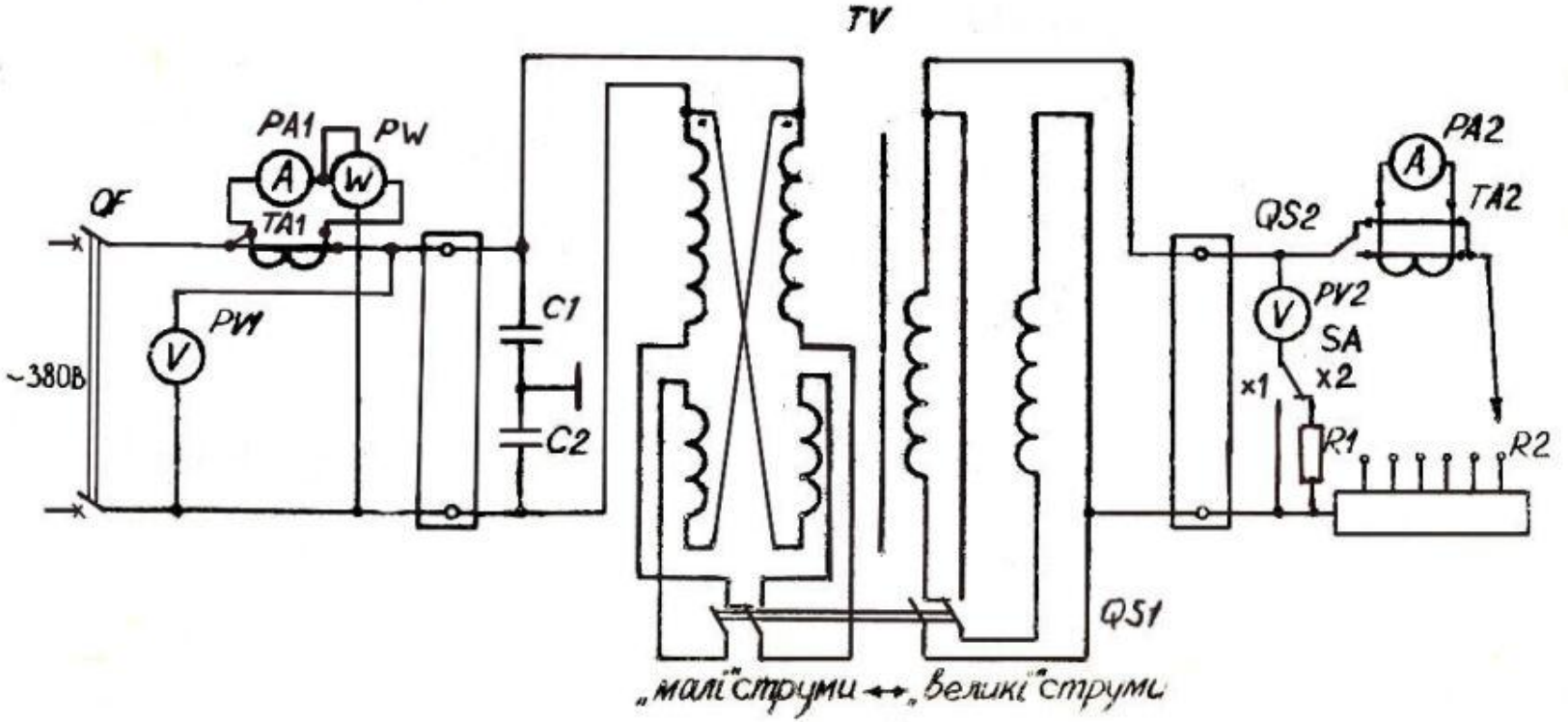


Рис 6.2. Схема дослідження зварювального трансформатора ТД-300

ься з корпусом, що небезпечно для обслуговуючого персоналу, то вмикання трансформатора в мережу без заземлення корпуса не допускається.

Технічна характеристика зварювального трансформатора ТД-300

Межі регулювання зварювального струму, А	60 – 350
Номінальна первинна напруга, В	380
Номінальна вторинна напруга, В	32,6
Напруга холостого ходу, В	61 – 79
Споживана потужність, кВт	19,4
Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,6

З метою зниження втрат електроенергії, зменшення споживання реактивної потужності та підвищення безпеки зварювальника під час переривання процесу зварювання (обриві дуги) використовують пристрої для автоматичного відключення холостого ходу трансформатора (рис. 6.3). Принцип роботи цього пристрою такий. При обриві дуги зварювальний трансформатор переходить у режим холостого ходу і напруга на затискачах його вторинної обмотки підвищується до 75 – 80 В. При цьому заряджаються конденсатори *C1* та *C2*. Коли напруга на конденсаторі *C2* досягає величини, при якій запалюється тиратрон *VL*, спрацьовує реле *KV* і своїм розмикаючим контактом *KV.1* вимикає котушку магнітного пускача *КМ*, а замикаючим контактом *KV.2* вмикає котушку реле *KV* на вторинну обмотку допоміжного трансформатора *TV2*. Головні контакти пускача *КМ* вимикають зварювальний трансформатор з мережі.

Під час запалювання дуги вторинна обмотка трансформатора закорочується через опір *R4*, напруга на котушці проміжного реле *KV* різко знижується, його розмикаючий контакт *KV.1* замикає коло котушки магнітного пускача *КМ* і зварювальний трансформатор *TV1* вмикається в мережу.

Витримка часу спрацювання пристрою залежить від швидкості зарядження конденсатора *C2*. Час зарядження конденсатора *C2* регулюється резистором *R1*.

Програма роботи

1. Вивчити будову, принцип роботи та правила експлуатації зварювального трансформатора ТД – 300.

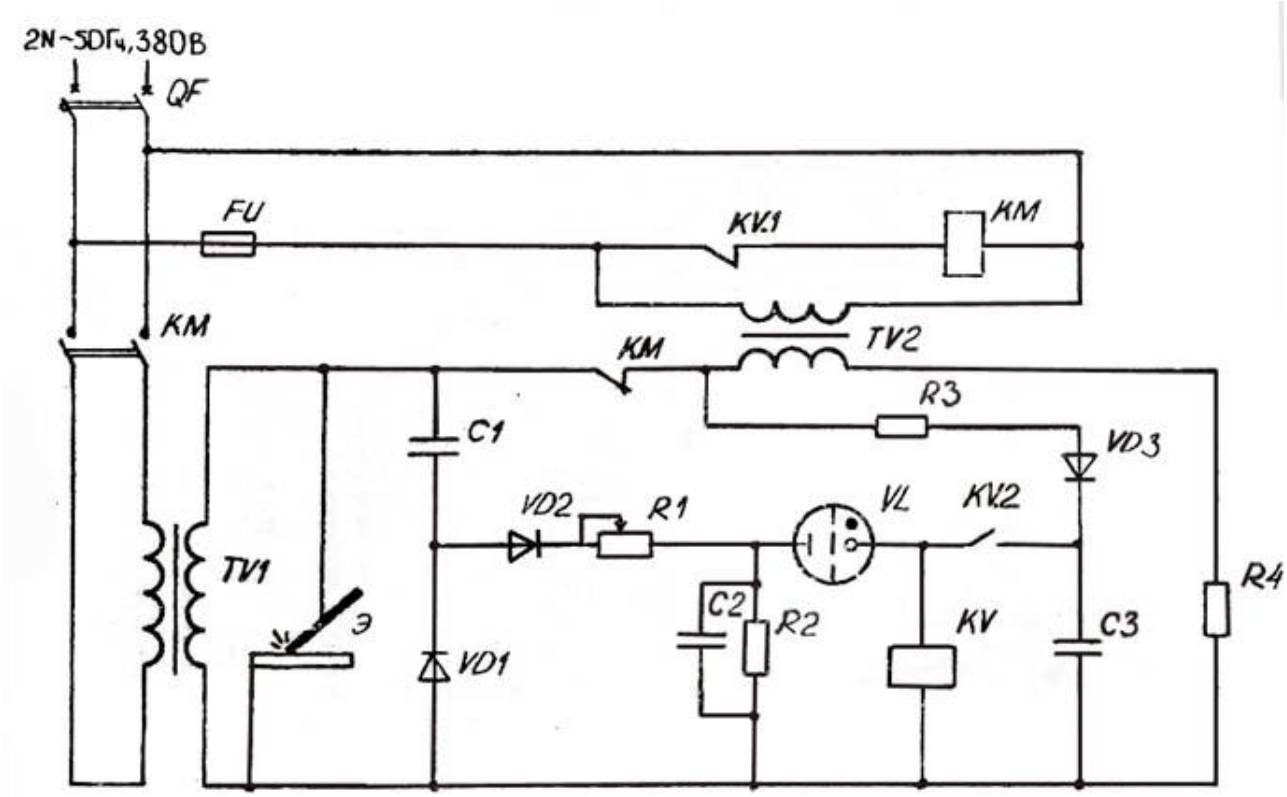


Рис 6. 3. Схема вмикання зварювального трансформатора через пристрій для обмеження холостого ходу

2. Дослідити та побудувати зовнішні характеристики $U_T = f(I)$ зварювального трансформатора на діапазонах "малі" струми і "великі" струми при мінімальних та максимальних відстанях між первинною та вторинною обмотками.

3. Розрахувати і побудувати на одному графіку із зовнішніми характеристиками трансформатора вольт-амперну характеристику відкритої дуги $U_d = f(I)$.

4. Визначити кратність струму короткого замикання трансформатора і зробити висновок щодо стійкості зварювального струму.

5. Визначити за зовнішніми характеристиками межі регулювання зварювального струму трансформатора.

6. Визначити η і $cos\ \varphi$ зварювального трансформатора.

7. Вивчити і випробувати у роботі пристрій для автоматичного вимикання зварювального трансформатора під час холостого ходу.

8. Визначити мінімальну вторинну напругу зварювального трансформатора, при якій спрацьовує пристрій автоматичного вимикання під час холостого ходу.

Методика виконання роботи

Для дослідження зовнішніх характеристик зварювального трансформатора $U_T = f(I)$ підбирають прилади згідно з його технічними даними. Навантаженням трансформатора є реостат *R2*, струм навантаження змінюють від нуля до струму короткого замикання.

При режимах навантаження зварювального трансформатора, близьких до режиму короткого замикання, для підвищення точності відліку за вольтметром *PV* перемикач *SA* (тільки на час замикання зварювального електрода на навантажувальний опір *R2*) слід перевести з положення "2" в положення "1". Результати заносять в табл. 6.1.

6.1. Результати досліду

Максимальна відстань між обмотками				Мінімальна відстань між обмотками			
"Малі" струми		"Великі" струми		"Малі" струми		"Великі" струми	
U_m, В	I, А	U_m, В	I, А	U_m, В	I, А	U_m, В	I, А

За даними табл. 6.1 будують на одному графіку чотири зовнішні характеристики зварювального трансформатора $U_T = f(I)$.

Вольт-амперну характеристику відкритої дуги із сталевим електродом розраховують за формулою:

$$U_d = 8 + 2 \cdot l + \frac{20 + 15 \cdot l}{I}, \qquad (6.1)$$

де I – струм дуги, А;

$l = \frac{d_e + 2}{2}$ – довжина дуги, мм;

d_e – діаметр електрода, мм .

Напругу дуги визначають для струмів 10; 30; 50; 100; 200; 300 і 400 А. Напругу запалювання дуги змінного струму (при $I = 0$) приймають 50 – 60 В.

Результати розрахунків заносять у табл. 6.2.

6.2. Результати розрахунків

$d_e =$, $l =$

I, А	0	10	30	50	100	200	300	400
U_d, В								

За результатами розрахунку на графіку із зовнішніми характеристиками трансформатора будують вольт-амперну характеристику відкритої дуги $U_d = f(I)$.

Для визначення кратності струму короткого замикання трансформатора $I_{кз}/I_p$ за зовнішньою характеристикою трансформатора знаходять $I_{кз}$, а робочий струм I_p визначають як абсцису точки перетину зовнішньої характеристики трансформатора та вольт-амперної характеристики дуги (рис. 6.1).

Межі регулювання зварювального струму визначають за точками перетину вольт-амперної характеристики дуги із зовнішніми характеристиками трансформатора.

Дані для обчислення коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності зварювального трансформатора визначають для кожного з чотирьох ступенів регулювання зварювального струму та опору у зварювальному колі, який вказується викладачем.

Результати дослідів і розрахунків заносять у табл. 6.3.

6.3. Результати дослідів та розрахунків

$K_{mc} =$

Ступінь регулювання струму	I_1, А	U_1, В	P_1, Вт	I_2, А	U_2, В	η	$\cos\varphi$

ККД і $\cos\varphi$ зварювального трансформатора визначають за формулами:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 \cdot I_2}{P_1} \ , \qquad (6.2)$$

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}\ , \qquad (6.3)$$

де P_1 – потужність, яка споживається зварювальним апаратом з мережі, кВт.

Для визначення мінімальної напруги спрацювання пристрою автоматичного вимикання холостого ходу трансформатора на пристрій подають напругу від автотрансформатора.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електричні схеми.
3. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
4. Таблиці експериментальних і розрахункових даних.
5. Графіки залежностей $U_T = f(I)$ і $U_d = f(I)$.
6. Дані визначення кратності струму короткого замикання трансформатора і меж регулювання зварювального струму.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Вимоги до джерел зварювального струму.
2. Чим забезпечуються малі коливання зварювального струму при зміні довжини дуги?
3. Конструкція зварювального трансформатора ТД-300.
4. Способи регулювання зварювального струму.
5. Принцип роботи пристрою вимикання трансформатора на холостому ходу.
6. За рахунок чого забезпечуються крутопадаючі зовнішні характеристики зварювального трансформатора?
7. Чому в діапазоні малих зварювальних струмів трансформатор має вищу напругу холостого ходу?
8. Показати на графіках напругу холостого ходу джерела, напругу запалювання дуги, робочий струм, струм короткого замикання.
9. Призначення ємнісного фільтра у зварювальному трансформаторі.
10. У чому полягає відмінність зварювального трансформатора від силового?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

Дослідження зварювального перетворювача ПСО-300А

Мета роботи: вивчення будови, принципу роботи, правил експлуатації та експериментальне визначення основних характеристик зварювального перетворювача ПСО-300А.

Загальні відомості

Зварювальний перетворювач ПСО-300А призначений для ручного зварювання відкритою дугою постійного струму. Він дорожчий і складніший в експлуатації порівняно із зварювальними трансформаторами, проте якість зварювання при постійному струмі краща, ніж при змінному. Останнє обумовлено великою стійкістю дуги постійного струму.

Перетворювач ПСО-300А складається із зварювального генератора постійного струму типу ГСО-300А і приводного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором, які виконані в одному корпусі на колесах для пересування.

Генератор являє собою чотириполюсну машину постійного струму з незалежним збудженням і послідовною розмагнічуючою обмоткою. Обмотка незалежного збудження *ОЗ* розміщена на двох головних полюсах і живиться від статорної обмотки приводного двигуна через селеновий випрямляч і регулювальний реостат (рис. 7.1). Випрямляч і реостат знаходяться в кожусі, який змонтований на перетворювачі. На двох інших головних полюсах є послідовна розмагнічуюча обмотка *РО*, яка має дві секції і вмикається послідовно з обмоткою якоря.

Магнітні потоки обмотки незалежного збудження $\Phi_{оз}$ та розмагнічуючої обмотки $\Phi_{ор}$ спрямовані назустріч один одному, тому результуючий магнітний потік генератора дорівнює їх різниці:

$$\Phi_{рез}=\Phi_{оз}-\Phi_{ро}\ . \qquad (7.1)$$

При збільшенні струму в колі якоря генератора зростає потік $\Phi_{ро}$, а результуючий потік $\Phi_{рез}$ і відповідно напруга на затискачах генератора зменшується. Таким чином, внаслідок розмагнічуючої дії послідовної розмагнічуючої обмотки збудження забезпечуються крутоспадні зовнішні характеристики генератора, що необхідно для ручного дугового зварювання.

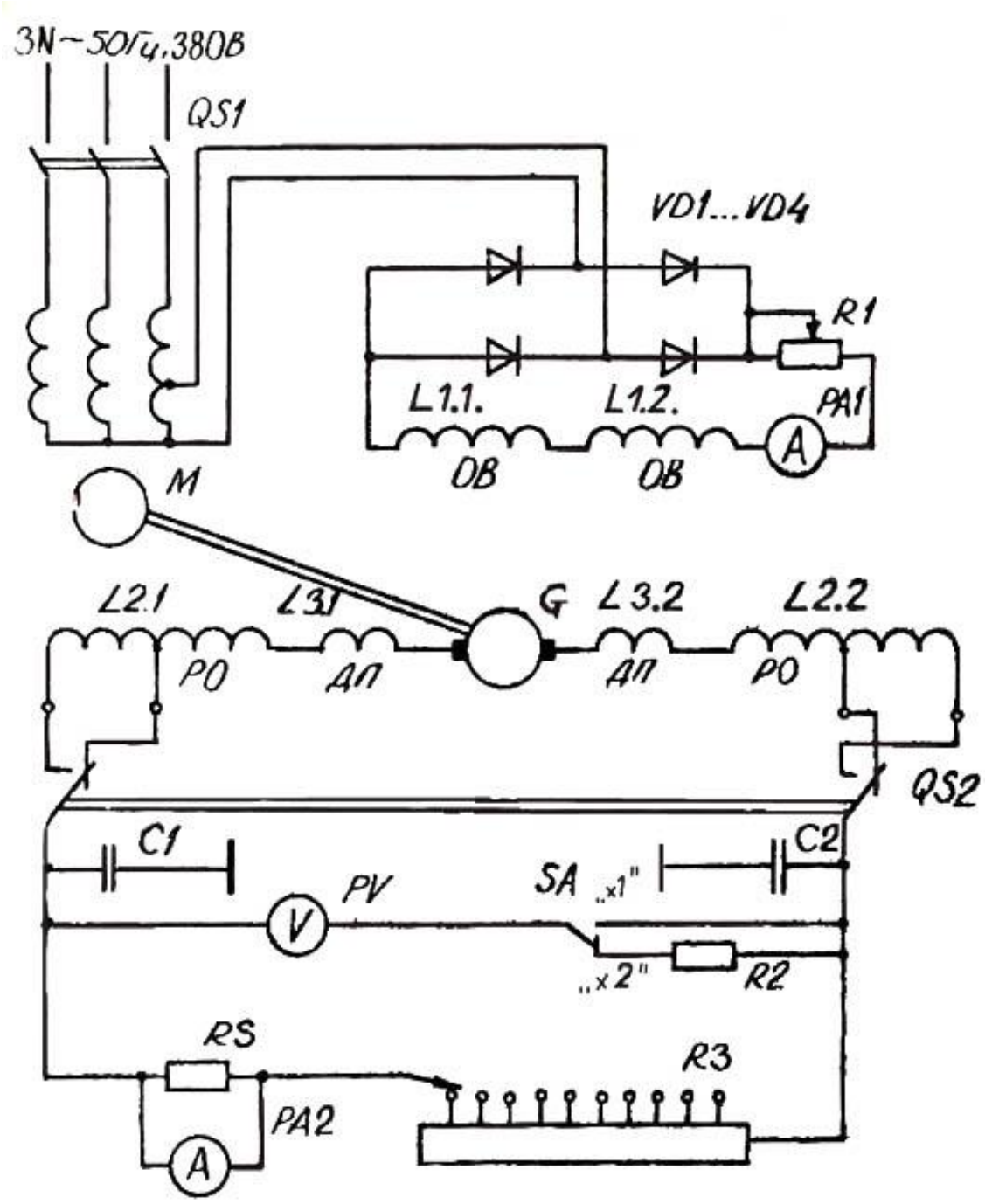


Рис 7. 1. Схема дослідження зварювального перетворювача ПСО-300А

Для забезпечення нормальної комутації на щітках генератор має два додаткові полюси з обмотками *ДП*.

Для отримання спадної зовнішньої характеристики якір генератора повинен обертатися у напрямку, який вказаний стрілкою на боковому щитку. При обертанні в протилежний бік магнітні потоки обмоток спрямовані узгоджено і зовнішня характеристика буде жорсткою. В цьому випадку під час спроби запалити дугу виникає великий струм короткого замикання, що може призвести до виходу з ладу генератора.

Генератор має два діапазони зварювальних струмів: “малі” струми, коли увімкнені обидві секції розмагнічуючої обмотки (сім витків на полюс), і “великі” струми, коли увімкнена одна секція розмагнічуючої обмотки (три витки на полюс). Дошка затискачів генератора має три виводи: “плюс 300 А”, “плюс 160 А” і “мінус”. Затискач “плюс 300 А” відповідає діапазону “великі струми”, затискач “плюс 160 А”– діапазону “малі струми”. Плавне регулювання зварювального струму на кожному діапазоні здійснюється шляхом зміни струму в обмотці незалежного збудження за допомогою регулювального реостата *R1*.

Пуск і зупинка двигуна перетворювача здійснюються пакетним вимикачем QS1, який встановлений у кожусі регулювального пристрою.

Технічні дані зварювального генератора ГСО-300А

	ТР=60%	ТР= 100 %
Потужність, кВт	9	7,5
Напруга, В	32	30
Сила струму, А	300	240
Межі регулювання зварювального струму, А	100–300	
Частота обертання, об/хв	2890	

Програма роботи

1. Вивчити будову, принцип роботи та правила експлуатації зварювального перетворювача ПСО-300А.
2. Дослідити і побудувати зовнішні характеристики $U_г=f(I)$ перетворювача ПСО-300А на діапазонах “малі” і “великі” струми при струмах збудження 1А і 2А.
3. Розрахувати і побудувати на одному графіку із зовнішніми характеристиками генератора вольт-амперну характеристику відкритої дуги $Uд=f(I)$.

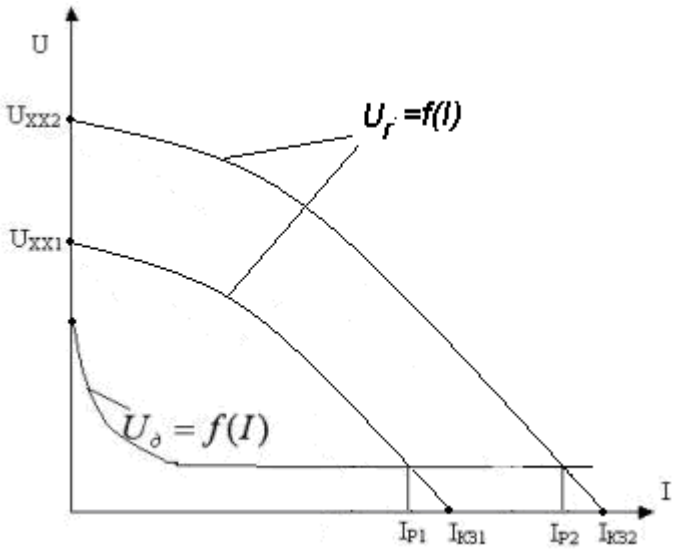


Рис.7.2. Вольт-амперні характеристики зварювального генератора і відкритої дуги

4.Визначити кратність струму короткого замикання зварювального генератора і зробити висновок щодо стійкості зварювального струму.

5.Визначити за зовнішніми характеристиками межі регулювання струму зварювального генератора.

Методика виконання роботи

Для дослідження зовнішніх характеристик $U_г=f(I)$ зварювального перетворювача підбирають прилади згідно з його технічними даними. Струм навантаження генератора змінюють від нуля до короткого замикання реостатом *R3*.

При струмах навантаження, близьких до режиму короткого замикання, для підвищення точності відліку за вольтметром *PV* перемикач *SA* (тільки на час замикання електрода на навантажувальний опір *R3*) слід перевести з положення “2” в положення “1”.

Результати експериментів заносять у табл. 7.1.

7.1. Результати експериментів

Діапазон “малі струми” “+160А”				Діапазон “великі струми” “+300А”			
$I_з$=1 А		$I_з$=2 А		$I_з$=1 А		$I_з$=2 А	
$U_г$, В	I, А	$U_г$, В	I, А	$U_г$, В	I, А	$U_г$, В	I, А

За даними табл. 7.1 будують на одному графіку чотири зовнішні характеристики зварювального перетворювача $U_г=f(I)$.

Вольт-амперну характеристику відкритої дуги із сталевим електродом розраховують за формулою:

$$U_d = 8 + 2 \cdot l + \frac{20 + 15l}{I}, \qquad (7.1)$$

де I – сила струму дуги, А;

$l = \frac{d_e + 2}{2}$ – довжина дуги, мм;

d_e – діаметр електрода, мм.

Напругу дуги визначають для струмів: 10; 30; 50; 100; 200; 300 та 400 А. Напругу запалювання дуги постійного струму приймають 30 – 35 В.

Результати розрахунку заносять у табл. 7.2

7.2. Результати розрахунку

d_e= , l=

I, А	0	10	30	50	…	400
U_d, В						

За результатами розрахунку на графіку із зовнішніми характеристиками зварювального генератора будують вольт-амперну характеристику відкритої дуги $U_г=f(I)$.

Струм короткого замикання зварювального генератора визначають як абсцису точки перетину його зовнішньої характеристики з віссю абсцис, а робочий струм – як абсцису точки перетину зовнішньої характеристики генератора з вольт-амперною характеристикою дуги. Генератор працює стійко, якщо кратність струму короткого замикання не перевищує 1,4.

Межі регулювання струму зварювального генератора визначають за точками перетину вольт-амперної характеристики дуги із зовнішніми характеристики генератора при мінімальному і максимальному струмах в обмотці незалежного збудження.

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електрична схема.

3. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
4. Таблиці експериментальних та розрахункових даних.
5. Графіки залежностей *Uг=f(I)* та *Uд=f(I)*.
6. Дані визначення кратності струму короткого замикання генератора і меж регулювання зварювального струму.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Переваги і недоліки зварювального генератора порівняно із зварювальним трансформатором.
2. Конструкція зварювального перетворювача ПСО-300А , особливості його експлуатації.
3. За рахунок чого отримані крутопадаючі зовнішні характеристики генератора?
4. Способи регулювання зварювального струму.
5. Призначення розмагнічуючої обмотки *РО* та обмотки додаткових полюсів *ДП*.
6. Основна відмінність зварювального генератора від силового.
7. Показати на графіках напругу холостого ходу джерела та напругу запалювання дуги , робочий струм та струм короткого замикання.
8. Призначення опорів *R1*, *RS* і *R3* (див. рис. 7.1).
9. Що може відбутися при спробі зварювання за допомогою перетворювача без перевірки правильності обертання і чому?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

Дослідження зварювального випрямляча ВДГ-301

Мета роботи: вивчення будови, принципу роботи, правил експлуатації та дослідження зовнішніх характеристик зварювальних випрямлячів.

Загальні відомості

Зварювальні випрямлячі поєднують в собі переваги зварювальних генераторів і зварювальних трансформаторів. Порівняно із зварювальними генераторами вони мають вищі ККД і $cos\varphi$, меншу масу, простіші і надійніші в експлуатації. Порівняно із зварювальними трансформаторами вони забезпечують кращу якість зварювання, оскільки дуга живиться постійним струмом. Трифазні зварювальні

випрямлячі на відміну від однофазних трансформаторів рівномірно завантажують електричну мережу.

Для випрямлення використовують селенові чи кремнієві напівпровідникові вентилі, які з'єднані за трифазною мостовою схемою. Примусове охолодження вентилів здійснюється вбудованим вентилятором.

Зварювальні випрямлячі залежно від призначення можуть мати крутоспадну або жорстку зовнішню характеристику. Для зварювання відкритою дугою використовують випрямлячі типу ВД-201, ВД-301, ВД-401, які мають крутоспадні зовнішні характеристики. Для зварювання під шаром флюсу або в середовищі захисного інертного газу застосовують випрямлячі типу ВДГ-301, ВДГ-302, ВДГ-601 з жорсткими зовнішніми характеристиками.

Випрямляч ВДГ-301 призначений для механізованого зварювання в середовищі вуглекислого газу. Він складається з трифазного знижувального трансформатора *TV* з нормальним розсіюванням, керованого дроселя намагнічування *ДН*, випрямних селенових блоків *UZ3.1* і *UZ3.2*, вентилятора, пускорегулювальних і захисних апаратів (рис. 8.1).

Дросель насичення має шість робочих обмоток *L1…L6*, увімкнених послідовно в кожне плече випрямляча, та дві обмотки підмагнічування: обмотку насичення *ОН* та обмотку керування *ОК*.

Обмотка керування *ОК* дроселя насичення *ДН* одержує живлення від перекомпенсованого ферорезонансного стабілізатора напруги *TS* через випрямляч *UZ2* і регулювальний резистор *R2*. При зміні напруги мережі напруга на виході стабілізатора і струм у обмотці керування *ОК* залишаються незмінними.

Ступінчасте регулювання зварювального струму уставки здійснюється перемиканням відгалужень вторинної обмотки знижувального трансформатора (три ступені), а плавне, в межах кожного ступеня – зміною індуктивності дроселя насичення *ДН* шляхом регулювання струму в обмотці керування *ОК*.

У зварювальному випрямлячі передбачене примусове повітряне охолодження діодів вентилятором, що приводиться електродвигуном *М*. Вітрове реле *SP* здійснює блокування, яке не дозволяє включити трансформатор випрямляча при непрацюючому вентиляторі (відсутності потоку охолоджувального повітря).

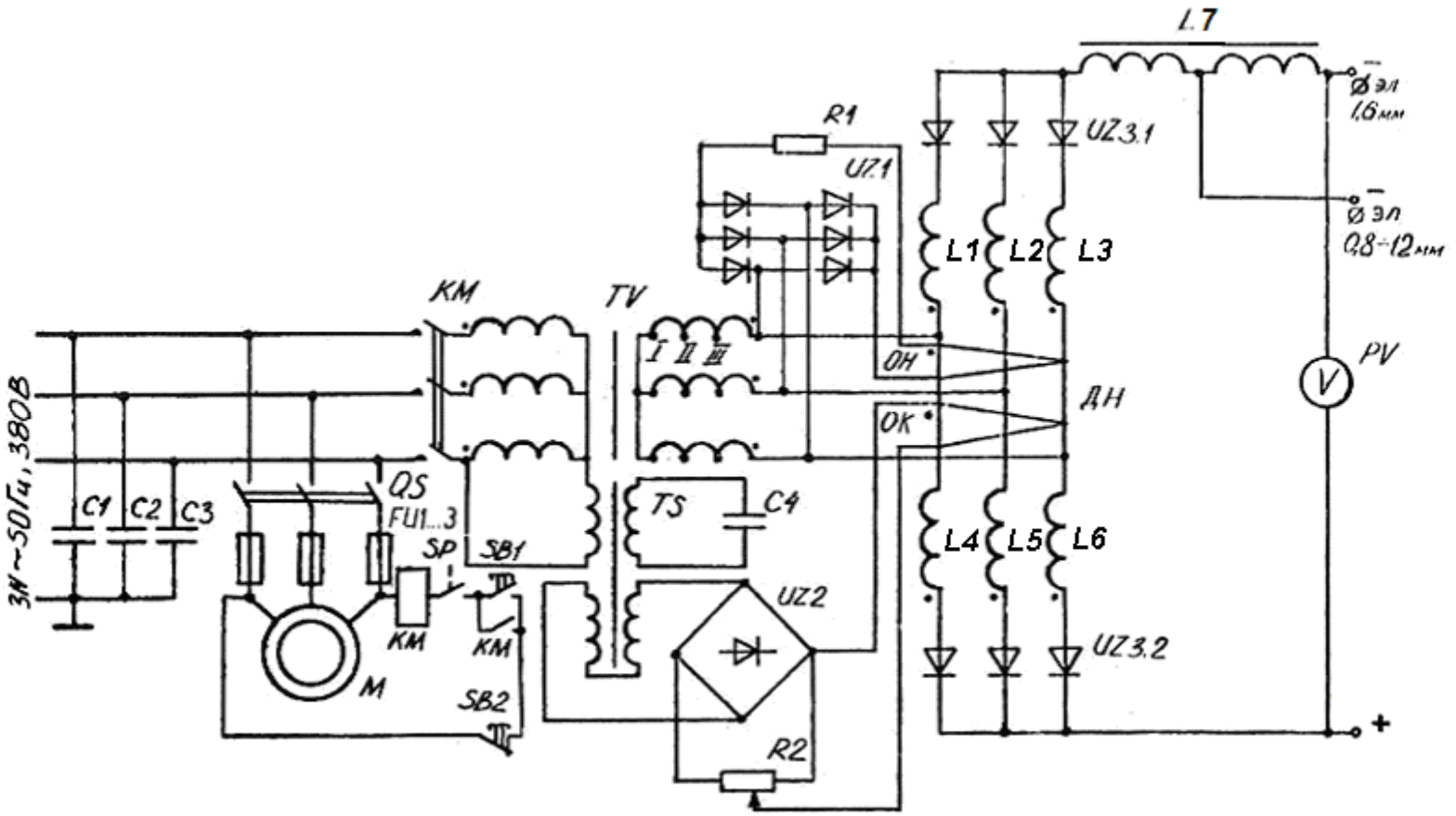


Рис 8. 1. Схема зварювального випрямляча ВДГ-301

Для зменшення струму короткого замикання під час запалювання дуги в коло зварювального струму включений дросель *VL7* з повітряним зазором. Його індуктивність змінюється ступінчасто залежно від діаметра електрода, який використовується для зварювання.

Технічна характеристика зварювального випрямляча ВДГ-301

Номінальний зварювальний струм при ТР=60 %	300
Номінальна робоча напруга, В	30
Межі регулювання зварювального струму, А	50-320
Напруга живлення, В	380
ККД,%	71
Коефіцієнт потужності	0,88

Програма роботи

1. Вивчити будову, принцип роботи та правила експлуатації зварювального випрямляча.
2. Перевірити дію блокування вмикання знижувального трансформатора зварювального випрямляча без включення вентилятора охолодження.
3. Дослідити і побудувати зовнішні характеристики *U=f(I)* зварювального випрямляча ВДГ-301 на трьох ступенях регулювання зварювального струму при мінімальному і максимальному струмах в обмотці керування дроселя насичення.

Методика виконання роботи

Для дослідження зовнішніх характеристик зварювального випрямляча вибирають прилади згідно з технічними характеристиками досліджуваного апарата. Як навантаження використовують магазин опорів. Під час дослідження найбільший струм навантаження не повинен перевищувати максимальний робочий струм випрямляча. Оскільки зварювальний випрямляч ВДГ-301 має пологоспадні характеристики, то для запобігання виникненню недопустимо великого струму дослід короткого замикання виконувати не можна. Під час зварювання в середовищі захисних газів як електрод використовується голий сталевий дріт діаметром 0,8–1,6 мм і струм короткого замикання обмежується опором самого електрода.

Результати досліду заносять у табл. 8.1.

8.1. Результати досліду

I ступінь				II ступінь				III ступінь			
$I_{ок\ мін.}$		$I_{ок\ макс.}$		$I_{ок\ мін}$		$I_{ок\ макс.}$		$I_{ок\ мін.}$		$I_{ок\ макс}$	
U, В	*I*, А	*U*, В	*I*, А	*U*, В	*I*, А	*U*, В	*I*, А	*U*, В	*I*, А	*U*, В	*I*, А

За даними табл. 8.1 будують на одному графіку зовнішні характеристики зварювального випрямляча *U=f(I).*

Зміст звіту

1. Мета і програма роботи.
2. Електрична схема випрямляча.
3. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
4. Таблиця експериментальних даних.
5. Графіки залежності *U=f(I).*
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Переваги і недоліки зварювальних випрямлячів.
2. Область застосування зварювальних випрямлячів з крутоспадною і жорсткою зовнішніми характеристиками.
3. Конструкція зварювального випрямляча ВДГ-301.
4. Спосіб ступінчастого регулювання зварювального струму випрямляча.
5. Призначення вентилятора і яке передбачене блокування.
6. Чому обмотка керування дроселя насичення живиться через стабілізатор напруги?
7. Призначення і принцип роботи дроселя насичення.
8. Для чого в колі зварювання встановлений дросель з повітряним зазором?
9. Призначення конденсаторів *C1…C3.*
10. Спосіб плавного регулювання зварювального струму випрямляча.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9

Дослідження термоелектричного холодильника

Мета роботи: вивчення будови, принципу роботи та дослідження термоелектричного холодильника ХАТЭ-12.

Загальні відомості

Основою термоелектричних холодильників та теплових насосів є термоелементи, які виконані у вигляді послідовно з'єднаних за допомогою комутаційних пластин двох напівпровідникових віток, одна з яких має електронну (*n*–провідник), а друга – діркову (*p*-провідник) провідність. Термоелементи з'єднують послідовно в термобатареї. Конструктивно термоелектричну батарею виконують так, що системи спаїв створюють дві поверхні, які мають радіатори.

Принцип отримання холоду чи теплоти з використанням термоелементів заснований на ефекті Пельтьє, який полягає в тому, що під час пропускання постійного електричного струму через різнорідні, з'єднані один з одним, напівпровідники, крім виділення Джоулевої теплоти в місці контакту (спаю) *p*-напівпровідника з *n*-напівпровідником при напрямку струму від першого до другого, відбувається виділення теплоти, а в місці контакту *n*-напівпровідника з *p*-напівпровідником теплота поглинається. В установці (рис.9.1) теплота поглинається на спаї 1 ("холодний спай"), а виділяється на спаї 2 ("гарячий спай"). У випадку зміни напрямку струму теплота виділяється на спаї 1, а на спаї 2 поглинається. Таким чином, термоелектричні установки є зворотними машинами. В режимі теплового насоса установка відбирає теплоту з навколишнього середовища і передає її в об'єм, що нагрівається, а в режимі холодильника - відбирає теплоту з холодильної камери і передає її в навколишнє середовище.

Перепад температур між "гарячими" і "холодними" спаями термобатареї залежить від матеріалу, з якого виготовлені напівпровідники з *n*- та *p*-провідністю, тепло- та електропровідності комутаційних пластин 1 і 2 (рис.9.1), якості теплоізоляції 6 між елементами установки, конструктивного виконання та величини струму через термобатарею.

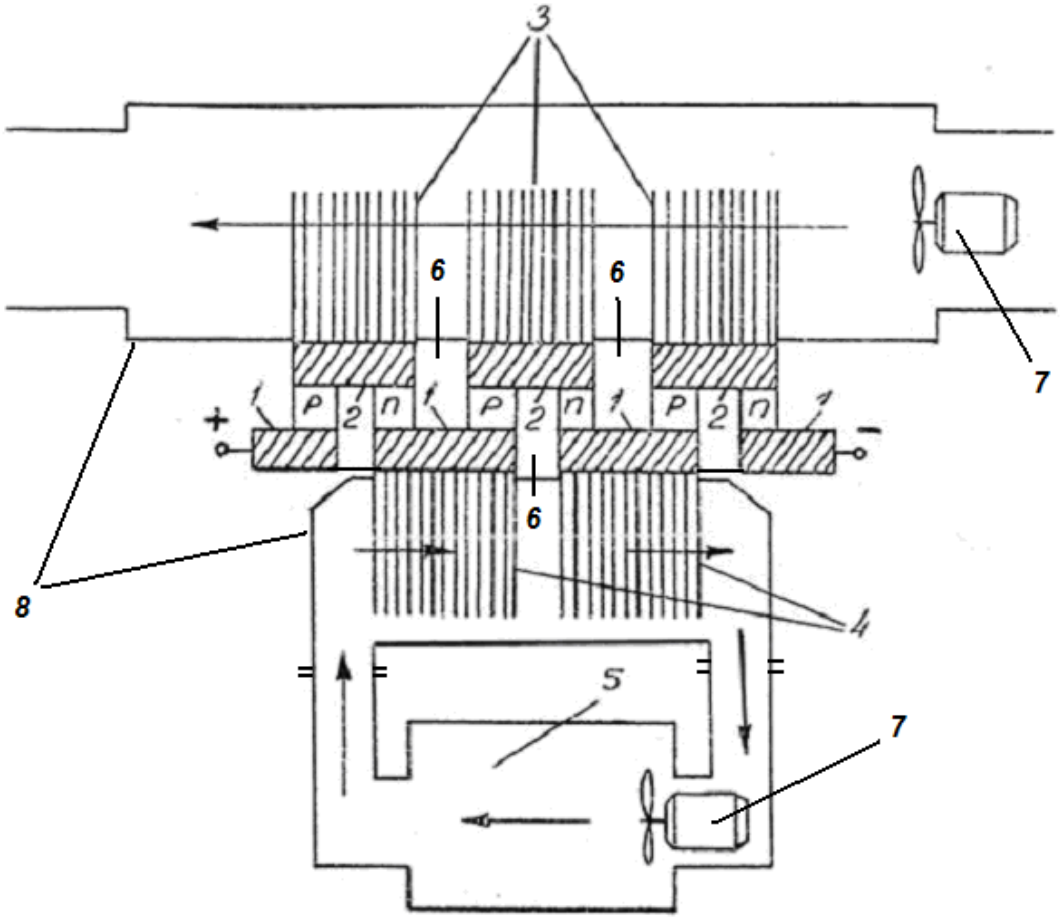


Рис 9.1. Схема термоелектричного холодильника

Для покращення перенесення теплоти від радіаторів 3 і 4 застосовується примусова конвекція середовища за допомогою пристроїв 7 (вентиляторів, насосів).

Теплота Пельтьє пропорційна першому ступеню струму I:

$$Q_n = \pm I \cdot \Pi \cdot t \,, \qquad (9.1)$$

де Π – коефіцієнт Пельтьє , який залежить від матеріалу напівпровідників;

t – час протікання струму.

Теплота Джоуля пропорційна квадрату струму :

$$Q_{дж} = I^2 R \cdot t \,, \qquad (9.2)$$

де R – електричний опір проходженню струму I.

Якщо алгебраїчно скласти криві Q_n і $Q_{дж}$ (рис. 9.2), то можна отримати результуючі криві $Q_{рез}$, які характеризують тепловий баланс “холодних” та “гарячих” спаїв термобатареї при різних значеннях струму.

З рис.9.2 видно, що максимальне зниження температури “холодного” спаю має місце при певному значенні струму $I_{опт}$. Подальше збільшення струму призводить до превалювання теплоти Джоуля над теплотою Пельтьє, в результаті чого температура холодного спаю підвищується.

Холодильник ХАТЭ-12 (див. рис.9.1) складається з корпуса, холодильної камери 5 і кришки 8, в яку вмонтований вентилятор 7 і термоелектрична батарея. Вентилятор має дві крильчатки, одна з яких охолоджує радіатор 3 “гарячого” спаю термобатареї, а друга забезпечує циркуляцію повітря в холодильній камері 5 через радіатор 4 “холодного“ спаю термобатареї.

Напівпровідники з *p*-провідністю виготовлені із сплаву ПВДХ (телур, вісмут, селен), з *n*-провідністю – із сплаву ПВЭХ (телур, вісмут, селен), а комутаційні пластини – з міді. В термобатареї послідовно з’єднані 250 термоелементів.

У холодильнику передбачено два режими роботи: основний і допоміжний. В основному режимі термобатарея безпосередньо приєднується до джерела живлення, а в допоміжному – через опір.

Ефективність роботи термоелектричного холодильника суттєво залежить від стабільності напруги джерела живлення. При збільшенні пульсації чи відхиленні напруги від номінального значення миттєве значення струму через термоелектричну батарею відрізняється від оптимального, в результаті чого холодопродуктивність термобатареї падає. Для ефективної роботи термоелектричного холодильника коефіцієнт пульсації випрямленої напруги не повинен перевищувати 4 %, що досягається використанням джерел постійного струму, або випрямлячів змінного струму із застосуванням якісних згладжуючих фільтрів.

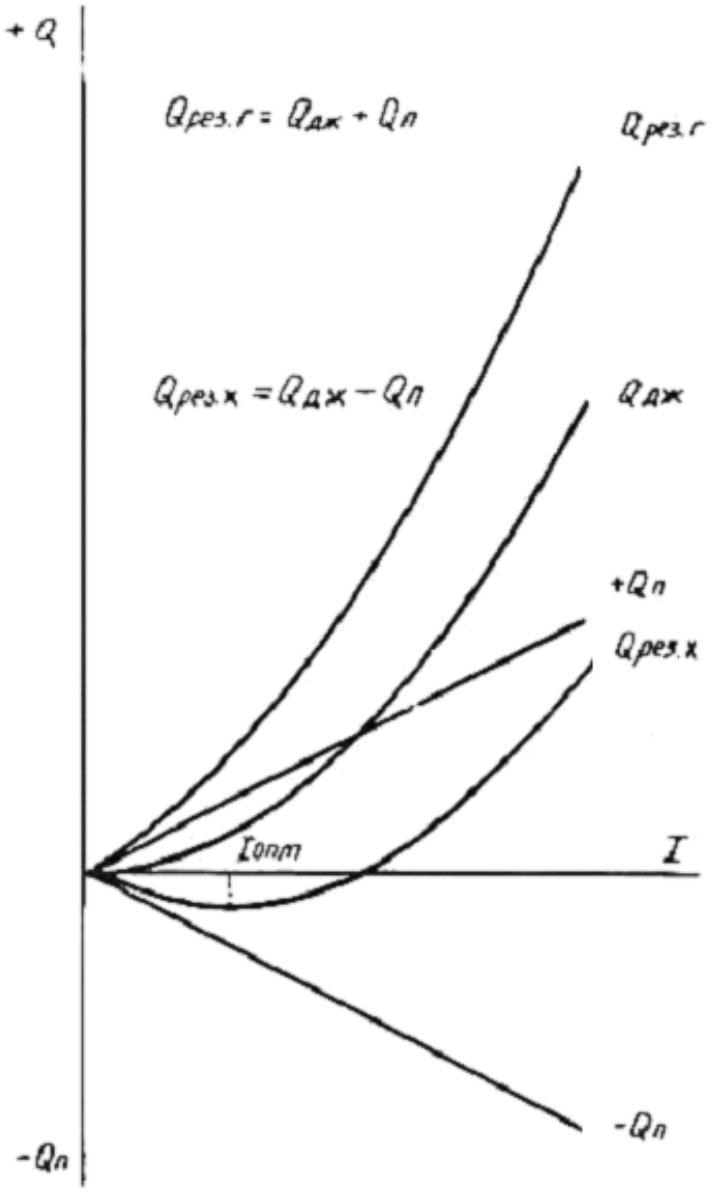


Рис. 9.2. Залежність теплового балансу термоелектричного холодильника від струму

Технічна характеристика холодильника ХАТЭ-12

Напруга живлення , В	12
Споживана потужність , Вт:	
в основному режимі	65
в допоміжному режимі	30
Перепад температур навколишнього середовища і холодильної камери, °С:	
в основному режимі	19
у допоміжному режимі	15
Об'єм холодильної камери, дм ^{3}	12

Програма роботи

1. Вивчити будову та принцип роботи термоелектричного холодильника.
2. За допомогою осцилографа дослідити пульсацію випрямленої напруги при різних параметрах згладжуючого *L-C* фільтра.
3. Дослідити і побудувати залежність різниці температур "гарячого" і "холодного" спаїв термоелектричної батареї від величини струму $\Delta\theta = f(I)$ при мінімальному коефіцієнті пульсацій.
4. Дослідити і побудувати залежність різниці температур "гарячого" і "холодного" спаїв термоелектричної батареї від величини коефіцієнта пульсації напруги живлення $\Delta\theta = \varphi(k_n)$ при одному й тому ж діючому значенні струму через термобатарею.

Методика виконання роботи

Всі досліди проводяться для основного режиму роботи термоелектричного холодильника (положення перемикача на кришці "1") за схемою, наведеною на рис. 9.3. Напруга на двигуні вентилятора повинна становити 12 В.

Пульсацію випрямленої напруги досліджують за допомогою осцилографа *PV3*, який під'єднується до затискачів термоелектричної батареї. Живлення на батарею подається від випрямляча *UZ* через потенціометр *R1* і регулювальний згладжувальний фільтр *L-C.* Дослідження проводять при максимальному і мінімальному повітряному зазорі в дроселі для кожного із значень ємнісного плеча згладжуючого фільтра. Діюче значення струму через термобатарею встановлюють 3 А.

Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги визначається з виразу:

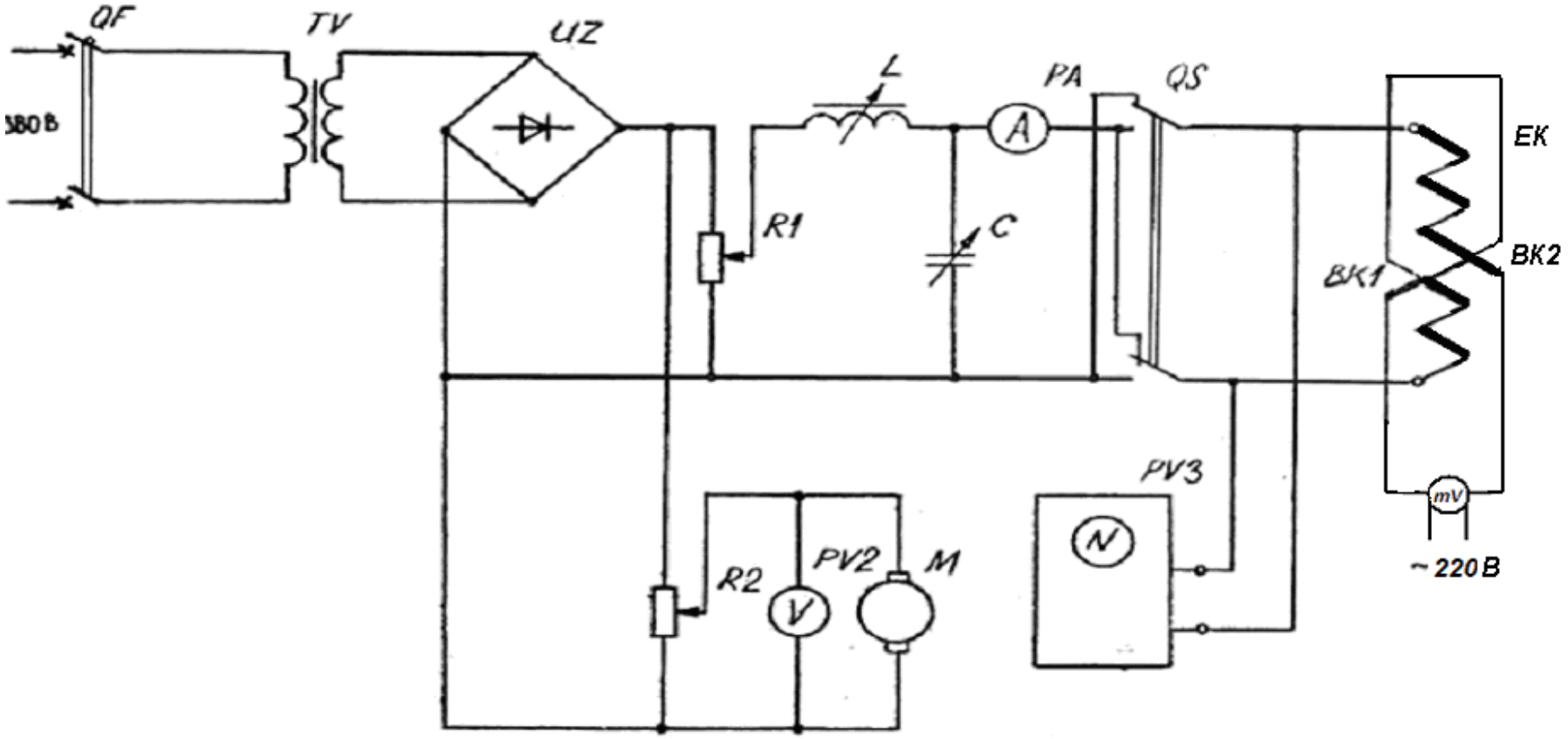


Рис 9.3. Схема дослідження термоелектричного холодильника

$$k_n = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \cdot 100\,\%, \qquad (9.3)$$

де $U_{\max}$ і $U_{\min}$ - відповідно максимальне і мінімальне миттєве значення напруги, виміряне осцилографом.

Результати досліду і розрахунку заносять у табл. 9.1.

9.1. Результати досліду і розрахунку при *I*=

C, мкф	Максимальний повітряний зазор, мм			Мінімальний повітряний зазор, мм		
	$U_{\max}$	$U_{\min}$	k_n	$U_{\max}$	$U_{\min}$	k_n

Під час дослідження залежності $\Delta\theta$ = *f(I)* через термобатарею пропускають струм 1, 2 і 3 А та для кожного значення струму записують різницю температур "холодного" і "гарячого" спаїв через 1 хв протягом 6 хв. Різницю температур вимірюють двома зустрічно включеними термопарами, одна з яких встановлена на радіаторі "гарячого" спаю термобатареї, а друга – на радіаторі "холодного" спаю. Результати досліду заносять у табл. 9.2.

Перед кожним новим дослідом необхідно вирівнювати температуру "гарячих" та "холодних" спаїв термобатареї шляхом зміни напрямку струму за допомогою перемикача *QS*.

Усталені значення різниці температур спаїв термобатареї при кожному значенні струму визначають графічно. Інтервал t при цьому беруть 2 хв, як показано на рис. 9.4.

9.2. Результати досліду

t, хв		0	1	2	3	4	5	6
$\Delta\theta$,°C	*I*=1 А	0						
	I=2 А	0						
	I=3 А	0						

За результатами досліду будують графіки залежностей $\Delta\theta$ = *f(t)* та $\Delta\theta$ = *f(I)*.

Для дослідження впливу пульсації напруги на різницю температур "холодних" та "гарячих" спаїв термобатареї досліди проводять для значень коефіцієнта пульсації, визначених у табл. 9.1, при силі струму

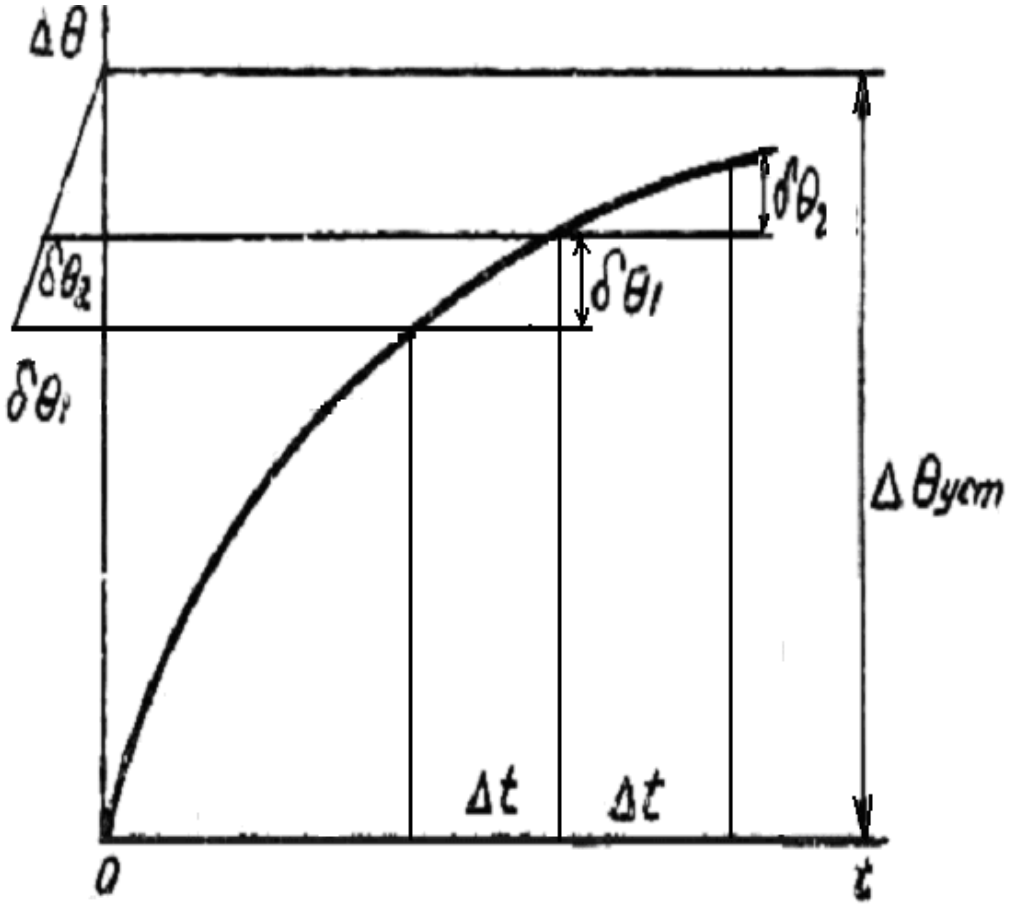


Рис 9.4. Залежність різниці температур холодного і гарячого спаїв термоелектрохолодильника від температури

через термобатарею 3 А. Відлік різниці температур спаїв виконується для кожного значення коефіцієнта пульсації через 3 хв після початку досліду.

Результати досліду зводять у табл. 9.3.

9.3. Результати досліду

I=

k_n, %				
$\Delta\theta$, °С				

За результатами експерименту будують залежність $\Delta\theta = \varphi(k_n)$.

Зміст звіту

1. Мета та програма роботи.
2. Електрична схема (рис. 9.3).
3. Перелік обладнання та вимірювальних приладів.
4. Таблиці дослідних та розрахункових даних.
5. Графіки залежностей $\Delta\theta = f(t)$, $\Delta\theta = f(I)$, $\Delta\theta = \varphi(k_n)$.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Суть ефекту Пельтьє.
2. Конструкція термоелектричної батареї та холодильника ХАТЭ-12.
3. Що необхідно зробити, щоб термоелектричний холодильник перетворити на тепловий насос?
4. Від чого залежить перепад температур між “гарячими” та “холодними” спаями термобатареї?
5. Пояснити отримання від’ємного балансу теплоти на “холодних” спаях термоелектричної батареї.
6. Як впливають величини сили струму та коефіцієнта пульсації напруги живлення на холодопродуктивність установки і чому?
7. Методика визначення коефіцієнта пульсації випрямленої напруги.
8. Як впливають величина повітряного зазора осердя дроселя та значення ємності згладжуючого *LC*-фільтра на коефіцієнт пульсації випрямленої напруги?
9. Методика визначення усталеного значення перепаду температури за початковою частиною кривої нагрівання.
10. За рахунок чого теплові насоси мають електричний ККД більший за одиницю?

Список літератури

1.Електричне освітлення та опромінення : навч. посіб. / Р. В. Кушлик та ін. Харків : ТОВ «Планета-прінт», 2016. 332 с.

2.Електротехнологічні установки та системи : курс лекцій / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад. В. О. Бржезицький, Я. О. Гаран, М. Ю. Лапоша, Є. О. Троценко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 136 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/37602/1/Elektrotekhnolohichni-ustanovky-ta-systemy_KL.pdf

3.Кушлик Р.В., Назаренко І.П., Кушлик Р.Р. Практикум з навчальної дисципліни "Електротехнології і теплові процеси". Мелітополь: ФОП Ландар С.М., 2021. 113 с. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/14171/1/Практикум%20%20ЕТТП_1-5.1.pdf

4.Лабораторний практикум з навчальної дисципліни "Електротехнології в АПК" для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад. В. Гулевський та ін. Мелітополь : ФОП Белень В.В., 2021. 48 с. URL: http://elar.tsatu.edu.ua/bitstream/123456789/14265/1/Практикум.pdf

5.Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Стаднійчук І. П. Електротехнології в АПК : навчальний посібник. Вінниця : ТОВ «ТВОРИ», 2020. 272 с. URL: http://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/25272.pdf

6.Павленко Т. П., Петренко О. М., Лукашова Н. П. Електротехнологічні установки : конспект лекцій / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 130 с. URL: https://eprints.kname.edu.ua/50214/1/2018%20печ.%20206%20Л%20-%20ЕУ%20-%20укр_исправл..pdf

7.Agricultural land: crop production or photovoltaic power plants. /V. Havrysh et al. Sustainability. 2022. URL: https://doi.org/10.3390/su14095099.

8.Agricultural residue management for sustainable powergeneration: the poland case study / V. Havrysh et al. Appl. 2021.URL: https://doi.org/10.3390/app11135907.

Зміст

Методичні рекомендації щодо проведення лабораторних робіт.....3
Правила техніки безпеки лід час виконання лабораторних робіт у лабораторії 5
Лабораторна робота 1. Дослідження відкритих нагрівальних елементів 6
Лабораторна робота 2. Дослідження трубчастих електричних нагрівачів……..……12
Лабораторна робота 3. Визначення питомого опору води і розрахунок основних параметрів електродного водонагрівача……..…20
Лабораторна робота 4. Дослідження і перевірочний розрахунок електродного водонагрівача……..27
Лабораторна робота 5. Дослідження установки індукційного нагрівання……..……35
Лабораторна робота 6. Дослідження зварювального трансформатора ТД-300 ……..……..40
Лабораторна робота 7. Дослідження зварювального перетворювача ПСО-ЗОО А ……..49
Лабораторна робота 8. Дослідження зварювального випрямляча ВДГ-301 ……..……...54
Лабораторна робота 9. Дослідження термоелектричного холодильника..59
Список літератури……..……..68

Навчальне видання

Електротехнології в агропромисловому комплексі

Методичні рекомендації

Укладач
Бацуровська Ілона Вікторівна

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 4,5.
Тираж 20 прим. Зам. №_____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.10.2013 р.