

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА ПРИСТРОЇ

Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт
для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

Кропивницький 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Факультет будівництва,
транспорт та енергетики

Кафедра електротехнічних
систем та енергетичного
менеджменту

**ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ УСТАНОВКИ ТА
ПРИСТРОЇ**

Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт
для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»

*Ухвалено на засіданні
кафедри "ЕТС та ЕМ"
Протокол № 16 від 17.05.2023 р.*

Кропивницький 2023

Електротехнологічні установки та пристрої: методичні вказівки для виконання лабораторних робіт для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / [уклад.: Р.В. Телюта, О.А.Козловський, С.П. Плешков]; Міністерство освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. - 75 с.

Укладачі: доцент, к.т.н. Р. В. Телюта,

доцент, к.т.н. О. А. Козловський,

доцент, к.т.н. С. П. Плешков.

Рецензент: А. М. Мацуй, докт. техн. наук, проф. каф. АВП

Центральноукраїнського національного технічного університету.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	6
ПРАВИЛА 3 ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	7
ВСТУП	13
Лабораторна робота № 1	
“Дослідження характеристик електричної дуги”.....	16
Лабораторна робота № 2	
“Дослідження впливу електродугових установок на мережу живлення”.....	29
Лабораторна робота № 3	
“Дослідження характеристик джерела живлення зварювальної дуги”.....	36
Лабораторна робота № 4	
“Дослідження головних енергетичних параметрів печі опору і системи двопозиційного регулювання температури (потужності)”.....	48
Лабораторна робота № 5	
“Дослідження процесу електролізу міді”.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75

ПЕРЕДМОВА

Виробнича діяльність людини і її побут нестримно наповнюються електротехнологічними установками (ЕТУ) та пристроями. Сфера застосування цих установок з кожним роком розширюється і електротехнологія витісняє багато традиційних технологічних процесів (ТП). Розвиток електротехнологічних процесів (ЕП) забезпечується розвитком енергетики країни, будівництвом, реконструкцією та модернізацією нових підприємств, заводів, електростанцій, спорудженням потужних ліній електропередач. Більшість ЕП енергоємні і тому ЕУ є найбільш суттєвими споживачами електричної енергії.

Під електротехнологією розуміється галузь електротехніки, яка вивчає пряме використання енергії електричного струму, електричного або магнітного полів, що підводиться безпосередньо до технологічного об'єкту і перетворюється в його робочій зоні в інші види енергії для їх використання, в результаті чого забезпечується реалізація заданого ТП. ЕП є енергоємними процесами, тому підвищення рівня ефективності використання електричної енергії в цих процесах являє собою важливу ланку в реалізації задач економіки електротехнології. ЕУ отримали широке розповсюдження в чорній і кольоровій промисловості, машинобудуванні і ряду інших галузей промисловості.

Ефективне виконання електротехнічних процесів, а також їх удосконалення нерозривно пов'язано з автоматизацією, успішне використання якої засновано на глибокому розумінні фізичних процесів, що відбуваються в установках. Тому при проектуванні і експлуатації систем електропостачання з необхідною надійністю, якістю електроенергії і раціональним режимом електроспоживання необхідно мати глибокі фізичні уявлення про технологію перетворення

електричної енергії в інші види, сфери застосування і перспективах розвитку ЕТУ, їх електричних режимах, обумовлених особливостями перетворення енергії і характером технологічного режиму, про конструктивні особливості електрообладнання систем автоматизації і електропостачання, а також шляхи раціонального перетворення електричної енергії, екологію та охорону праці.

ПРАВИЛА З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторні заняття проводяться з дотриманням загальних правил безпеки при роботі на електроустановках. Зокрема в лабораторії є ряд специфічних особливостей, зумовлених додатковими вимогами по відношенню до охорони праці при проведенні робіт. Так, деякі лабораторні стенди на робочих місцях, мають подвійне живлення змінним (робочим) або постійним (оперативним) струмом, в зв'язку з чим для повного знеструмлення стендів необхідно відключити їх двома комутаційними апаратами.

Вимоги безпеки праці перед початком робіт:

- студентам забороняється знаходитися в лабораторії у верхньому одязі;
- студенти повинні привести в належний стан свій одяг та робоче місце;
- студенти повинні використовувати тільки необхідне електрообладнання згідно вимог тематичних вказівок до роботи;
- універсальні стенди для збирання електричних схем повинні бути справними та укомплектовані діючими технічними засобами вимірювань;
- виконання робіт повинно здійснювались у відповідності з порядком виконання робіт, який наведений у тематичних вказівках;
- перед збиранням принципових електричних схем викладач, лаборант та студенти повинні переконатися, що комутаційний апарат (автоматичний вимикач), встановлений на кожному робочому місці, розімкнений;
- викладач, навчальний майстер та студенти повинні переконатися, що лабораторний автотрансформатор, встановлений на

робочому місці, знаходиться у вимкненому положенні, а його повзунок розташований на позначці «0»;

- при збиранні схем слід спочатку переконатись у справності клем електрообладнання, а потім надійно приєднувати з'єднувальні проводи до клем електричних машин, вимірювальних приладів та до іншого електрообладнання, яке використовується у лабораторній роботі. У випадку несправності клем повідомити про цей факт викладачу чи навчальному майстру;

- при збиранні схем з'єднувальні проводи не повинні перетинатися та знаходитись у розтягнутому стані, а також не повинні знаходитись на шкалах вимірювальних приладів, обмотках реостатів та іншого електрообладнання, яке використовується у лабораторній роботі;

- забороняється розмикати вторинну обмотку вимірювальних трансформаторів струму, якщо первинні обмотки вимірювальних трансформаторів приєднані до мережі живлення та знаходяться під напругою;

- у випадку використання конденсаторної батареї студенти повинні переконатися, що конденсатори батареї розряджені;

- у випадку використання котушки індуктивності студенти повинні переконатися, що індуктивна котушка не має електрорушійної сили самоіндукції;

- у випадку використання реостатів регулювання струмів необхідно встановити повзуни реостатів в необхідні положення;

- за вказівкою викладача студенти повинні встановити перемикачі номінальних меж вимірювання на вимірювальних приладах, враховуючи номінальні струми навантаження;

- комутація та робота електричних кіл, які зібрані на універсальних стендах, без заземлення не допускається;

- універсальний стенд, який знаходиться під напругою, не можна залишати без нагляду, студенту забороняється без дозволу викладача залишати робоче місце;

- у випадку виникнення будь - яких несправностей у роботі універсального стенду, вимірювальних приладів, електричного навантаження студентам необхідно терміново відключити стенд від джерела живлення та повідомити навчального майстра та викладача.

Вимоги безпеки праці при виконанні робіт:

- студенти повинні при проведенні лабораторних робіт здійснювати постійний нагляд за порядком на робочому місці;

- студенту забороняється без дозволу викладача залишати робоче місце, а навчальному майстру та викладачеві – приміщення аудиторії;

- студентам забороняється без дозволу викладача або навчального майстра користуватись іншим електрообладнанням та виконувати перемикання тумблерів при роботі електричних схем на стендах;

- студентам забороняється торкатися комутаційних апаратів та захисних кожухів на електроосвітлювальному навантаженні, реостатах;

- студентам забороняється залишати робоче місце без нагляду без попередження викладача або навчального майстра, якщо на універсальних стенд подана напруга;

- студентам забороняється торкатися неізольованих ділянок електричних кіл, які знаходяться під напругою;

- студенти повинні контролювати, щоб параметри електрообладнання, яке використовується в лабораторній роботі, не перевищували номінальних або заданих викладачем значень;

- студенти повинні у випадку закінчення лабораторної роботи або перерви у лабораторній роботі встановити повзунок лабораторного автотрансформатора на позначку «0», відключити автоматичний

вимикач, який встановлений на універсальному стенду та повідомити викладача або навчального майстра.

Вимоги безпеки при закінченні робіт:

- студенти повинні після закінчення лабораторної роботи привести робоче місце у належний стан;

- студенти повинні довести до відома викладача або навчального майстра про будь-які несправності електрообладнання та електровимірювальних приладів, що були помічені при виконанні лабораторної роботи;

- аудиторія повинна вентилуватися після проведення кожної лабораторної роботи.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях:

- у випадку різкого руху стрілки електровимірювального приладу до кінця його шкали при виконанні лабораторної роботи студенти повинні вимкнути автоматичний вимикач, встановлений на робочому місці, знеструмити універсальний стенд та повідомити про це викладача або навчального майстра;

- у випадку появи диму при виконанні лабораторної роботи студенти по винні негайно повідомити про це викладача і навчального майстра та відійти на відповідну відстань від місця задимлення;

- студенти повинні довести до відома викладача або навчального майстра про погіршення власного стану при виконанні лабораторної роботи;

- у випадку потрапляння частин тіла або одягу будь-кого в аудиторії у ділянку електричного кола, яка обертається, студенти повинні розімкнути автоматичний вимикач, встановлений на робочому місці, та повідомити викладача та навчального майстра, які повинні при необхідності знеструмити аудиторію та надати первинну допомогу доки не приїде швидка медична допомога, повідомити про це завідувача

лабораторіями або завідувача кафедрою та викликати швидку медичну допомогу;

- у випадку пожежі всім присутнім в аудиторії студентам необхідно негайно її залишити згідно плану евакуації під керівництвом навчального майстра, а викладачу негайно розімкнути автоматичний вимикач, який встановлений на робочому місці, знеструмити лабораторію та повідомити про це завідувача лабораторіями або завідувача кафедрою та викликати пожежну охорону.

ВСТУП

Лабораторні заняття з дисципліни «Електротехнологічні установки та пристрої» (ЕТУ та П), які проводяться в спеціалізованій лабораторії кафедри «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент» в лабораторії 258, є одним з основних видів навчальних занять студентів при її вивченні. Дисципліна «ЕТУ та П» є вибірковою у підготовці фахівців за напрямом підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Метою вивчення дисципліни є формування знань по фізичним основам, схемам та принципам дії основних промислових електротехнологічних установок і особливостям режимів роботи їх в системах електропостачання.

Структура кожної лабораторної роботи, їх зміст та наочна ілюстрація теоретичного матеріалу схемами вимірювання електричних й магнітних величин є методично обґрунтованими та зручними для самостійного опрацювання матеріалу студентами, як денної, так й заочної (дистанційної) форм навчання. Рівень наведеного матеріалу практичного спрямування ґрунтується на знаннях та вміннях з фізики, хімії, ТОЕ в обсязі навчальних програм названих дисциплін.

У методичних вказівках для виконання лабораторних робіт зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання методології при вивченні дисципліни «ЕТУ та П».

До початку лабораторного заняття студент дома повинен підготуватись, оформити звіт та знати відповіді на контрольні питання.

Перевірку підготовки студентів до лабораторного заняття здійснює викладач, що його проводить, на початку заняття. Вона

полягає у перевірці звіту оформленому у робочому зошиті та усному опитуванні згідно контрольних запитань.

Після перевірки готовності студента до заняття студенти приступають до виконання експериментальних досліджень лабораторної роботи згідно порядку виконання роботи, який наведено у методичних вказівках. Лабораторні роботи виконуються бригадами, що складаються з 3...4 студентів. Кожну роботу слід виконувати на певному робочому місці, використовуючи призначені для цієї роботи обладнання та апаратуру. Експериментальну установку, на яку подано робочу напругу, не можна залишати без нагляду. У випадку виникнення будь-яких несправностей у роботі приладів та апаратури слід знеструмити установку та негайно повідомити викладача, який проводить лабораторне заняття. Студентам забороняється самостійно усувати несправності, що виникли. Після закінчення лабораторної роботи студент повинен знеструмити експериментальну установку, подати отримані результати викладачу, який проводить лабораторне заняття, і тільки після його дозволу розібрати схему експериментальної установки, а робоче місце необхідно привести у порядок.

Після проведення лабораторної роботи студент здійснює обробку отриманих результатів по алгоритму розрахунку шуканих величин, який він склав до початку заняття, і оформлення звіту за структурою, наведеної у методичних вказівках. Звіт оформлюється індивідуально кожним членом бригади у спеціальному зошиті. Графічні зображення виконуються олівцем за допомогою креслярського приладдя. При побудові графіків масштаби, що відкладаються на осях координат величин, вибираються таким чином, щоб графік розмістився на площі не менш 100x100 мм.

Наприкінці заняття відбувається захист лабораторної роботи кожним студентом у вигляді письмової роботи розрахункового характеру.

Перед початком лабораторних занять студенти зобов'язані вивчити правила техніки безпеки в лабораторії, розписатись в журналі інструктажу та дотримуватись їх під час перебування в лабораторії. Студенти, які не пройшли інструктаж з техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

Автори сподіваються, що наведений матеріал допоможе студентам краще засвоїти курс дисципліни «ЕТУ та П».

Лабораторна робота № 1

“ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ”

Мета роботи: дослідити і побудувати характеристики електричної дуги постійного і змінного струмів.

1.1 Теоретичні відомості

Установками електродугового нагрівання називають такі, в яких електрична енергія перетворюється у теплову в основному в електричній дузі, яка вільно горить в атмосфері повітря, газовому середовищі, середовищі парів металу або у вакуумі.

Електричною дугою називають самостійний електричний розряд, який характеризується високими густиною струму і температурою, а також великою швидкістю перетворення електричної енергії в теплову. Напруга, при якій виникає самостійний розряд, називається напругою запалення, або потенціалом запалення. У повітрі електрична дуга має місце при струмі більше 0,5 А та напрузі більше 15 В. Для електричної дуги характерним є чітко окреслений дуговий стовп із високою густиною струму (до 1000 А/мм²) і з високою температурою (5 000 - 10000 К).

Розрізняють електричні дуги у газах і в парах металу. Перші мають місце у тих випадках, коли електроди виготовлені із тугоплавких матеріалів або інтенсивно охолоджуються, а тому їх матеріал практично не бере участі у створенні середовища, в якому відбувається електричний розряд. Прикладом такої дуги може бути дуга, що горить між вугільними електродами. Якщо ж у процесі горіння дуги матеріал електрода інтенсивно плавиться, то його пари визначають склад середовища, у якому відбувається електричний розряд. Прикладом може бути електрична дуга у ртутних вентилях, дуги у сталеплавильних

та руднотермічних печах, де вони горять в парах тих металів, плавлення яких відбувається.

Стационарна дуга – це дуга, параметри якої на протязі часу спостереження залишаються незмінними або змінюються в досить малих межах. Залежно від джерела живлення електрична дуга буває постійного і змінного струму.

Для електричної дуги постійного струму характерними є такі основні ознаки:

- Спадний характер статичної вольт-амперної характеристики (рис. 1.1). Статична вольт-амперна характеристика дуги визначає зв'язок спаду напруги на дузі U_d зі струмом I_d при постійній довжині дуги l_d ($U_d=f(I_d)$ при $I_d=const$). Цей зв'язок описується формулою, В:

$$U_d = \alpha + \beta I_d + \frac{\gamma + \delta l_d}{I_d} \quad (1.1)$$

де U_d - спад напруги на дузі, В;

α , β , γ , δ - коефіцієнти, величини яких залежать від матеріалу електродів і складу середовища, в якому горить дуга (наприклад, $\alpha=38$, $\beta=1,8$, $\gamma=19$, $\delta=12,6$ - для дуги, що горить у повітрі між вугільними електродами, $\alpha=12,8$, $\beta=2,0$, $\gamma=24,3$, $\delta=1$ - для дуги, що горить у повітрі між вугільним катодом і залізним анодом);

l_d - довжина дуги, мм;

I_d - сила струму, А.

Згідно з формули 1.1 і рис. 1.2 напруга на дузі при малих значеннях струму різко спадає зі збільшенням сили струму, а при великих значеннях струму залишається практично незмінною.

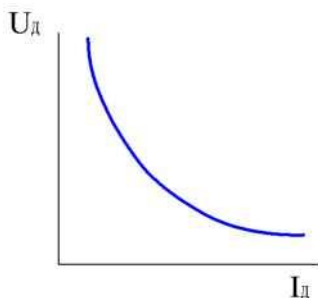


Рисунок 1.1 - Статична вольт-амперна характеристика дуги

• Порівняно низьке спадання напруги на дуговому проміжку. Стовп дуги по довжині і за характером процесів, що там відбуваються, поділяють на три частини: катодну і анодну області та власне сам стовп дуги. Характер розподілу напруги по довжині дуги I_d наведений на рис. 1.2.

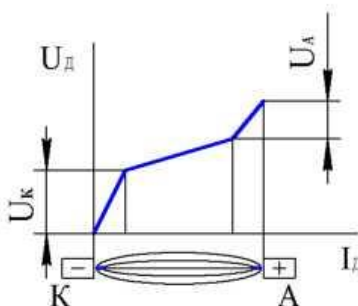


Рисунок 1.2 - Графік розподілу напруги по довжині дуги

Енергія, що підводиться до катодної області з мережі, витрачається на вивід електронів з металу катода. Електронна емісія при дуговому розряді може бути двох типів:

- термоелектронна емісія (тугоплавкі електроди);
- автоелектронна емісія (відносно легкоплавкі електроди).

Катодне спадання напруги U_k відповідає дуже невеликому шару, що при атмосферному тиску становить близько 10^6 м. Завдяки цьому напруженість електричного поля біля катода досягає 10^7 В/м. Біля

катодна область іонізується головним чином за рахунок нагрівання катода до високої температури (термоелектронна емісія) або/та створення сильного електричного поля (автоелектронна емісія). Термоелектронна емісія в основному має місце, коли катод виготовляється з тугоплавкого матеріалу (вольфрам, молібден, вугіль, графіт) і температура на його поверхні досягає значень 2500°C і вище. Автоелектронна емісія виникає, якщо катод виготовляється з матеріалу з відносно низькою температурою кипіння (титан, ртуть, мідь).

Анодне спадання напруги U_A пояснюється виникненням біля анода негативного об'ємного заряду і залежить від температури анода, величини струму і роду матеріалу анода. Товщина біля анодного шару становить близько $10^4 - 10^5$ м.

• Напруга на дузі великою мірою залежить від довжини дуги (відстані між електродами), що впливає із формули 1.1 та ілюструється графіками залежностей $U_0=f(l_0)$ (рис. 1.3).

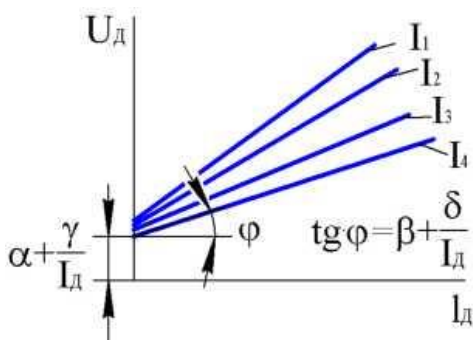


Рисунок 1.3 - Графіки залежності напруги на дузі від довжини дуги ($I_1 < I_2 < I_3 < I_4$)

В електричній дузі постійного струму відбуваються наступні процеси. Із катода в результаті його розігрівання (термоелектронна

емісія) або/та наявності біля його поверхні великої напруженості електричного поля (автоелектронна емісія) виривається потік електронів. У біля катодній області електрони розганяються до такої швидкості, що за її межами в дуговому проміжку відбувається інтенсивна іонізація частин газу. Іони, що утворилися внаслідок цього, спрямовуються до катода і розігрівають його. Первинні й вторинні електрони через весь стовп дуги спрямовуються до анода. На аноді відбувається нейтралізація електронів, при якій відбувається вибивання певної частини іонів, які спрямовуються до катода.

Баланс напруг електричного кола, що включає дугу постійного струму, індуктивність L і активний опір R (рис. 1.4), описується рівнянням

$$U_c = U_o + I_o R + L \frac{\alpha I_o}{dt} \quad (1.2)$$

де U_c - напруга джерела живлення, В.

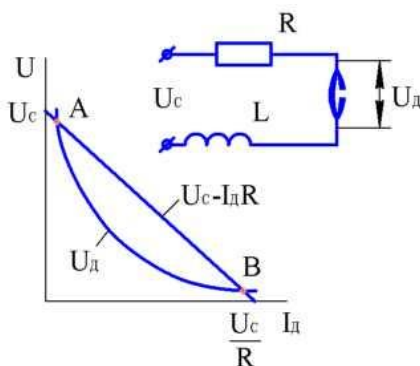


Рисунок 1.4 - До пояснення умов запалення та гасіння дуги постійного струму

Як впливає з формули (1.2 та рис. 1.4, сталим режимам горіння дуги ($dI_o/dt = 0$) відповідають точки А і В перетину статичної вольт-

амперної характеристики дуги і прямої ($U_c - IR$), причому усталена робота можлива тільки у точці В.

Умовою горіння дуги постійного струму є виконання нерівності

$$U_d < U_c - I_d R \quad (1.3)$$

Такі умови можливі для тієї частини вольт-амперної характеристики, точки якої лежать нижче прямої ($U_c - I_d R$)

Існують три можливих способи регулювання режиму дуги (рис. 1.5):

1. Зміною довжини дуги l_d , що означає перехід на другу характеристику дуги ($A-A$ – відповідає l_1 ; $B-B$ – відповідає l_2 ; $l_1 < l_2$).
2. Зміною напруги джерела живлення $U_{дж}$;
3. Зміною величини опору R , послідовно ввімкненого в ланцюг дуги, що дозволяє змінити кут нахилу прямої $U_{дж} < l_d R$.

Умовами, за яких покращується горіння дуги постійного струму, є такі:

- зменшення активної складової опору електричного кола дуги;
- підвищення напруги джерела живлення;
- зменшення спаду напруги на дузі.

Для електричної дуги змінного струму умови горіння та її характеристики є принципово відмінними від дуги постійного струму. Враховуючи те, що напруга джерела живлення безперервно змінюється у часі, напруга на дузі, струм і тепловий стан дугового проміжку також безперервно змінюються. Дуга змінного струму гасне кожен півперіод при переході струму через нуль і запалюється знову за певних умов. Час $T_{БП}$ від погашення дуги до її запалювання, протягом якого струм дуги дорівнює нулю ($I_d = 0$), називається безструмовою паузою.

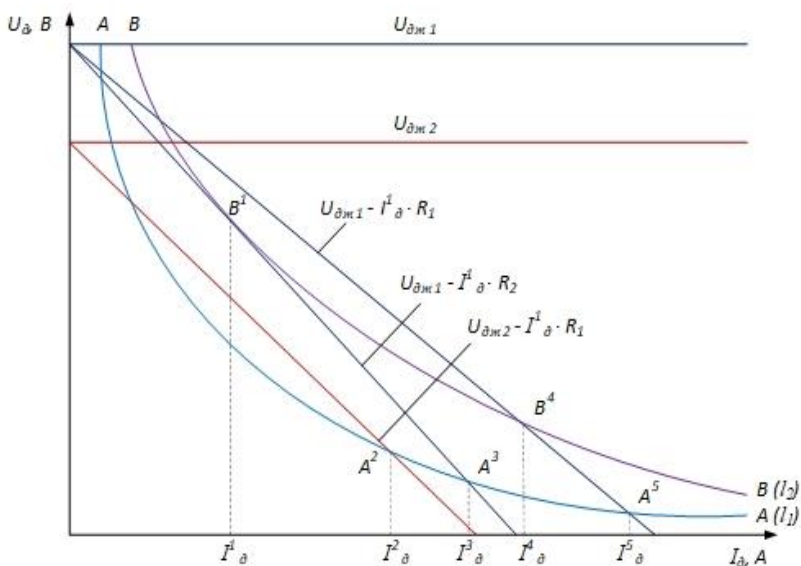


Рисунок 1.5 - Вольт-амперні характеристики дуги постійного струму.

За час безструмової паузи відбуваються такі явища:

- інтенсивна деіонізація дугового проміжку й збільшення пробивної напруги $U_{пр}$, необхідної для повторного запалювання дуги;
- зростає напруга між електродами U_E до відповідного миттєвого значення ЕРС джерела струму. Процес відновлення напруги відбувається за дуже короткий проміжок часу (наприклад, при $\cos \varphi = 0$, $t = 10 - 100$ мкс);
- якщо пробивна напруга $U_{пр}$ зростає швидше і залишається вище напруги між електродами U_E (рис. 1.6 а), то дуга більше не запалюється. Якщо ж за час безструмової паузи $T_{БП}$ ці напруги зрівняються і в подальшому буде виконуватись умова $U_E > U_{пр}$, то відбудеться повторне запалювання дуги (рис. 1.6 б) та її горіння до кінця півперіоду.

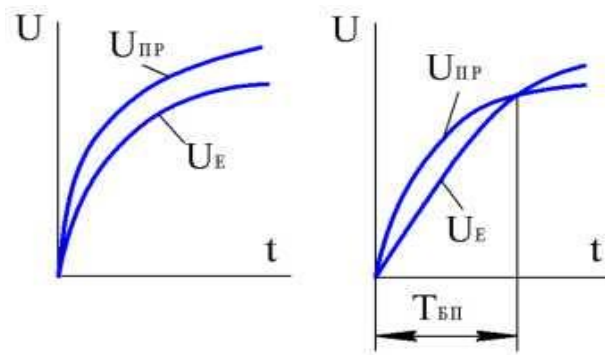


Рисунок 1.6 - До пояснення умов запалення та гасіння дуги змінного струму

1.2. Опис лабораторного стенду

Установка для дослідження електричних дуг включає в себе:

- регулятор напруги типу РНО-1 ($I_n = 10$ А);
- випрямляч;
- блок активних опорів;
- змінну індуктивність;
- комутаційну апаратуру;
- дугову камеру з вугільними електродами;
- осцилограф;
- вимірювальні пристрої.

Схема установки показана на рис. 1.7. Електрична дуга горить між двома вугільними електродами, розташованими у спеціальній камері. Камера має механізми переміщення електродів – оглядові вікна. Ручки регуляторів напруги, змінної індуктивності розташовані на панелі лабораторного стенду. Активні опори вмикаються тумблерами.

1.3. Порядок виконання роботи

Перед початком виконання роботи необхідно:

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями про процес горіння дуги і її характеристиками, а також у методичних вказівках і літературі.

2. Ознайомитися зі схемою установки рис. 1.7.

3. Зняти сімейство статичних характеристик дуги: $U_d = f(I_d)$ при $I_d = \text{const}$; $R = \text{var}$; $U_{дж} = U_1; U_2; U_3$ (довжину дуги і $U_{дж}$ задає викладач) результати занести в табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Результати дослідних характеристик дуги.

Період	Показники	Опір, Ом				
		$R_1 = 0$	$R_2 = 1$	$R_3 = 0.4$	$R_4 = 0.9$	$R_5 = 0.5$
1.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					
2.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					
3.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					

4. Зняти вольт амперні характеристики $U_d = f(I_d)$ при $U_{дж} = const$; $R = var$; $l_d = l_1; l_2; l_3$ (довжину дуги і $U_{дж}$ задає викладач) результати занести в табл. 1.2.

5. Зняти сімейство регулюючих характеристик: $U_d = f(I_d)$ при $U_{дж} = const$; $R = var$; $I_d = I_1; I_2; I_3$ (довжину дуги l_d і $U_{дж}$ задає викладач) результати занести в табл. 1.3.

Таблиця 1.2. Результати дослідних характеристик дуги.

Період	Показники	Опір, Ом				
		$R_1 = 0$	$R_2 = 1$	$R_3 = 0.4$	$R_4 = 0.9$	$R_5 = 0.5$
1.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					
2.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					
3.	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Довжина дуги l_d , м					
	Напруга на дузі U_d , В					
	Сила струму на дузі I_d , В					

Таблиця 1.3. Результати дослідних характеристик дуги.

Період	Показники	Опір, Ом				
		$R_1 = 0$	$R_2 = 1$	$R_3 = 0.4$	$R_4 = 0.9$	$R_5 = 0.5$
1.	Довжина дуги l_∂ , м					
	Напруга на дузі U_∂ , В					
	Сила струму на дузі I_∂ , В					
2	Напруга джерела $U_{дж}$, В					
	Напруга на дузі U_∂ , В					
	Сила струму на дузі I_∂ , В					
3.	Довжина дуги l_∂ , м					
	Напруга на дузі U_∂ , В					
	Сила струму на дузі I_∂ , В					

6. Зняти осцилограму струму, напруги на дузі і напруги джерела:

$$\text{при } \frac{X}{R} = \text{var}, \frac{U_0}{U_{дж}} = \text{const}$$

дуги змінного струму:

$$\gamma = \frac{X}{R} = \text{const} \quad \text{при} \quad \frac{U_\partial}{U_{дж}} = \text{var}$$

(значення R задає викладач)

$$X = X_\kappa = \sqrt{Z_\kappa^2 - R_\kappa^2}$$

де X_κ , Z_κ - опори короткого замикання;

$$Z_\kappa = \frac{U_\kappa}{I_\kappa} \quad (\text{електроди замкнуті}).$$

7. Зняти осцилограму струму, напруги дуги, напруги джерела живлення.

8. Побудувати сімейство характеристик дуг постійного і змінного струму.

9. Зробити висновки по роботі.

1.4 Контрольні запитання

1. Які називають установками електродугового нагрівання?

2. Що називають електричною дугою?

3. Як розрізняють електричні дуги у газах і в парах металу?

4. Які є характерні основні ознаки для електричної дуги постійного струму?

5. Поясніть статичну вольт-амперну характеристику дуги постійного струму.

6. Яких типів може бути електронна емісія при дуговому розряді?

7. Як розподіляється напруга по довжині дуги?

8. Які процеси відбуваються в електричній дузі постійного струму?

9. Поясніть умови запалення та гасіння дуги постійного струму?

10. Які існують можливі способи регулювання режиму дуги постійного струму?

11. За яких умов покращується горіння дуги постійного струму?

12. Назвіть особливості горіння дуги змінного струму?

Лабораторна робота № 2

“ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ УСТАНОВОК НА МЕРЕЖУ ЖИВЛЕННЯ ”

Мета роботи – ознайомитися з причинами виникнення вищих гармонік в електричній мережі з електродуговими установками, з методами оцінки їх впливу і способів зниження вищих гармонік.

2.1 Теоретичні відомості

Електродугові установки, являються крупними споживачами електроенергії в системах електрозабезпечення, мають ряд фізичних особливостей. Електрична дуга електродугових установок мають нелінійну¹ характеристику, що приводить до генерації вищих гармонік в системі електропостачання. До електродугових установок відносяться дугові сталеплавильні печі, а також дугове електричне зварювання.

Ступінь викривлення кривих струму дугових печей в значному ступені залежить від режиму горіння в різні періоди плавлення: розплавлення, окислення, рафінування.

В даний час на промислових підприємствах широко використовуються зварювальні установки, як джерело живлення яких застосовуються напівпровідникові перетворювачі. У зварювальних випрямлювачах використовуються однофазні і трифазні мостові схеми двополуперіодного випрямлення. Найбільше поширення одержали некеровані зварювальні випрямлювачі серій ВР, ВД, ВДМ, ВКСВВ. Напруга живлення випрямлювачів 380/220 В, споживана потужність 9-70 кВА.

Основні джерела перемінного струму - зварювальні трансформатори серії СТИ, СТ і ТСД.

На форму кривих струму і напруги дуг перемінного струму впливають параметри її електричного контуру й умови горіння дуги.

При чисто активному опорі контуру струм дуги двічі переривається за період, тому що дуга може горіти лише в той відрізок часу, коли напруга джерела більше необхідної напруги дуги. При наявності в ланцюзі індуктивності при переході струму через нуль напруга джерела не дорівнює нулю і відбувається повторне запалювання дуги. Для оцінки ступеня впливу електродугових установок на живильну мережу необхідно знати гармонійні спектри і значення коефіцієнтів несинусоїдальності напруги.

Для оцінки рівнів вищих гармонік струму і напруги звичайно використовуються наступні методи графоаналітичний і апаратний, заснований на застосуванні спеціальних аналізаторів типу 34 – 48 і інші.

Графоаналітичний метод заснований на тому, що будь-яка періодична функція, що задовольняє умовам Діріхле, а саме, що має за повний період кінцеве число розривів першого роду і кінцеве число максимумів і мінімумів, може бути представлена рядом Фур'є. Тобто будь-яка періодична функція, що задовольняє умовам Діріхле, може бути представлена у вигляді тригонометричного ряду Фур'є:

$$f(x) = A_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} A_{\nu} \sin(\nu x) + \sum_{\nu=1}^{\infty} B_{\nu} \cos(\nu x)$$

$$\text{де } A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx - \text{постійна складова ряду Фур'є;}$$

$$A_{\nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(\nu x) dx - \text{коефіцієнт Фур'є при синусних}$$

складових;

$$B_{\nu} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(\nu x) dx - \text{коефіцієнт Фур'є при косинусних}$$

складових.

Метод визначення коефіцієнтів Фур'є заснований на заміні визначеного інтегралу скінченною сумою складових. З цією метою період функції $f(x)$, рівний 2π , розбивають на n рівних частин:

$$\Delta X = \frac{2\pi}{n} \quad (2.1)$$

і замінюють інтеграли сумами.

1. Постійна складова визначається:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{p=1}^n f_p(x) \frac{2\pi}{n} \quad \text{або} \quad A_0 = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \quad (2.2)$$

де p - індекс (приймає значення від 1 до n);

$f_p(x)$ - значення функції $f(x)$ при значенні

$$x = p\Delta X \quad (2.3)$$

2. Амплітуда синусної складової V -ї гармоніки ряду:

$$A_v = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \sin_p vx \quad (2.4)$$

3. Амплітуда косинусної складової V -ї гармоніки ряду:

$$B_v = \frac{2}{n} \sum_{p=1}^n f_p(x) \cos_p vx \quad (2.5)$$

де $\sin_p vx$, $\cos_p vx$ - відповідно значення функцій $\sin vx$ та $\cos vx$ при $x = p\Delta X$

При побудові гармонік на загальному графіку необхідно враховувати, що масштаб по осі для v -ї гармоніки повинен бути обраний в v раз більше, ніж для першої гармоніки.

4. Амплітуда v -ї гармоніки напруги:

$$U_v = \sqrt{A_v^2 + B_v^2} \quad (2.6)$$

5. Початкові фази гармонік:

$$tg\alpha_v = \frac{A_v}{B_v} = \frac{\sin \alpha_v}{\cos \alpha_v}, \quad (2.7)$$

$$\alpha_v = \arctg(tg\alpha_v) \quad (2.8)$$

де α_v - від 1 до M (M – максимальний порядок апроксимуючих гармонік).

6. Діюче значення гармонік:

$$U_{v\varnothing} = \frac{U_v}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

7. Діюче значення вищих гармонік:

$$U = \sqrt{U_{2\varnothing}^2 + U_{3\varnothing}^2 + \dots + U_{v\varnothing}^2} \quad (2.10)$$

8. Коефіцієнт несинусоїдальності:

$$K_{nc} = \frac{\sqrt{U_{2\varnothing}^2 + U_{3\varnothing}^2 + \dots + U_{v\varnothing}^2}}{U_{1\varnothing}} \quad (1.10)$$

2.2 Опис лабораторного стенду

Лабораторний стенд використовується для моделювання режимів роботи електродугових установок на постійному та змінному струмах. Принципова схема показана на рис. 2.1. Осцилографування струмів і напруг виконується за допомогою осцилографів - світло променевого Н-117 або електронного Н-3013. Лабораторна установка дозволяє досліджувати форму кривих струму і напруги дуги при активному або індуктивному характері опору системи джерела живлення - електрична дуга, а також форму кривих струму і напруги в системі вентильний перетворювач - електрична дуга.

2.3 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з метою роботи, теоретичними відомостями і описом лабораторного стенду рис 2.1.

2. Під'єднати осцилограф до джерела живлення змінного струму, запалити дугу і, змінюючи активний опір в мережі за допомогою $K_1...K_5$, зафіксувати форму кривих струму і напруги (роблячи відмітки в кожному досліді значення струму і напруги). Аналогічно виконати досліди при зміні індуктивності в мережі.

3. Під'єднати осцилограф до джерела живлення постійного струму, запалити дугу і, змінюючи активний опір в мережі та довжину дуги, зафіксувати форму кривих струму і напруги.

4. Програму роботи здає викладач.

5. Результати дослідів по пунктам 2 і 3 заносять до табл. 2.1.

6. Виконати графоаналітичний аналіз форм кривих струму і напруги. Періоди необхідно розділити на 12 або 18 частин.

Таблиця 2.1 Результати досліджень.

Номер досліді	Показання приладів		Джерело струму			
	Опір, Ом	Довжина дуги, мм	змінного		постійного	
			U_0, B	I_0, A	U_0, B	I_0, A
1	$R_1 = 0$					
2	$R_2 = 1$					
3	$R_3 = 0,4$					
4	$R_4 = 0,9$					
5	$R_5 = 0,5$					

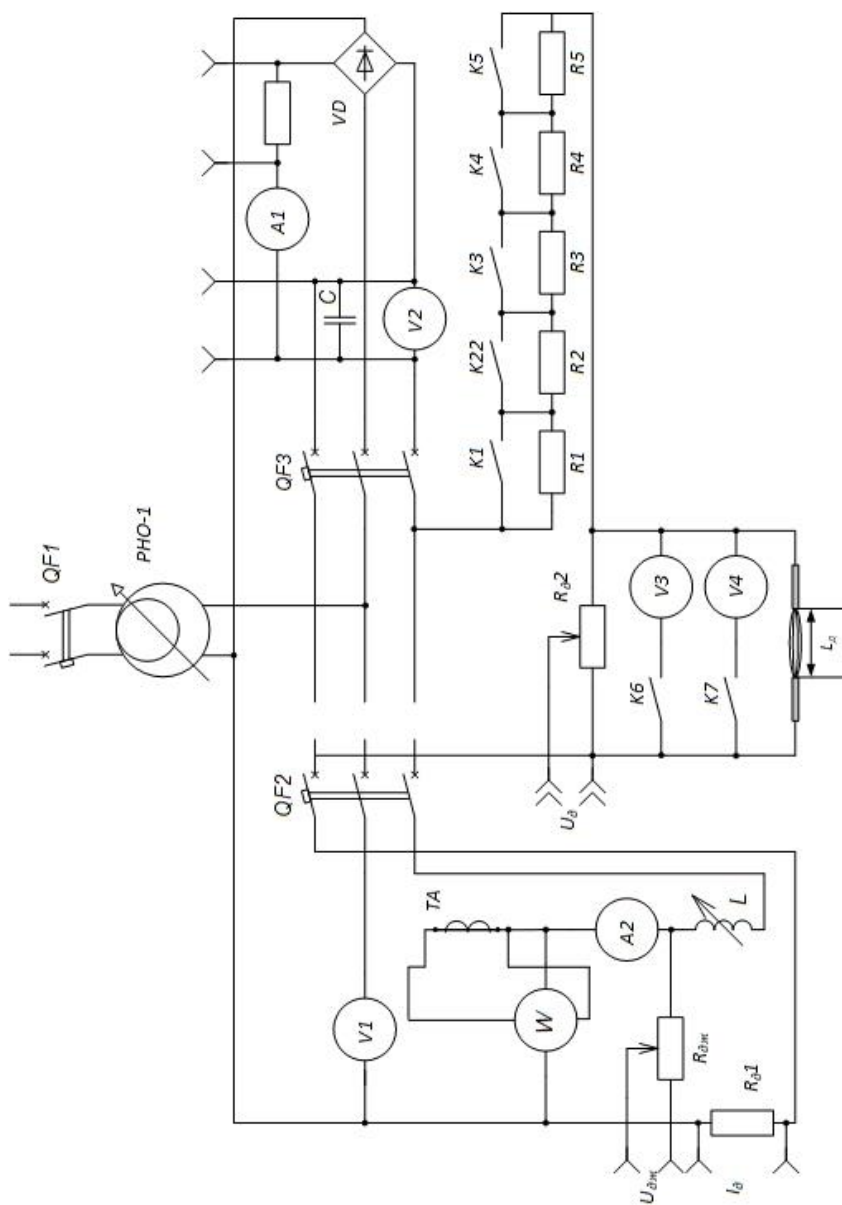


Рисунок 2.1 - Схема електротехнологічної установки для дослідження електричних характеристик дуг.

7. Результати заносять до табл. 2.2.
8. Провести аналіз отриманих результатів розрахунків .

Таблиця 2.2 Результати досліджень.

Номер досліджу	Напруга v - і гармоніки, В						Струм i - і гармоніки, А					
	3	5	7	9	11	$K_{нс}, \%$	3	5	7	9	11	$K_{нс}, \%$
1												
2												
3												

2.4 Контрольні запитання

1. Перерахуйте основні групи електродугових установок, що викликають появлення вищих гармонік в живлячій мережі.
2. Як впливають умови горіння дуги (відкрита, захищена, що горить в середовищі захисних газів) на ступінь викривлення форм кривих струму і напруги.
3. Які типи періодичних функцій не містять парних гармонік?
4. Який вплив вищих гармонік на різноманітні групи електроспоживачів.

Лабораторна робота № 3

“ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОЇ ДУГИ”

Мета роботи: дослідити головні характеристики джерела живлення зварювальної дуги постійного та змінного струму.

3.1. Теоретичні відомості

Електрозварювальні установки призначені для забезпечення технологічного процесу отримання нерознімних з'єднань окремих деталей з допомогою місцевого розплавлення матеріалів, доведення їх до пластичного стану або сумісного пластичного деформування, внаслідок чого виникають міцні зв'язки між з'єднаними деталями на атомному (молекулярному) рівні. У більшості із цих установок використовується явище перетворення електричної енергії в теплову, що виникає під час електричного дугового розряду або ж при проходженні електричного струму в місці з'єднання деталей. У деяких установках (наприклад, ультразвукових) нерознімне з'єднання досягається пластичним деформуванням завдяки перетворенню електричної енергії в механічну.

Деякі електрозварювальні установки, крім виконання основної функції, пов'язаної з отриманням нерознімних з'єднань, також можуть використовуватися і для операцій різання, напилання, наплавлення тощо.

Електрозварювальні установки у загальному випадку до свого складу включають як спеціальні електрозварювальні елементи, так і елементи загального призначення у вигляді електротехнічних, механічних, пневматичних та гідравлічних пристроїв, кабельних ліній тощо.

Комплекс обладнання, пристосованого для забезпечення електротехнологічних процесів електрозварювання, і робочого місця зварювальника називають зварювальним постом. Від одного джерела зварювального струму може живитися як один зварювальний пост (однопостове джерело зварювального струму), так і декілька постів (багатопостове джерело зварювального струму).

В електрозварювальних установках джерелами живлення зварювальної дуги можуть бути: трансформатори, випрямлячі та генератори.

Залежно від роду струму джерела живлення бувають: змінного (зварювальні трансформатори, електромашинні генератори змінного струму) та постійного (зварювальні випрямлячі та електромашинні генератори постійного струму).

За способом установки джерела живлення класифікують: стаціонарні та пересувні.

За призначенням джерела живлення бувають: спеціальні та універсальні.

Залежно від потужності джерела живлення поділяють на малої, середньої та великої потужності.

За кількістю постів зварювання джерела живлення класифікують: одно- та багатопостові.

До основних параметрів джерел живлення електрозварювальних установок відносять: напругу мережі живлення, частоту мережі живлення, коефіцієнт потужності, номінальний зварювальний струм, діапазон регулювання зварювального струму, напругу неробочого ходу, номінальну робочу напругу, кількість ступенів регулювання, тривалість вмикання.

До джерел живлення електрозварювальних установок ставлять такі головні вимоги:

1. Напруга неробочого ходу повинна, з одного боку, бути безпечною для роботи обслуговуючого персоналу, а з іншого достатньою для надійного запалення електричної дуги.

2. Після запалення дуги напруга повинна знижуватися до значення, що забезпечує надійне горіння дуги.

3. Джерело живлення повинне забезпечувати можливість легкого регулювання зварювального струму.

4. При виникненні короткого замикання струм не повинен перевищувати робочі значення струму більше ніж на 20- 40%.

5. Всі елементи джерела живлення повинні мати хороші динамічні властивості.

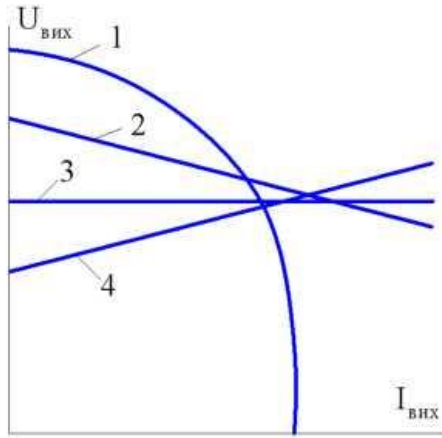
6. При зміні довжини дуги в певному діапазоні не повинні виникати значні зміни сили зварювального струму.

7. Коефіцієнт корисної дії джерела живлення повинен бути доволі високим.

Головною характеристикою джерела живлення є його зовнішня характеристика - залежність напруги на виході від сили струму при незмінній напрузі на вході (наприклад, напруги мережі живлення для зварювального трансформатора) або при постійній частоті обертання вала зварювального генератора: $U_{\text{вих}} = f(I_{\text{вих}})$ при $U_{\text{вх}} = \text{const}$ або $n = \text{const}$.

На рис. 3.1 показані приклади зовнішніх характеристик джерел живлення електрозварювальних установок.

Вибір зовнішньої характеристики джерела живлення суттєвою мірою залежить від виду характеристики дуги (рис. 3.1) і умов її саморегулювання.



1 – крутопадаюча, 2 – полого, 3 – жорстка, 4 – зростаюча.

Рисунок 3.1 - Зовнішні характеристики джерел живлення електрозварювальних установок.

Крутопадаюча зовнішня характеристика є найбільш поширеною в електрозварювальних установках для ручного зварювання. Це пояснюється тим, що при такому зварюванні характерною є постійна суттєва зміна довжини дуги. При збільшенні довжини дуги струм, як правило, зменшується, а при зменшенні - навпаки збільшується. Велика крутизна характеристики забезпечує не такі суттєві зміни струму при суттєвій зміні довжини дуги порівняно з іншими характеристиками. Крутопадаюча характеристика також забезпечує надійне початкове та подальше запалення дуги, оскільки кожний раз при згасанні дуги напруга миттєво зростає до значення напруги неробочого ходу U_0 , яка значно більше робочих значень напруги. Крутопадаюча зовнішня характеристика також автоматично забезпечує обмеження струму короткого замикання до значень $I_{\text{кз}} = (1,25 - 1,75)I_0$, що знижує ймовірність пропалювання зварювальних деталей, прилипання електрода до металу, розбризкування розплавленого металу тощо.

Джерела живлення для напівавтоматичних та автоматичних електрозварювальних установок мають, як правило, положу та жорстку зовнішні характеристики. Це пояснюється тим, що в цих установках довжина дуги та умови її горіння підтримуються автоматично.

Для електрозварювальних установок, де зварювання виконують в середовищі захисних газів (аргон, гелій) з використанням вольфрамових електродів, що не плавляться, для того щоб зміна довжини дуги суттєво не впливала на зміну сили струму і режим зварювання, використовують джерела живлення з крутопадаючими (а при малих струмах - вертикальними) зовнішніми характеристиками.

Жорсткі та зростаючі зовнішні характеристики мають джерела живлення електрозварювальних установок для зварювання електродом, що плавиться, в середовищі аргону та гелію.

Зварювальні трансформатори є одними із поширених джерел живлення для електрозварювальних установок при зварюванні на змінному струмові. Це пояснюється, в першу чергу, простотою їх конструкції та обслуговування і надійністю в роботі.

В останні роки все більше застосування отримало дугове зварювання на змінному та постійному струмах. Постійно збільшується попит в джерелах живлення.

Джерела живлення зварювальної дуги відрізняють по роду струму, потужності, призначенню і конструктивному виконанню.

Найбільш розповсюджені джерела живлення – зварювальні трансформатори, які являються економічним і дешевим джерелом живлення. Трансформатори застосовують для ручного дугового зварювання, зварювання під флюсом і в середовищі захисних газів. Вітчизняною електропромисловістю випускаються зварювальні трансформатори типів ТД, СТІ, ТДФ та ін. Постійний струм має деякі технологічні переваги, що виявляються під час дугового зварювання.

Широке застосування отримали некеровані й керовані зварювальні випрямлячі, що мають регульований пристрій і розраховані для роботи в певному діапазоні струмів і напруг. Конструктивне виконання пристроїв регулювання різноманітне, але вони можуть бути розподілені на наступні головні групи:

1. Пристрої з рухомими осердям і обмотками, а також ступінчастого регулювання.

2. Системи фазового керування в тиристорних зварювальних випрямлювачах.

Промисловістю випускаються зварювальні випрямлячі типів ВД, ВДГ, ВДУ, ВДМ та ін.

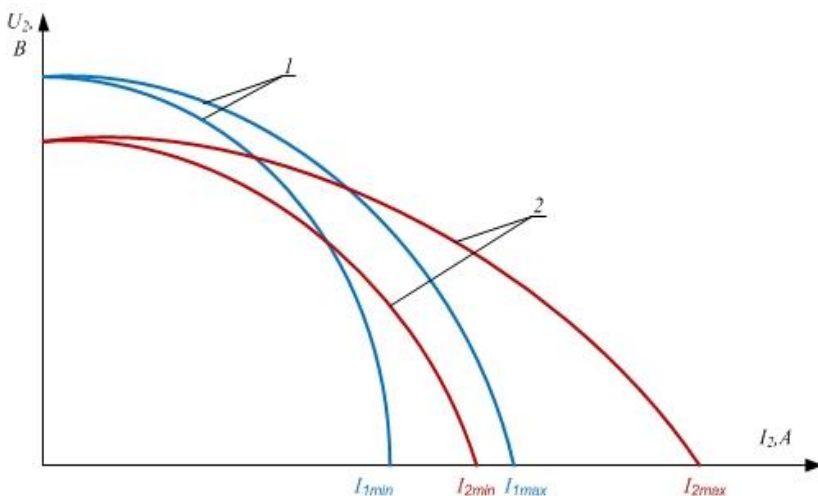
Джерела живлення по силі струму можуть бути розділені на джерела малої (100...150 А), середньої (350...380 А) і великої (2000...5000 А) потужності.

В залежності від виду статичної зовнішньої вольт-амперної характеристики всі джерела живлення підрозділяються на джерела з круто падаючими або полого падаючими (жорсткими) зовнішніми характеристиками.

Для стійкого горіння дуги необхідні відповідність форми зовнішньої характеристики джерела живлення формі статичної характеристики дуги. Зовнішньою характеристикою джерела називають залежність напруги U_2 на його затискачах від струму I_2 . Зварювальний струм при круто падаючих характеристиках (рис. 3.2) регулюється в заданому діапазоні струму від мінімального I_{2min} до I_{2max} .

Кожному значенню зварювального струму відповідає визначене значення напруги. Так, при ручному зварюванні робоча напруга U_2 і зварювальний струм I_2 пов'язані залежністю:

$$U_2 = 20 + 0.4I_2$$



1 – діапазон малих струмів; 2 – діапазон великих струмів.

Рисунок 3.2 - Крутопадаючі зовнішні характеристики джерела живлення.

2.2. Опис лабораторного стенду

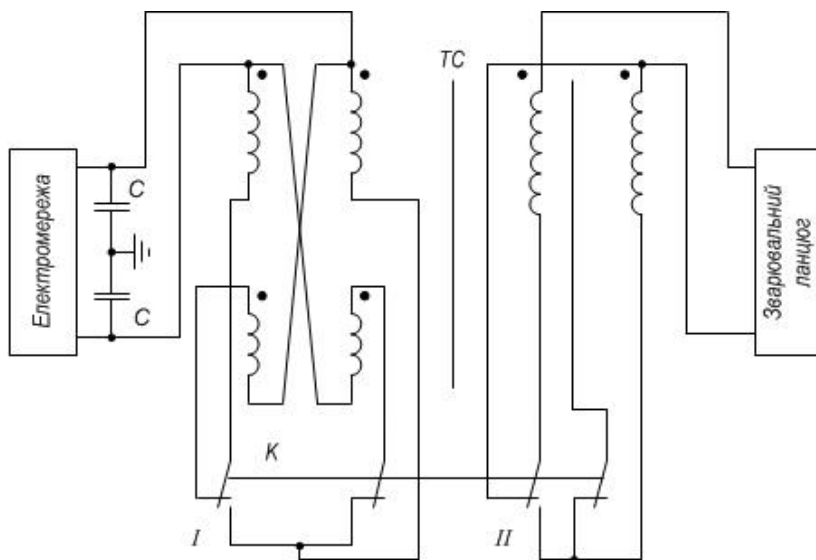
Лабораторний стенд (рис. 3.3) служить для моделювання режимів роботи джерел живлення змінного та постійного струмів.

Установка містить в собі:

1. Зварювальний трансформатор типу ТД – 300 (рис. 3.4), що має наступні технічні дані: номінальна первинна напруга – 220 В; вторинна напруга холостого ходу: а) в діапазоні малих струмів – 78 В; б) в діапазоні великих струмів – 32 В; межі регулювання зварювального струму – 60...386 А. Діапазон регулювання зварювального струму виконується паралельним з'єднанням I і II обмоток (великі струми) і послідовним (малі струми);

2. Випрямляч.
3. Блок опорів.
4. Комутаційний блок і захисну апаратуру.
5. Вимірювальні прилади.

Перемикачі K1 і K2 схеми (рис. 3.3) дають можливість під'єднати джерела живлення змінного або постійного струму до навантаження (блок опорів), а K5 і K6 – дослідити режими холостого ходу і короткого замикання. Кнопки SB1 – SB5 дозволяють змінювати навантаження.



С – конденсатор для зменшення радіоперешкод; К – перемикач діапазонів зварювального струму (І – діапазон великих струмів, ІІ – діапазон малих струмів).

Рисунок 3.4 - Принципова схема зварювального трансформатору ТД – 3000

3.3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями по джерелам живлення зварювальної дуги і схемою лабораторної установки.

2. Дослідити холостий хід джерела живлення для трьох значень струму: 70; 100; 160 А. Визначити коефіцієнт трансформації:

$$U \approx E;$$

$$U_2 \approx E_2;$$

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}$$

Виміряти струм холостого ходу I_{xx}

3. Визначити коефіцієнт потужності холостого ходу:

$$\cos \varphi = \frac{P_x}{U_x \cdot I_x}$$

і опору взаємної індукції:

$$Z_x = Z_B = \frac{U_x}{I_x};$$

$$R_x = Z_x \cos \varphi_x;$$

$$X_x = Z_x \sin \varphi_x$$

4. Дослідити режим короткого замикання і визначити наступні величини:

$$Z_K = Z_B = \frac{U_K}{I_K};$$

$$R_K = Z_K \cos \varphi_K;$$

$$X_K = Z_K \sin \varphi_K$$

5. Зняти та побудувати серію зовнішніх енергетичних джерел живлення, пояснити їх характер і дати висновки, що пред'являються до джерел живлення. Характеристики необхідно зняти для діапазонів малих та великих струмів.

Результати дослідів і розрахунків заносяться до табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Результати розрахунків та показань приладів.

Режим	Покази приладів						Результати розрахунків		
	$R, \text{ Ом}$	$U_1, \text{ В}$	$I_1, \text{ А}$	$P_1, \text{ кВт}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$	$P_2, \text{ кВт}$	$\cos\varphi$	η
Діапазон малих струмів	Холостий хід								
	$R_1 = 0.4$								
	$R_2 = 0.8$								
	$R_3 = 1.2$								
	$R_4 = 1.6$								
	$R_5 = 2.0$								
	Коротке замикання								
Діапазон великих струмів	Холостий хід								
	$R_1 = 0.4$								
	$R_2 = 0.8$								
	$R_3 = 1.2$								
	$R_4 = 1.6$								
	$R_5 = 2.0$								
	Коротке замикання								

Коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$.

6. За результатами розрахунків будують зовнішні $U_2 = f(I_2)$ та енергетичні $\eta = f(I_2)$, $\cos\varphi = f(I_2)$ характеристики.

7. Програму дослідження задає викладач.

3.4 Контрольні запитання

1. Класифікація джерел живлення зварювальної дуги.
2. Які ставлять головні вимоги до джерел живлення електрозварювальних установок?
3. Способи регулювання струму джерела живлення змінного та постійного струмів.
4. Особливості вольт-амперних характеристик джерел живлення.

Лабораторна робота № 4

“ДОСЛІДЖЕННЯ ГОЛОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕЧІ ОПОРУ І СИСТЕМИ ДВОПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ (ПОТУЖНОСТІ)”

Мета роботи: закріпити знання студентів по розділу “Електричні печі опору і позиційні системи регулювання температури (потужності)”. Робота носить розрахунково-дослідний характер і включає в себе визначення головних параметрів і режимів роботи електричних печей опору.

4.1. Теоретичні відомості

В установках електронагрівання опором електрична енергія перетворюється у теплову в елементах, які мають резистивний опір. Тому такі електротехнологічні установки мають й іншу назву - установки резистивного нагрівання.

На практиці використовується велика кількість різних за призначенням та конструктивним виконанням установок електронагрівання опором, але принцип дії всіх їх базується на законі Джоуля-Ленца. Згідно з цим законом кількість теплоти Q , Дж, що виділяється в провіднику при проходженні через нього електричного струму, визначається за формулою

$$Q = I^2 R t, \quad (4.1)$$

де I - сила струму, А; R - електричний активний опір, Ом; t - час, с.

При постійному струмі величина електричного опору провідника визначається його геометричними розмірами і питомим опором, Ом:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (4.2)$$

де ρ - питомий опір матеріалу провідника, Ом·м; l - довжина провідника, м; S - площа перерізу, м².

Питомий опір, Ом, провідника залежить від його температури T і визначається за формулою

$$\rho_T = \rho_{20} [1 \pm \alpha(T - 20)] \quad (4.3)$$

де ρ_T , ρ_{20} - питомий опір матеріалу провідника при температурі відповідно T і 20 °С, Ом·м.

Під час проходження постійного струму через провідник простої конфігурації густина струму по всій площі перерізу є рівномірною, а тому і нагрівання провідника відбувається рівномірно. Потужність теплових втрат P , Вт, визначається за формулою

$$P = I^2 \frac{\rho l}{S}, \quad (4.4)$$

Деякі інші явища і залежності мають місце під час проходження змінного струму по провіднику, які проявляються у такому:

- у загальному випадку повний опір Z провідника, окрім активної R , має і реактивну X складову;
- густина струму по площі перерізу провідника є нерівномірною в зв'язку з появою поверхневого ефекту і ефекту близькості, які істотно впливають на величину опору. При визначенні активного опору провідника R , Ом, під час проходження через нього змінного струму з урахуванням названих ефектів використовують формулу

$$R = R_0 \prod_{i=1}^n k_i, \quad (4.5)$$

де k_0 - коефіцієнт, що враховує поверхневий ефект і є складною функцією частоти, питомого електричного опору, розмірів і форми провідника;

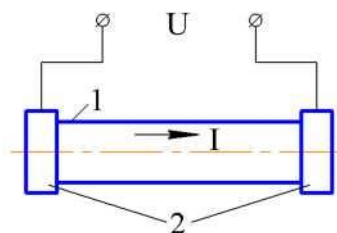
k_i - коефіцієнт, що враховує ефект близькості і є складною

функцією частоти, питомого електричного опору, розмірів і форми провідника, магнітної проникності, довжини і взаємного розміщення провідників зі струмом.

Електронагрівання опором можливе двома способами:

Прямим нагріванням. При цьому матеріал, який необхідно нагріти, повинен бути провідником електричної енергії і мати електронну (наприклад, метали) або іонну (наприклад, електроліти) провідність. Під час електронагрівання виробів із твердих матеріалів (рис. 4.1) напруга підводиться до виробу 1 з допомогою контактних пристроїв 2, і струм, безпосередньо проходячи через виріб, нагріває його.

Під час електронагрівання рідин, сипучих або пластичних матеріалів (рис. 4.2) їх поміщують у вмістилище (ванну, бак, камеру тощо) 1, в яку вводять електроди 2, що під'єднуються до джерела живлення.

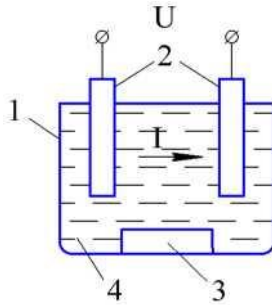


1 - виріб; 2 - кон-

тактні пристрої.

Рисунок 4.1 - Схема установки прямого електронагрівання виробів із твердих матеріалів.

Нагрівання матеріалу 4 у таких елетротехнологічних установках також відбувається завдяки безпосередньому проходженні струму через них.



1 - ємність; 2 - електроди; 3 - виріб; 4 - рідина, сипучий або пластичний матеріал.

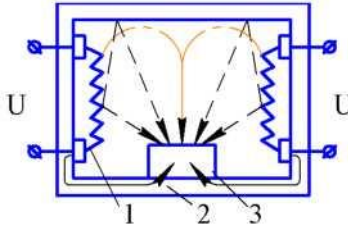
Рисунок 4.2 - Схема установки прямого електронагрівання рідин, сипучих та пластичних матеріалів.

Непрямим нагріванням. Під час такого нагрівання електрофізичні властивості матеріалу не мають значення (матеріал може бути як електропровідним, так і неелектропровідним), оскільки струм проходить не по виробу 3 (рис. 4.3), а по спеціальному нагрівальному елементу 1. Виріб і нагрівальний елемент розміщені в термоізовованій камері 2. Електрична енергія перетворюється в нагрівальному елементі в теплову, а вже від нього передається до виробу одним, двома або трьома такими способами:

- *теплопровідністю* (на рис. 4.3 - суцільні тонкі лінії). При цьому передавання теплової енергії здійснюється внаслідок взаємодії структурних одиниць речовини (молекул, іонів, атомів, вільних електронів). Теплопровідність може мати місце в твердих тілах і в нерухомих об'ємах рідин і газів. Для характеристики теплопровідних властивостей матеріалу використовують коефіцієнт теплопровідності χ , Вт/(мК), - величину, яка чисельно дорівнює густині теплового потоку, що проходить через ізотермічну поверхню при температурному градієнті, який дорівнює одиниці:

$$\lambda = q / \text{grad}T. \quad (4.6)$$

Теплопровідність матеріалу залежить від його складу, температури, агрегатного стану, тиску тощо;



1 - нагрівальний елемент; 2 - термоізолювана камера; 3 - вихід.

Рисунок 3.3 - Схема установки непрямого електронагрівання опором.

- *конвекцією* (на рис. 4.3 - штрихпунктирні лінії). При цьому передавання теплової енергії здійснюється за рахунок переміщення об'ємів газу або рідини. Залежно від природи сил, що приводять об'єми в рух, розрізняють природну і вимушену конвекції. Природна конвекція відбувається за рахунок сил тяжіння, а вимушена - за рахунок сил зовнішніх збудників (насосів, вентиляторів тощо). Кількісно конвективний теплообмін, Дж, між твердим тілом і навколишнім середовищем визначається за формулою

$$Q_{\text{кон}} = \alpha_{\text{кон}} (T_{\text{не}} - T_{\text{с}}) F_{\text{кон}}, \quad (4.7)$$

де $\alpha_{\text{кон}}$ - коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$; $T_{\text{не}}$, $T_{\text{с}}$ - температура відповідно нагрівального елемента і середовища, К; $F_{\text{кон}}$ - площа поверхні тепловіддачі, м^2 ;

- *тепловим випромінюванням* (на рис. 4.3 - штрихові лінії). При цьому тепла енергія переноситься електромагнітними хвилями, що створюються внаслідок теплового руху в речовині із області з високою температурою в область з більш низькою температурою. Ця властивість

характерна для будь-якого тіла, температура якого відмінна від абсолютного нуля. Діапазон довжин хвиль 0,4-0,8 мкм відповідає видимим людським оком променям, а діапазон 0,8-40 мкм - інфрачервоним променям. Енергія електромагнітних хвиль у загальному випадку під час зустрічі на своєму шляху з твердим тілом частково поглинається ним, нагріваючи це тіло; частково відбивається від поверхні тіла, а частково проходить через тіло.

Головним законом теплового випромінювання є закон Стефана-Больцмана, згідно з яким густина потоку променевої енергії q , $Вт/м^2$, що випромінюється в усьому діапазоні хвиль абсолютно чорним тілом, визначається за формулою

$$q = \sigma \cdot (T/100)^4, \quad (4.8)$$

де $\sigma = 5,689 \cdot 10^{-8}$ - стала Стефана-Больцмана, $Вт/м^2 \cdot K^4$.

Для «сірого» тіла - тіла, що не має блискучої полірованої поверхні, і яке дифузно відбиває променеву енергію, густина потоку променевої енергії, $Вт/м^2$, визначається за формулою

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T / 100)^4, \quad (4.9)$$

де ε - коефіцієнт теплового випромінювання «сірого» тіла.

Схема, що наведена на рис. 4.2, може відповідати установці і непрямого нагрівання у випадку, коли рідина, що знаходиться всередині ванни, використовується для нагрівання виробу 3.

Електричні печі опори опосередкованого нагріву – найбільш масові електротехнологічні установки. Печі опору випускаються номінальною потужністю від одиниці до тисяч кіловат і живляться від електричної мережі з частотою 50 Гц. В якості нагріваючого елементу звичайно використовуються хромонікелеві сплави (ніхроми), виконані у вигляді спіралей, стержнів, пластин і т.п. Електричний опір нагрівача

носить активний характер, нагрівачі вмикаються як в однофазну, так і в трифазну систему.

За технологічним призначенням і характером роботи печі опору підходять на печі періодичної та безперервної дії.

Вітчизняна промисловість випускає серійно печі камерні, шахтні, ковпакові та інші печі опору періодичної дії.

Розрізняють наступні головні параметри електропечей:

1. Встановлена потужність – сума встановлених потужностей всіх споживачів електроенергії, що входять в склад електропечі.

2. Споживана потужність – це потужність, що витрачається для нагріву виробів та на теплові втрати.

3. Потужність холостого ходу – потужність, що споживається електричною піччю без завантаження при усталеному тепловому режимі.

4. Час розігріву – час, витрачений на розігрів незавантаженої електропечі від температури 20 °С до усталеного теплового режиму.

5. Максимальна часова продуктивність печі, кг:

$$q_{\max} = \frac{0.85P_{\text{н}} - P_{\text{втр}}}{B} \quad (4.10)$$

де $P_{\text{н}}$ - номінальна потужність печі, перевірена показами ватметра;

$P_{\text{втр}}$ - потужність теплових втрат печі, що визначається дослідним шляхом по показам лічильника з досліду холостого ходу;

B - теоретичні витрати електроенергії, необхідні для нагріву виробу до температури, необхідної за технологічним процесом, ($\text{кВт} \cdot \text{год}$)/кг).

6. Мінімальні питомі витрати енергії, визначені діленням часових витрат енергії на часову продуктивність печі, ($\text{кВт} \cdot \text{год}$)/кг:

$$Q_{\min} = \frac{0.85P_n}{q_{\max}} = \frac{0.85P_n \cdot B}{0.85P_n - P_{\text{втр}}} \quad (4.11)$$

В печах опору для регулювання температури (потужності) використовують системи плавного і позиційного регулювання. Частіше для зміни потужності печі використовують двопозиційну систему, при якій піч періодично вмикається на свою номінальну потужність, а потім повністю вимикається. Змінюючи співвідношення часу ввімкненого $t_{\text{ввімк}}$ та відключеного $t_{\text{відкл}}$ стану печі, можна плавно в широких межах регулювати середню в часі потужність $P_{\text{сер}}$.

Специфічні умови роботи печей опору, що пов'язані з високими температурами, потребують використання матеріалів, які б здатні були нести навантаження та ізолювати робочий об'єм камер з високою температурою від навколишнього середовища. Залежно від призначення матеріали, що використовуються в електропечобудуванні, класифікують на: вогнетривкі, теплоізоляційні, жаротривкі і матеріали для нагрівальних елементів (нагрівників).

Вогнетривкі матеріали використовуються в основному для виготовлення внутрішніх частин камери, які перебувають під дією високих температур.

Головними властивостями, які повинні мати ці матеріали, є: вогнетривкість - здатність витримувати без деформації і оплавлення високі температури; термостійкість - здатність витримувати різкі коливання температури без появи тріщин у вогнетривкому матеріалі; механічна міцність при високих температурах, яка проявляється в тому, що вогнетривкий шар кладки повинен витримувати масу виробів, тари, нагрівальних елементів з пристроями їх кріплення, транспортних засобів тощо; хімічна нейтральність при низьких і високих температурах - здатність не створювати хімічних сполук з матеріалами виробів, нагрівальних елементів, теплоізоляції, газового середовища тощо; малі

теплопровідність та теплоємність, що дозволяє зменшити масу печі і знизити температуру теплоізоляційного шару; великий електричний опір; відсутність усадки; технологічність виготовлення виробів різної конфігурації.

Теплоізоляційні матеріали призначені для зменшення теплових втрат у печах опору, а тому головними вимогами до них є малі теплопровідність та теплоємність. Прикладами теплоізоляційних матеріалів є: діатоміт; азбест та азбестомісткі матеріали; перліт; скляна та мінеральна вата. Робоча температура вищеперелічених теплоізоляційних матеріалів і становить від 250 до 1100 °С.

Жаротривкі матеріали призначені для виготовлення складових частин печей, що несуть основні механічні навантаження в зонах високих температур, завантажувальних пристроїв, деталей транспортних засобів, що призначені для переміщення безпосередньо всередині печі виробів під час їх нагрівання.

Головними властивостями, які повинні мати жаротривкі матеріали, є: висока жаростійкість - здатність протистояти хімічному руйнуванню під дією середовища (повітря, газу, пари) при високих температурах; висока жароміцність - здатність збереження механічної міцності при високих температурах; достатня пластичність при тривалому навантаженні, що визначається величиною відносного подовження за час тривалої роботи до моменту руйнування; оброблюваність - здатність матеріалу до таких операцій, як зварювання, відливання, вальцювання, волочіння тощо.

У нагрівальних елементах (нагрівниках) печей опору відбувається перетворення електричної енергії в теплову. Головними властивостями, які повинні мати матеріали для нагрівальних елементів, є: великий питомий опір; сталість величини електричного опору в часі; малий температурний коефіцієнт електричного опору; високі

жаростійкість і жароміцність.

Сплави металів є основними матеріалами для нагрівальних елементів промислових печей опору з робочою температурою до 1200 °С і класифікують на: ніхром, мають найбільшу відповідність головним вимогам до матеріалів нагрівальних елементів. Їх основу становлять нікель, хром і залізо; у залізохромоалюмінієвих сплавах за основні легувальні добавки використовують хром і алюміній, які забезпечують жаростійкість.

Відкриті нагрівальні елементи (нагрівники) виготовляють у вигляді окремих секцій, які з'єднуються між собою згідно зі схемою під'єднання послідовно, паралельно, в «зірку» або «трикутник». У печах опору найбільшого поширення набули спіральні та зигзагоподібні нагрівники. У печах опору непрямого нагрівання також використовуються закриті нагрівальні елементи - трубчасті електронагрівники (ТЕН).

Неметалеві нагрівальні елементи використовують у печах опору з робочою температурою 1200-2800 °С. Прикладами матеріалів для таких нагрівальних елементів є: карборунд (карбід кремнію SiO), який отримують спіканням при температурі 1600-1700 °С маси, що складається із кремнезему і молотого коксу; графіт використовують для нагрівальних елементів, що працюють у високотемпературних вакуумних печах або в печах з нейтральною атмосферою з робочою температурою до 2800 °С; десиліцид молібдену (карбід кремнію MoSiO₂), який отримують методом порошкової металургії.

Загальними ознаками установок електронагрівання опором як приймачів електричної енергії є такі: переважна більшість установок нагрівання опором належать до приймачів II категорії; установки мають підвищені вимоги до точності підтримання напруги джерела живлення.

4.2. Опис лабораторного стенду

Моделювання режимів роботи печі опору виконується на електропечі СНОЛ-1,6.2,0.0.0.8/9-М1. Номінальна потужність – 2,5 кВт (потужність необхідно перевірити за приладами), напруга – 220 В. Принципова схема установки показана на рис. 4.4.

Автоматичне регулювання температури виконується електричним регулятором температури (ЕРТ) типу Ш4501. ЕРТ призначений для вимірювання температури та двопозиційного регулювання температури (потужності) печі опору. Ш4501 використовується в комплекті з термопарою ХА₆₈ та дозволяє регулювати температуру в діапазоні від 0 до 800 °. ЕРТ типу Ш69006 – регулюючий логометр, використовується в схемі вимірів для реєстрації температури кожуха печі.

Робота схеми проходить наступним чином. Універсальний перемикач SA встановлюють в положення 1 – «Вімкнено». При цьому замикаються контакти SA1, SA2. Якщо температура печі нижче значення, встановленого на ЕРТ, регулюючий контакт КМ2 ЕРТ замкнений, котушка контактора КМ1 отримує живлення від мережі, реле КМ3 і контактор КМ1 ввімкнені. До печі підводиться номінальна потужність через силові контакти контактора КМ1 і температура в ній починає зростати. При нагріві печі до заданої температури, регулюючий контакт розмикається КМ2, контактор розімкне ланцюг і температура в печі почне зменшуватися.

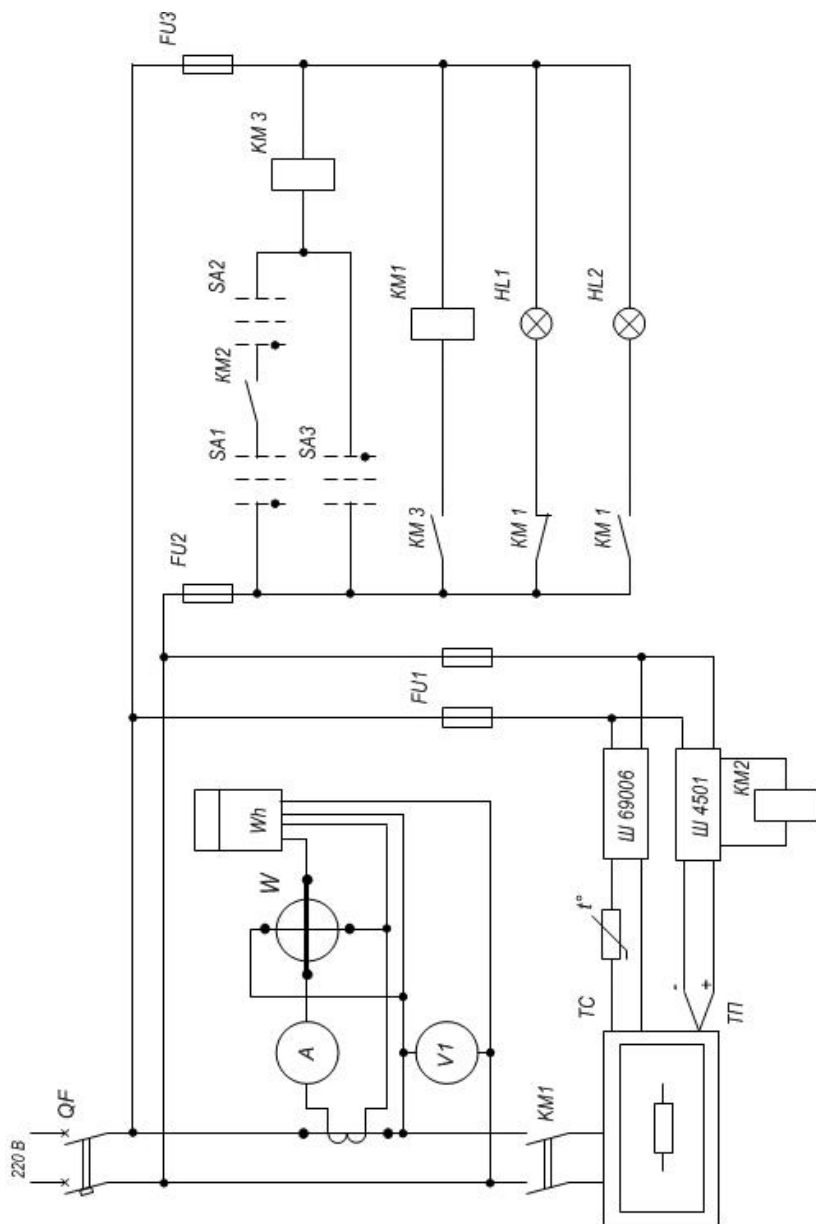


Рисунок 4.4 - Схема двопозиційного регулювання температури печей опору.

4.3. Порядок виконання роботи

В якості попередньої підготовки необхідно ознайомитися з технічним описом та інструкцією по експлуатації електронної печі і електронних регуляторів температури (*інформацію видає викладач*).

1. Виміряти потужність, що споживається пічкою в період розігріву. Побудувати графік споживання потужності і визначити втрати холостого ходу.

Перемикач SA встановити в положення 2 і виміряти втрати електроенергії за інтервал часу Δt $t=10...20$ хв. (час досягнення номінальної температури 800 °C порядку (100 хвилин).

Потім розраховується середня потужність, що споживається на цьому інтервалі часу:

$$P_{\text{нi}} = \frac{\Delta W}{\Delta \tau}$$

і наноситься на графік

$$P_{\text{нi}} = f(\tau).$$

Аналогічно визначаються середні потужності на наступних інтервалах часу $P_{\text{нi}+1}$, $P_{\text{нi}+2}$ і т.п. Отримані струми з'єднують плавною кривою і визначають втрати холостого ходу при номінальній температурі.

2. Дослідити теплові втрати з кожуху печі в процесі розігріву і побудувати графік втрат $P_{\text{втр}} = f(\tau)$.

В табл. 4.1. та рис 4.5 наведені значення питомих теплових втрат стінки кожуха печі в залежності від її температури та стану поверхні при температурі навколишнього повітря 18°C.

Таблиця 4.1. Питомі теплових втрат стінки кожуха печі.

Температура кожуху, °C	30	40	50	60	80	100	150
Питомі втрати кожуху, пофарбованого алюмінієвою фарбою, $\text{кВт}/\text{м}^2$	0,155	0,25	0,36	0,47	0,73	1,0	1,8

Користуючись цією таблицею можна визначити фактичні теплові втрати печі (температуру навколишнього середовища вимірюють термометром). Результати експериментальних досліджень та розрахунків по пункту 1 і 2 заносять до таблиці 4.2.

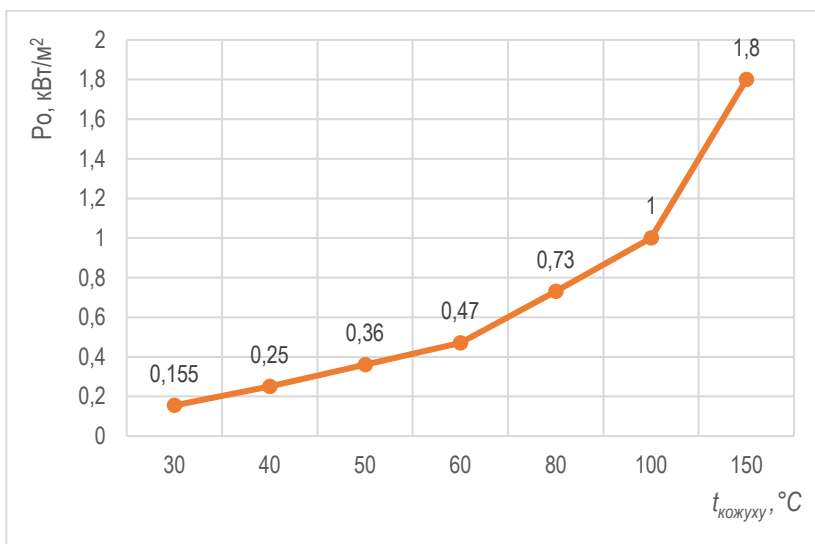


Рисунок 4.5 - Графік залежності теплових втрат з кожуху печі в процесі розігріву.

Таблиця 4.2. Результати експериментальних досліджень та розрахунків втрат в печі без навантаження.

Час	Інтервал часу Δt_i , хв	t_1 , °C	t_2 , °C	t_6 , °C	ΔW_i , кВт	$P_{\text{пі}}$, кВт	$P_{\text{втр}}$, кВт

3. Перемикач SA встановити в положення 1 «Вимкнено». За допомогою регульованого автотрансформатора подати напругу 220 В до печі. Розмістити в печі заготовку і виставити на ЕРТ задану викладачем температуру технологічного процесу. Дослідити залежність температури від часу $t = f(\tau)$ і спожитої потужності від часу $P_{\text{втр}} = f(\tau)$. Результати заносять до табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Залежність температури від часу і спожитої потужності

Час τ , хв	τ ввімкн., хв	τ відкл., хв.	t_i , °C	$P_{\text{ні}}$, кВт	ΔW_i , кВт	$P_{\text{втр.і}}$, кВт

Результати вимірювань і розрахунків по п. 3 нанести на один графік: в верхній частині – залежність температури печі від часу, а в нижній – відповідне значення її потужності.

4. Визначити максимальну продуктивність і мінімальні питомі витрати електроенергії (теоретичні витрати енергії $B = 0,156$ (кВт·год)/кг.

4.4 Контрольні запитання

1. Якими способами можливе електронагрівання опором?
2. Класифікація печей опору.
3. Як розрахувати потужність теплових втрат через кожух печі?
4. Основні енергетичні параметр печей опору.
5. Система автоматичного регулювання температурного режиму в печах опору [1].
6. Як класифікують матеріали залежно від призначення та використовуються в електропечобудуванні.

Лабораторна робота № 5

“ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОЛІЗУ МІДІ”

Мета роботи – дослідити процес електролітичного рафінування міді, визначити основні характеристики процесу.

5.1 Теоретичні відомості

Явище виділення речовини на електролітах при проходженні струму через електроліт, а також процеси окислення і відновлення на електродах, які супроводжуються набуванням або втратою частинками речовини електронів, називається *електролізом*.

Суть явища електролізу полягає у виділенні із електроліту, під час проходження через нього струму, частин речовини й осідання їх на електродах (такий процес називається електроекстракцією) або в перенесенні речовин з одного електрода через електроліт на інший (електролітичне рафінування).

Якщо сумарний електрохімічний процес електролізу проходить з поглинанням електроенергії, гальванічна ванна називається електролізером, а при виділенні енергії – гальванічним елементом.

Електролітами називають речовини, розчини і розплави яких можуть проводити електричний струм, носіями якого є іони, що утворюються в результаті електролітичної дисоціації.

Електролітичною дисоціацією називається процес розпаду речовини на рівномірно заряджені іони під час її розчинення або розплавлення. Згідно з теорією електролітичної дисоціації молекули солей, лугів, кислот, основ мають полярну структуру і складаються з двох іонів, що мають однакові за величиною, але різні за знаком заряди. В нормальному стані сили притягання між різнополярними іонами забезпечують цілісність молекул речовини. Але під час розчинення таких речовин розчинником (наприклад, водою) або розплавлення ці

сили значно слабнуть і за рахунок теплового руху молекул при їх зіткненні відбувається розпад молекули на два іони. Згідно з цією самою теорією поряд із процесом дисоціації також відбувається зворотний процес **молізації** - об'єднання окремих іонів у молекули.

За певних сталих умов при одночасному перебігу цих двох процесів у розчині встановлюється рухома рівновага між іонами, що утворюються, та іонами, що сполучаються.

Електроліти є електричними провідниками другого роду, в яких проходження електричного струму супроводжується напрямленим переміщенням різнополярних іонів, а не електронів, що спостерігається в провідниках першого роду.

Якщо в електроліт помістити металевий електрод, матеріал якого має іони тієї самої речовини, то при певній різниці потенціалів між металом і розчином не буде відбуватися ні розчинення матеріалу електрода, ні осідання на ньому речовини із розчину. Тобто на межі метал-розчин зовнішній струм буде відсутнім. Таку різницю потенціалів називають **нормальним електродним потенціалом речовини**. За нуль прийнято вважати нормальний електродний потенціал водню, а значення нормальних електродних потенціалів для водяних розчинів деяких інших речовин наведені в табл. 5.1.

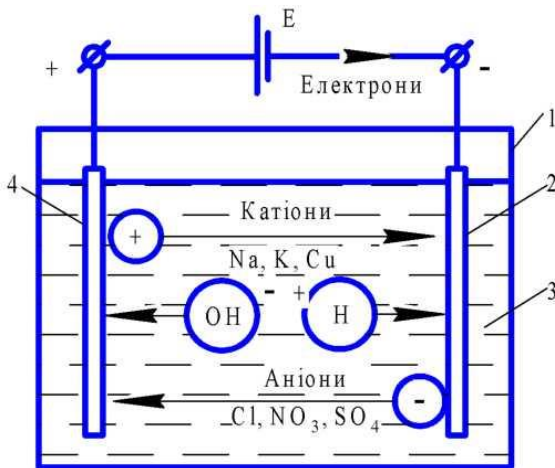
Якщо на електрод подати більш додатний потенціал, ніж нормальний електродний потенціал для цього матеріалу, то відбудеться розчинення електрода, і такий процес називається **анодним**. Якщо ж реальний потенціал електрода буде більш від'ємний, то на електроді відбудуватиметься виділення речовини, і такий процес називається **катодним**.

Таблиця 5.1 - Нормальні електродні потенціали водяних розчинів при +25 °С.

Речовина	Потенціал, В	Речовина	Потенціал, В
Літій	-2,96	Кобальт	-0,277
Калій	-2,92	Нікель	-0,25
Кальцій	-2,87	Олово	-0,14
Натрій	-2,71	Свинець	-0,13
Магній	-2,34	Водень	0,00
Алюміній	-1,67	Мідь	+0,34
Цинк	-0,76	Срібло	+0,8
Хром	-0,71	Ртуть	+0,86

Якщо у ванну 1 з електролітом 3 помістити два електроди (катод 2 і анод 4), які підключені до джерела постійного струму Е, то через електроліт буде проходити іонний струм, зумовлений направленим переміщенням додатно заряджених іонів (катіонів) у бік катода і від'ємно заряджених іонів (аніонів) у бік аноду (рис. 5.1). На аноді аніони віддають свій потенціал і перетворюються на нейтральні частинки, які осідають на електроді, а на катоді катіони, відбираючи електрони у матеріалі електрода, також нейтралізуються й осідають на його поверхні. В результаті такого процесу електроліт збіднюється, і для підтримання його проходження електроліт необхідно збагачувати.

Аналізуючи вищезазначене, доходимо висновку, що проходження іонного струму через електроліт супроводжується перенесенням маси речовини, числове значення якої визначається двома законами Фарадея.



1 - ванна; 2- катод; 3 - електроліт; 4 – анод.

Рисунок 5.1 - До пояснення явища електролізу:

Сутність процесу електролітичного рафінування міді полягає в переносі речовини з анодного електрода на катодний в одному розчині іонів міді, при цьому домішки, що містяться в міді аноду, випадають в осад. Процеси, що проходять при електролізі міді, визначаються законами Фарадея.

Перший закон. Маса речовини m , кг, що виділяється при електролізі на електроді, пропорційна сумарному заряду Q всіх іонів, що пройшли через електроліт, і визначається за формулою

$$m = k_e Q, \quad (5.1)$$

де m - кількість речовини, яка прореагувала;

k_e - електрохімічний еквівалент речовини, кг/Кл (для міді)

$k_e = 1.186 \text{ з}/(A \cdot \text{год})$;

Q - кількість електричної енергії.

Якщо протягом часу t через електроліт проходить постійний струм, сила якого I , то тоді (5.1) можна записати у вигляді

$$m = k_e I t. \quad (5.2)$$

I - струм, що проходить через електроліт:

$$I = j \cdot S_n$$

j - електродна щільність струму (при рафінуванні міді приймається $j = 150 \dots 250 \text{ A/m}^2$);

S_n - сумарна поверхня катодів;

t - час електролізу;

Другий закон. Електрохімічний еквівалент речовини k_e пропорційний його хімічному еквіваленту

$$k_e = \frac{1}{F} + \frac{\mu}{n}, \quad (5.3)$$

де $F = 96485 \text{ Кл/моль}$ - стала Фарадея, яка визначає кількість електроенергії, що необхідна для отримання одного грам-еквівалента речовини;

μ , - молярна маса даної речовини;

n - валентність речовини;

μ / n - хімічний еквівалент речовини.

З урахуванням формул 5.2 і 5.3 формула для визначення маси речовини m , кг, що виділяється при електролізі на електроді, згідно із законами Фарадея буде мати вигляд

$$m = \frac{\mu I t}{96480 n}, \quad (5.4)$$

Під час проходження реального процесу електролізу дійсна маса речовини, що виділяється на електроді, дещо менша за значення, отримане згідно з формули 5.4. Це пояснюється тим, що під час проходження реального процесу електролізу відбувається ряд побічних процесів (наприклад, виділення водню на катоді), витік струмів,

технологічні короткі замикання між електродами тощо. Тому кінцева формула для визначення дійсної маси речовини m_D , що виділяється при електролізі на електроді, має вигляд

$$m_D = \kappa \frac{\mu I t}{96480 n} . \quad (5.5)$$

де κ - коефіцієнт, що враховує особливості проходження процесу електролізу в реальній установці, дорівнює відношенню маси речовини, що фактично виділяється при електролізі на електроді, до маси, яка повинна виділитися згідно із законами Фарадея.

Цей коефіцієнт носить назву - вихід речовини за струмом і він завжди менший за одиницю.

Напругу, прикладена до ошиновки електролізної ванни, електродів можна розділити на чотири складові:

$$U_{EB} = U_{EЛ} + (U_A + U_K) + U_P ,$$

де $U_{EЛ}$ - спад напруги в електроліті:

$$U_{EЛ} = r_{ел} I ,$$

$r_{ел}$ - опір електроліту;

U_A , U_K - відповідно анодний і катодний спади напруги:

$$U_A + U_K = I(r_a + r_k + r_{ш}) ,$$

r_a , r_k - опори відповідно аноду і катоду;

$r_{ш}$ - опір ошиновки і контактів;

U_P - напруга розкладання (тобто мінімальна напруга початку реакції).

Корисна потужність, що споживається електролізером:

$$P_k = I U_p ,$$

Потужність, що споживається електролізером (без урахування втрат в перетворюючому агрегаті):

$$P_{ел} = IU_{ел},$$

Ефективність та бездоганність процесу електролізу визначається кількістю отриманого металу по струму.

Вихід металу по струму можна визначити як відношення кількості металу, що осів в процесі електролізу на катоді, до теоретичної кількості металу, що прореагував, при пропусканні відповідної кількості електрики:

$$B = \frac{m_{дійсне}}{m_{теоретичне}} = \frac{m_{дійсне}}{\alpha_{економ} \cdot I \cdot t},$$

Наступна характеристика процесу електролізу – питомі витрати електроенергії в електролізері:

$$W_{ел} = \frac{U_{ев} I \cdot t}{m_{дійсне}},$$

Коефіцієнт корисної дії електролізера $\eta_{ев}$ чисельно дорівнює виходу по струму B :

$$\eta_{ев} = B,$$

ККД джерела живлення (випрямного агрегату):

$$\eta_{ев} = \frac{P_{ев}}{P_{мережі}} = \frac{U_{ев}}{P_{мережі}},$$

ККД процесу рафінування міді:

$$\eta_{пр} = \eta_{ев} = \eta_{дж},$$

Питомі витрати електроенергії в процесі рафінування міді:

$$W_{пр} = \frac{P_{мережі}}{m_{дійсне}}.$$

5.2. Опис лабораторного стенду

Електрична схема установки показана на рис. 5.2.

Установка електролітичного рафінування міді складається з ванни, нагрівача для підігріву електроліту, електродів, ошиновки, автотрансформатора, вентильного перетворювача і електровимірювальних приладів. В якості електроліту використовується розчин мідного купоросу.

5.3. Порядок виконання роботи

Перед початком проведення роботи необхідно:

- ознайомитися з теоретичними відомостями про процес електролізу по рекомендованій в методичних вказівках літературі;

- ознайомитися зі схемою установки;
- підготувати звіт з лабораторної роботи;

Дослідна частина роботи проводиться в наступному порядку:

- зважити катоди і зафіксувати їх початкову вагу;
- визначити площини поверхонь катодів;
- розрахувати струм електролізера;
- встановити електроди в електроліт;
- ввімкнути установку і за допомогою автотрансформатора встановити струм електролізера;
- зафіксувати час початку електролізу (тобто момент ввімкнення установки);
- періодично на протязі процесу електролізу (час електролізу 2...2,5 год.) контролювати струм електролізера;
- по закінченню часу електролізу установку вимкнути, електроди помістити в фарфорову чашку і дуже добре промити водою;
- виконати зважування катодів і визначити кількість рафінованої міді;

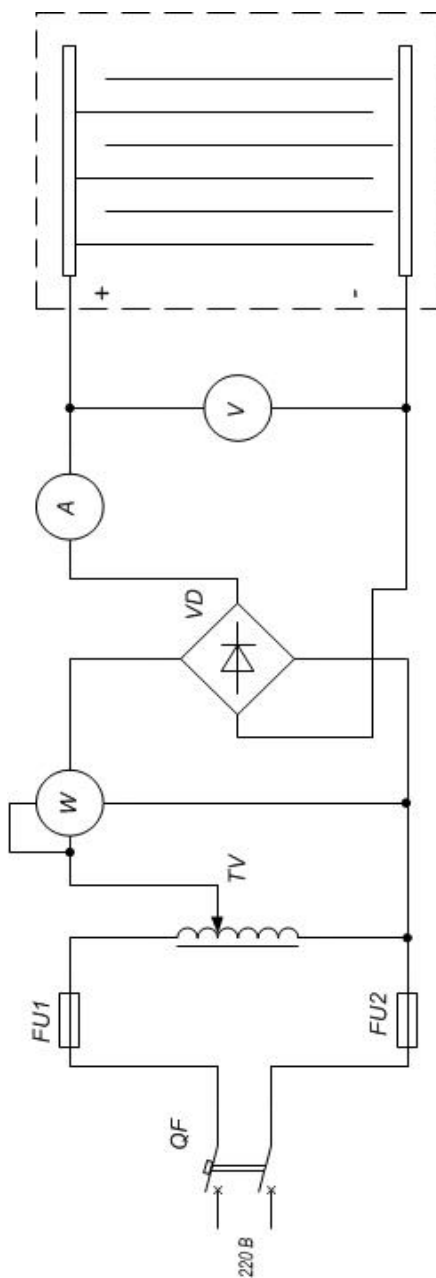


Рисунок 5.2 - Схема установки електролітичного рафінування міді.

- електроліт злити в колбу і привести установку в початковий стан;

- визначити вихід міді по струму;
- підрахувати питомі витрати електроенергії в електролізері;
- розрахувати питомі витрати електроенергії при рафінуванні

міді;

- знайти ККД електролізера;
- визначити ККД джерела живлення;
- розрахувати ККД процесу рафінування міді

Результати вимірів і розрахунків звести до таблиці 5.2.

Контрольні запитання

1. Сутність перетворення електричної енергії в хімічну.
2. Закони Фарадея.
3. Застосування електрохімії в промисловості.
4. Електролітичне рафінування міді [1, 2].

Таблиця 5.2. Результати вимірів і розрахунків.

№ п/п	Найменування величин	Одиниця	Позначення	Значення
1.	Початкова вага катода	$г$	m_1	
2.	Вага катода після рафінування	$г$	m_2	
3.	Кількість отриманої міді	$г$	$m_{\text{дійсне}}$	
4.	Електродна щільність струму	A/m^2	j	
5.	Сила струму електролізу	A	I	
6.	Напруга на ванні	B	$U_{\text{ев}}$	
7.	Час процесу електролізу	$год$	t	
8.	Отримання міді по струму	$г$	B	
9.	Питомі витрати електроенергії в електролізері	$\frac{\kappa B t \cdot год}{г}$	$W_{\text{ел}}$	
10.	Питомі витрати електроенергії при рафінуванні міді	$\frac{\kappa B t \cdot год}{г}$	$W_{\text{пр}}$	
11.	Потужність електролізу	$\kappa B t$	$P_{\text{ев}}$	
12.	Потужність, що споживається з мережі	$\kappa B t$	$P_{\text{мережі}}$	
13.	ККД електролізу		$\eta_{\text{ев}}$	
14.	ККД джерела живлення		$\eta_{\text{мережі}}$	
15.	ККД процесу рафінування		$\eta_{\text{пр}}$	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Василега П.О. Електротехнологічні установки: навчальний посібник /П.О. Василега. – Суми: Видавництво СумДУ, 2010. – 548 с.
2. Методичні вказівки до лабораторних робіт по курсу "Електротехнологічні установки та пристрої" для студентів спеціальності 8.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання" денної та заочної форми навчання / Укл. П.Г. Плешков, І.В. Коновалов, Є.М. Коваленко - Кіровоград: КДТУ, 2001. -38 с.
3. Милосердов В.О. Електротехнологічні установки та пристрої: навчальний посібник / В.О. Милосердов. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 135 с.
4. Соловей О.І. Промислові електротехнологічні установки: навчальний посібник / О.І. Соловей. – К.: Кондор, 2009. – 172 с.
5. Методичні вказівки для виконання контрольних та самостійних робіт з навчальної дисципліни «Електротехнологічні установки та пристрої» для студентів за напрямком 6.050701 «Електротехніка та електротехнології» / Укл.: П. Г. Плешков, Р. В. Телюта - Кіровоград: КНТУ, 2014 - 79с.