

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Шевченко Микола Віталійович

УДК621.7.08:621.791.75

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ ДУГОВОГО
ЗВАРЮВАННЯ ПРОТЯГОМ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Спеціальність 05.03.06 – "Зварювання та споріднені процеси і технології"

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Скачков Ігор Олегович
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", доцент кафедри електрозварювальних установок

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Коротинський Олександр Євтіхійович
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України, завідувач відділом автоматизації наукових досліджень

доктор технічних наук, професор
Кузнецов Валерій Дмитрович
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", завідувач кафедри інженерії поверхні

Захист відбудеться ____ . ____ . 2012 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.15 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 435.

З дисертацією можна ознайомитись в науково – технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37

Автореферат розісланий ____ . ____ . 2011 р.

Вчений секретар спеціалізованої

вченої ради Д 26.002.15,
професор, д.т.н.



Рижов Р. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В останні роки спостерігається нарощування об'ємів виробництва джерел живлення для дугового зварювання. Серед них більшу частину займають джерела живлення для зварювання в захисних газах та універсальні джерела. До універсальних джерел висувають підвищені вимоги щодо глибини регулювання вихідних параметрів, будовою силової частини тощо..

На етапі проектування формуються експлуатаційні характеристики джерел живлення. Широкого застосування набуло комп'ютерне моделювання електротехнічних систем з метою прогнозування їх характеристик. Є багато готових програмних продуктів для моделювання електричних схем, однак не створено готових рішень для моделювання зварювальної дуги. Існуючі підходи не враховують стохастичну складову електричних процесів в системі “джерело живлення - дуга”, яка суттєво впливає на роботу джерела живлення. Тому розробка нових підходів до моделювання системи “джерело живлення - зварювальна дуга” є актуальною.

Невід'ємною складовою процесу виготовлення та експлуатації джерел живлення є контроль їх якості. Існуючі способи контролю зварювальних властивостей базуються на експертній оцінці, при якій на її об'єктивність впливає людський фактор. Контроль проводиться вибірково, оскільки такі методи потребують значних витрат часу та матеріальних ресурсів. Таким чином, актуальною проблемою є розробка нових методів контролю джерел живлення, які не пов'язані з використанням значних матеріальних ресурсів, застосування яких дозволяє знизити суб'єктивність контролю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Науково-дослідницька робота за темою дисертації проводилась на кафедрі електрозварювальних установок Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” впродовж виконання науково-дослідницької теми: Ф 25.4/134 “Теоретичні засади енергозберігаючих технологій дугового зварювання плавким електродом з дозованим тепловнесенням”, де дисертантом проведено математичне моделювання процесів в зварювальному джерелі живлення з транзисторним ключем з метою розробки теоретичних засад енергозберігаючих технологій дугового зварювання плавким електродом з дозованим тепловнесенням.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є забезпечення заданих зварювальних властивостей джерел живлення для дугового зварювання протягом їх життєвого циклу. Досягнення поставленої мети потребує вирішення таких задач:

1. Проведення аналізу задачі контролю якості джерел живлення на ключових етапах їх життєвого циклу та визначення перспективних напрямків побудови систем моніторингу якості.
2. Побудова адекватних математичних моделей електричних процесів в системі “джерело живлення - дуга” відповідно до процесу зварювання з урахуванням стохастичного характеру зміни параметрів зварювальної дуги для визначення вимог до елементів джерел живлення.
3. Визначення особливостей оцінювання показників зварювальних властивостей джерел живлення для дугового зварювання та створення автоматизованої системи для їх оцінки.
4. Визначення критеріїв оцінки статичних та динамічних характеристик джерел живлення для дугового зварювання.

5. Розробка принципів побудови автоматизованих систем оцінки технічного стану джерел живлення за їх електричними параметрами.

Об'єкт дослідження – система “джерело живлення – зварювальна дуга”, процеси зварювання плавким електродом в захисних газах та ручного дугового зварювання покритими електродами.

Предмет дослідження – процеси в системі “джерело живлення – зварювальна дуга”, що впливають на роботу джерел живлення та показники якості формування зварних з'єднань, методи моделювання електричних процесів у зварювальному колі, методики та алгоритми контролю якості джерел живлення.

Методи дослідження:

Для вирішення поставлених задач використовували методи математичної статистики, ймовірнісні методи із застосуванням алгоритмів нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Використовували методи математичного моделювання електричних процесів в системі “джерело живлення – дуга”. Для перевірки достовірності теоретичних висновків використовували експериментальні методи.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Встановлено, що для прогнозування характеристик джерел живлення на етапі їх проектування та визначення оптимальних параметрів елементів джерела доцільно використовувати математичні моделі системи “джерело живлення - зварювальна дуга”, які враховують стохастичний характер електричних процесів в зварювальному колі. Встановлено, що моделювання електричних процесів при ручному дуговому зварюванні слід проводити з використанням марківських ланцюгів, а при зварюванні в захисних газах - статистичних методів аналізу сукупності процесів горіння дуги та коротких замикань дугового проміжку під час перенесення електродного металу.
2. Визначено нові критерії оцінки технічного стану джерел живлення для дугового зварювання за їх статичними та динамічними характеристиками, що ґрунтуються на оцінці положення характерних точок вольтамперної характеристики та оцінці параметрів перехідних процесів, які відбуваються у вторинному колі джерела живлення при переведенні його з режиму неробочого ходу до режиму короткого замикання.
3. Вперше показана можливість діагностики технічного стану джерел живлення для дугового зварювання з точністю виявлення несправностей не нижче 95 % за їх вихідними електричними параметрами з використанням штучних нейронних мереж типу LVQ. Визначено оптимальний спосіб підготовки даних для пошуку несправностей джерела живлення за допомогою нейронних мереж, який полягає в нормалізації осцилограм електричних параметрів у вторинному колі джерела для виключення впливу рівня сигналу на діагностику, а також у проведенні прямого перетворення Фур'є цих осцилограм для виключення впливу фази сигналу на результати діагностики.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені математичні моделі системи “джерело живлення – зварювальна дуга” для процесу ручного дугового зварювання покритими електродами та зварювання плавким електродом у захисних газах дозволили визначити оптимальні параметри силових елементів джерела живлення та оптимальні параметри регулятора на етапі проектування джерела живлення.

Розроблена система оцінки зварювальних властивостей джерел живлення на основі систем нечіткої логіки дозволяє оцінювати зварювальні властивості в автоматизованому режимі, зменшує суб'єктивність оцінки та матеріальні витрати на її проведення.

Розроблена система оцінювання технічного стану джерел живлення за електричними параметрами дозволяє на етапі приймально-здавальних випробувань або на етапі експлуатації визначити наявність несправностей силової частини джерел та визначити можливі причини їх виникнення.

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно проведено комплекс науково-дослідних робіт, спрямованих на визначення впливу типу переносу електродного металу на електричні процеси у зварювальному колі, розробку математичних моделей електричних процесів в системі “джерело живлення - дуга”, визначення особливостей впливу основних показників зварювальних властивостей на технологічні характеристики джерел живлення та розробку критеріїв їх оцінки, визначення впливу статичних і динамічних характеристиками джерел живлення на зварювальні властивості та розробку критеріїв їх оцінки, розробку системи оцінки технічного стану джерел живлення за їх електричними параметрами.

В друкованих працях, що опубліковано у співавторстві, особисто здобувачеві належить: в [1, 5, 6] – розроблено методику оцінки технічного стану джерел живлення для дугового зварювання, визначено можливість використання електричних параметрів для пошуку несправностей, проведено навчання штучних нейронних мереж та проаналізовано можливість використання таких систем для оцінки технічного стану джерел живлення; в [2] – створено математичну модель для числового вирішення багатопараметричної нелінійної задачі аналізу процесу плавлення електроду в системі "електрод - дуга" при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом для визначення параметрів імпульсів, розраховано область параметрів імпульсів, при яких виконується умова рівності швидкості подачі та швидкості плавлення електродного дроту; в [3, 8] – розроблено метод контролю зварювальних властивостей джерел живлення за їх електричними параметрами, запропоновано критерії оцінки кожного з показників зварювальних властивостей та алгоритм отримання узагальненої оцінки; в [4] – розроблено математичну модель електричних процесів, що протікають в зварювальному колі під час ручного дугового зварювання покритими електродами; в [7] – розроблено математичні моделі випрямлячів для дугового зварювання.

Здобувачу також належать загальні висновки дисертаційної роботи і положення, які виносяться на захист:

1. динамічні комп'ютерні моделі системи “джерело живлення – дуга”, які являють собою схему заміщення силової частини зварювальних випрямлячів різних типів і враховують електротехнічні характеристики зварювального обладнання, а також нелінійну вольтамперну характеристику дуги та характеристики переносу електродного металу;
2. спосіб моніторингу технічного стану джерел живлення для дугового зварювання, який полягає у пошуку несправностей силової частини джерел за їх вихідними електричними параметрами;
3. система оцінки зварювальних властивостей джерел живлення для дугового зварювання, яка базується на оцінці об'єктивних показників процесу

зварювання та узагальнення оцінки за допомогою алгоритмів нечіткої логіки.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на четвертій та п'ятій Всеукраїнських науково-технічних конференціях молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології”, Київ 2007, 2009 р.р.; міжнародній науково-технічній конференції “Досконалість зварювання - комплексний підхід” (Київ, НТУУ “КПІ”, 2007р); наукових семінарах кафедри електрозварювальних установок НТУУ „КПІ” 2004-2007 р.

Публікації.

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 8 друкованих праць, з них 4 статті в провідних фахових науково-технічних журналах та 4 тез доповідей у збірниках науково-технічних конференцій.

Структура дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, висновків по роботі, списку використаних джерел та додатків. Робота викладена на 149 сторінках, у тому числі 127 сторінок тексту, 112 рисунків та 8 таблиць, список літератури з 99 найменувань та 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність її теми, визначено мету і сформульовано основні задачі досліджень, висвітлено наукову новизну, практичну значимість та апробацію роботи.

У першому розділі наведено аналіз сучасного стану розвитку джерел живлення для дугового зварювання. Виявлено, що є тенденції до збільшення обсягів виробництва джерел живлення для дугового зварювання. Серед них більшу частину займають джерела живлення для зварювання в захисних газах та універсальні джерела (для *MMA*, *TIG* та *MIG/MAG* зварювання). Виробництво універсальних джерел характеризується необхідністю глибокого регулювання вихідних параметрів, забезпечення стабільності горіння дуги та низкою інших особливостей.

Для прогнозування характеристик майбутньої продукції застосовують комп'ютерне моделювання. Існує широкий вибір комп'ютерних програм для моделювання електричних систем, однак не створено готових рішень моделі зварювальної дуги оскільки в дузі процеси є стохастичними і залежать від багатьох факторів. Є багато підходів до моделювання зварювальної дуги. Однак всі вони не враховують те, що перенесення електродного металу носить ймовірнісний характер і не може бути описане за допомогою звичайних диференціальних рівнянь. Оскільки ймовірнісні процеси горіння дуги та переносу електродного металу суттєво впливають на електричні процеси в зварювальному колі, то актуальним є створення нових підходів до їх моделювання.

В умовах серійного виробництва часто застосовують статистичні методи контролю якості продукції. Їх перевагою є значне зниження витрат на його проведення. З метою збільшення точності контролю застосовують системи функціональної і тестової діагностики, в яких вводять відповідні датчики в конструкцію джерела живлення, що виробляються. Це призводить до ускладнення конструкції джерел та збільшення матеріальних витрат. Таких недоліків позбавлені методи діагностики джерел живлення за електричними вихідними параметрами

джерела, а саме за струмом та напругою у вторинному колі. Діагностика технічного стану за електричними параметрами є задачею класифікації. Для автоматизації вирішення таких задач доцільно застосовувати штучні нейронні мережі.

Проаналізовано сучасні методи оцінки властивостей джерел живлення для дугового зварювання. Метод оцінки згідно ГОСТ 25616-83 не враховує значимість кожного показника та є суб'єктивним оскільки використовує експертні оцінки зварників. Існують методики прийняття об'єктивних рішень на основі простих розрахунків за узагальненим показником. Ці методи багатокритеріальної оцінки можуть бути ефективними лише у тому випадку, якщо вплив усіх показників якості описується за однаковим законом, що не завжди виконується при оцінці зварювальних властивостей. Отже з'являється необхідність в розробці нових методів визначення зважених багатокритеріальних оцінок показників якості джерел живлення. Встановлено, що перспективним є побудова системи оцінювання зварювальних властивостей джерел живлення для дугового зварювання з використанням теорії нечітких множин.

Проаналізовано можливості систем штучного інтелекту. Визначено, що для побудови багатокритеріальних систем оцінювання доцільно використовувати системи на основі алгоритмів нечіткої логіки, а для вирішення задач розпізнавання образів та кластеризації даних – штучні нейронні мережі.

У другому розділі описано методи дослідження та експериментальну установку. Експериментальна установка для контролю зварювальних властивостей (рис. 1) складалась з зварювального джерела живлення, датчиків струму та напруги, системи збору та обробки даних, зварювального обладнання для ручного дугового зварювання покритими електродами та напіваавтоматичного зварювання в CO_2 . Для контролю статичних та динамічних характеристик, а також пошуку несправностей в якості навантаження використовували баластний реостат. Випробування проводили з використанням таких джерел живлення для зварювання: ВД-306УЗ, ВДУ-506УЗ, АРКОН-500К та *FRONIUS TPS 5000*.

Для виміру і запису осцилограм струму та напруги було використано цифрову систему. Для реєстрації вторинних струму та напруги використовувався модуль цифрового введення (АЦП) E-140 та датчики на основі ефекту Холла. Для збору та подальшої обробки інформації було розроблено спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє проводити запис сигналів, зчитувати записані дані з жорсткого диску, проводити фільтрацію, масштабування даних, зберігати оброблені осцилограми в бінарному, текстовому та графічному вигляді. Окрім того, розроблене програмне забезпечення дозволяє проводити обчислення статистичних

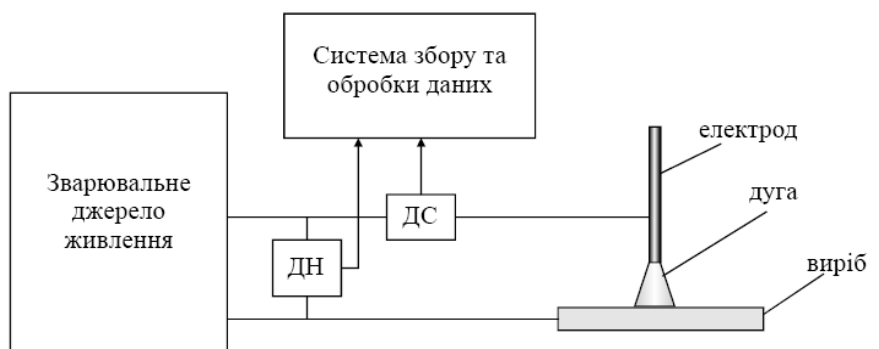


Рис. 1. Функціональна схема установки для оцінювання зварювальних властивостей джерел живлення

характеристик осцилограм струму та напруги, визначати статистичні характеристики параметрів коротких замикань.

Сформульовано критерії оцінювання вольтамперних характеристик (ВАХ) джерела живлення для дугового зварювання. Для спадних вольтамперних характеристик (рис. 2) використовували такі показники: для “класичних” ВАХ (рис. 2 а) – напруга неробочого ходу (точка *A*); струм короткого замикання (точка *B*); розривна напруга (точка *C*); нахил ВАХ в діапазоні робочих напруг (ділянка *CB*); для комбінованих (рис. 2 б) – напруга неробочого ходу (точка *A*); струм короткого замикання (точка *B*); розривна напруга (точка *C*); нахил робочої ділянки ВАХ (ділянка *CD*).

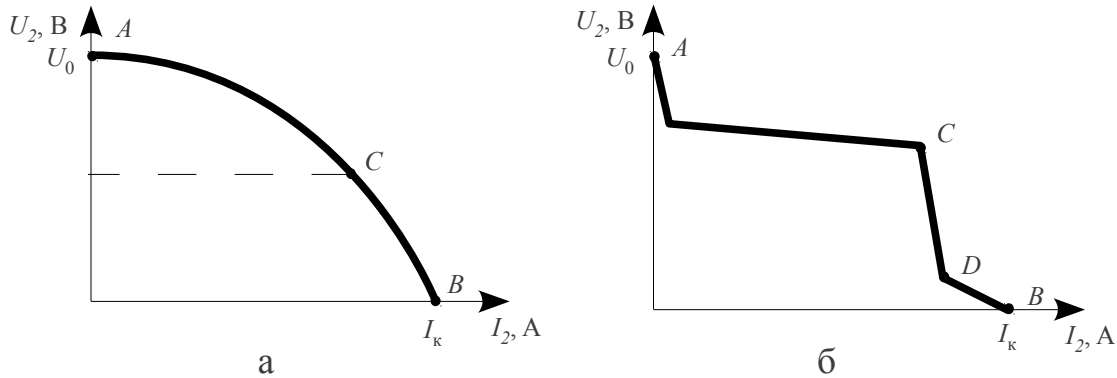


Рис. 2. Спадні зовнішні вольтамперні характеристики джерел живлення: а – “класичні”, б – комбіновані

Для жорстких вольтамперних характеристик (рис. 3) використовували наступні показники: для “класичних” ВАХ (рис. 3 а) – напруга неробочого ходу; нахил робочої ділянки характеристики (ділянка *BC*); для комбінованих (рис. 3 б) – напруга неробочого ходу; струм короткого замикання (точка *D*); нахил робочої ділянки характеристики (ділянка *BC*).

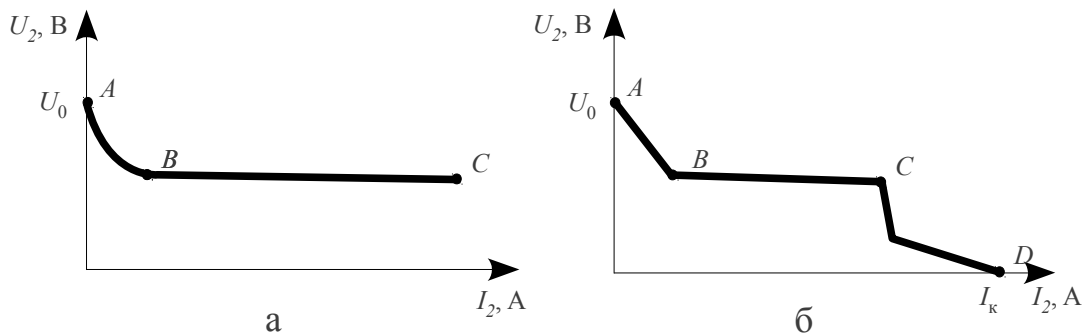


Рис. 3. Жорсткі зовнішні вольтамперні характеристики джерел живлення: а – “класичні”, б – комбіновані

Перехідні процеси, що відбуваються у вторинному колі джерела живлення, зазвичай носять коливальний характер (рис. 4) і характеризуються такими параметрами: час наростання t_n ; час перехідного процесу t_p ; перерегулювання σ ; коефіцієнт загасання γ . Для визначення цих параметрів сигнал описували за допомогою параметричних моделей. Використовували параметричні моделі наступних видів:

- авторегресійна (ARX) $A(q) \cdot y(t) = B(q) \cdot u(t - nk) + e(t)$;
- авторегресійна модель з ковзними середніми у залишках (ARMAX) $A(q) \cdot y(t) = B(q) \cdot u(t - nk) + C(q) \cdot e(t)$;
- зворотної помилки (OE) $y(t) = \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t - nk) + e(t)$;
- модель Бокса-Дженнінса (BJ) $y(t) = \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t - nk) + \left[\frac{C(q)}{D(q)} \right] e(t)$.

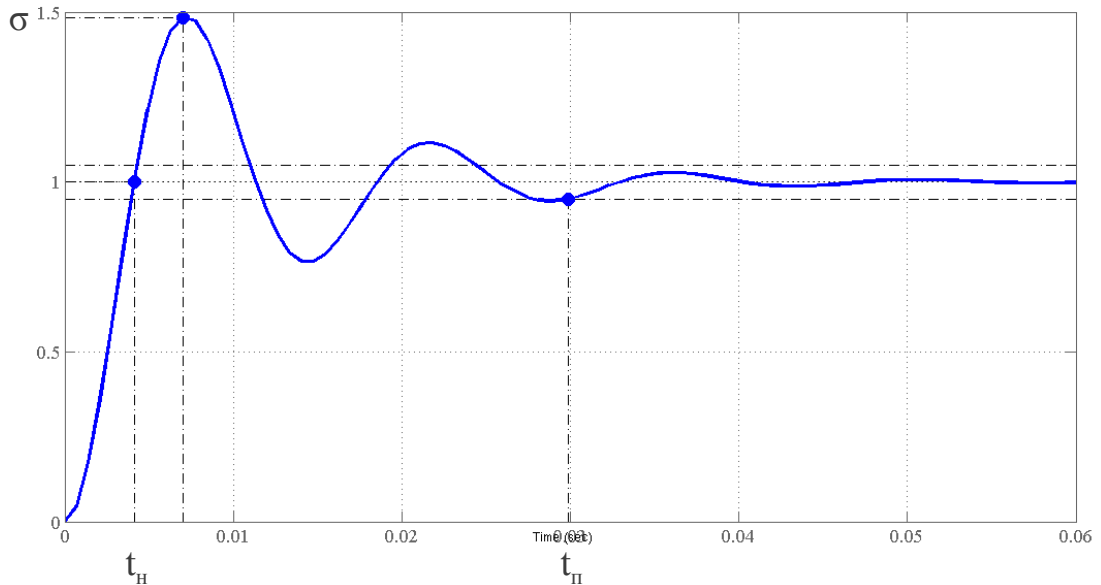


Рис. 4. Коливальний перехідний процес (ступінчасте навантаження джерела на баластний реостат)

В якості вхідних даних було використано одиничну ступінчасту дію, а вихідних – фільтровану і нормалізовану осцилограму струму джерела живлення при переведенні джерела з режиму неробочого ходу в режим короткого замикання.

Технічний стан зварювальних джерел живлення оцінювали за наявністю технічних несправностей, які виникають внаслідок зношення елементів або виробничого браку. Більшість таких несправностей безпосередньо впливають на рівень та форму струму і напруги у вторинному колі джерела. Отже за формою та рівнем цих сигналів можливо виявити наявність несправності та визначити її тип.

Переважає більшість зварювальних випрямлячів мають схожу будову силової частини. Тому слід очікувати, що характерні несправності будуть схожі. Дослідження проводилися для випрямлячів 2 типів: випрямляча з рухомими обмотками та з високочастотним транзисторним ключем (“чоперного”).

Так для зварювального випрямляча з рухомими обмотками характерні такі групи станів джерела: без несправностей; несправності трансформатора; несправності випрямного блоку. Випрямляч “чоперного” типу відрізняється наявністю силового транзисторного модуля для керування вихідними параметрами, для нього характерні такі групи станів: несправності трансформатора; несправності випрямного блоку; несправність транзисторного модуля. Несправності, що пов'язані

з роботою блоку керування транзисторним модулем, а також функціонування зворотніх зв'язків за струмом та напругою можуть мати багато різних проявів і для різної будови блоків керування будуть різними. Тому їх потрібно розглядати окремо для кожної окремої марки джерела живлення. Однак не врахування таких несправностей суттєво не впливає на визначення несправностей силової частини джерела.

Пошук несправностей є задачею кластеризації даних. Для таких задач доцільно застосовувати штучні нейронні мережі. Для вирішення такої задачі застосовують мережі зустрічного розповсюдження *LVQ*. Вони складаються з вхідного шару нейронів та так званих шарів Кохонена та Гросберга. Необхідну кількість нейронів першого шару мережі *LVQ* оцінювали відповідно до рекомендацій, наданих в літературі, за виразом:

$$\frac{R}{10} - n - m \leq S_1 \leq \frac{R}{2} - n;$$

де R – кількість елементів у вхідному векторі; n – розмірність вхідного сигналу; m – розмірність вихідного сигналу; N – кількість класів, на які розділено дані. Також кількість нейронів першого шару має не менш ніж у 2 рази перевищувати кількість класів, на які розділяються дані.

Враховуючи те, що кількість елементів у вхідному векторі, в даному випадку, дорівнює 24, розмірність вхідного сигналу – 2, вихідного – 1, а кількість класів – 5, то кількість нейронів у першому шарі повинна бути рівною 10.

У **третьому розділі** побудовано математичні моделі системи “джерело живлення – зварювальна дуга”. Модель складається з трьох основних блоків, а саме моделі зварювального випрямляча і моделей мережі живлення та навантаження (рис. 5). Моделювання проводили за допомогою математичного пакету *MATLAB 7.6* та пакету графічного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем *Simulink 7.1*.

Моделі зварювальних випрямлячів складаються зі стандартних блоків *Simulink*. Їх параметри відповідають параметрам реальних елементів.

Перевірка адекватності моделей зварювальних джерел живлення була проведена порівнянням статичних та динамічних характеристик модельованих і реальних джерел живлення. За критерій відповідності характеристик моделі реальним було прийнято коефіцієнт кореляції між ними. Оскільки коефіцієнти кореляції між кривими статичних та динамічних характеристик реального джерела та моделей перевищують 0.98, то комп'ютерні моделі можна вважати адекватними.

Блок “Навантаження” являє собою модель зварювальної дуги. Моделювання проводили для двох випадків: ручного дугового зварювання покритими електродами та зварювання плавким електродом в захисних газах.

Для ручного дугового зварювання покритими електродами характерний крупнокрапельний перенос електродного металу з випадковими короткими замиканнями з нормальним законом розподілу їх частоти та тривалості. Для описання таких випадкових процесів найкраще підходять марківські ланцюги. При сталому режимі система “джерело живлення – зварювальна дуга” характеризується двома станами: горіння дуги та короткого замикання. Кожен перехід з одного стану в інший характеризується імовірністю переходу P_{ij} за одиницю часу Δt . Визначення інтенсивностей переходів проводили дослідним шляхом. Для цього весь процес

зварювання розбивали на ділянки тривалістю $\Delta t=0.2$ мс та визначали кількість часових інтервалів, на яких система знаходиться в тому чи іншому стані. Імовірності переходів за одиницю часу визначали за співвідношенням:

$$P_{ij} = \frac{N_{i \rightarrow j}}{n_i};$$

де $N_{i \rightarrow j}$ - кількість переходів з i -го стану в j -ий, n_i - кількість ділянок в i -тому стані.

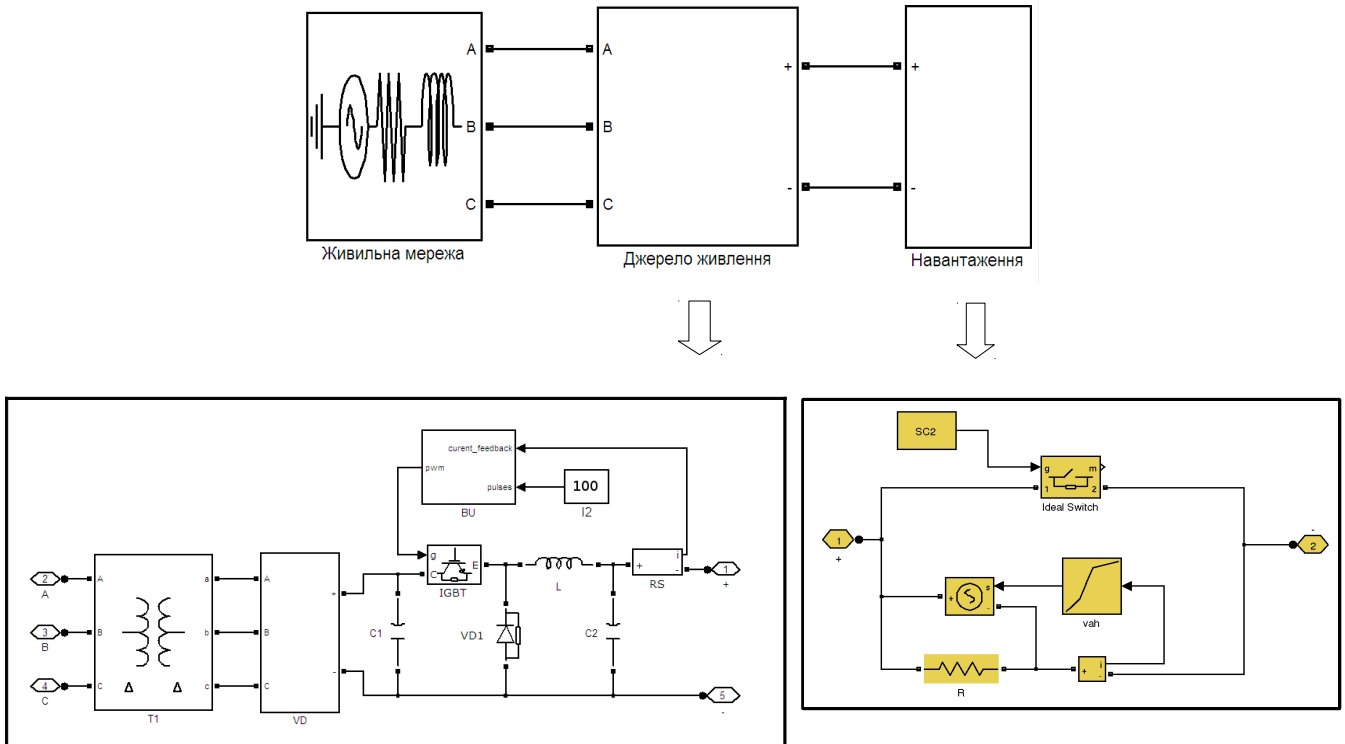


Рис. 5. Структурна схема моделі системи "джерело живлення — дуга" (зварювального випрямляча з високочастотним транзисторним ключем)

Визначено імовірності переходів системи з одного стану в інший для різних марок та діаметрів електродів (рис. 6). Отримані залежності подаються у вигляді матриці P_n через блок $SC2$ на "Ideal Switch" моделі навантаження (рис. 5), що необхідно для задання параметрів коротких замикань. Імітація нелінійного опору зварювальної дуги здійснювали за допомогою лінійного опору R , керованого джерела напруги та блоку табличної інтерполяції vah . Блок vah містить дані про вольтамперні характеристики дуги для заданих параметрів режиму зварювання.

Для перевірки адекватності імітації електричних процесів в дузі, які пов'язані з перенесенням електродного металу, порівнювали розподіл частоти та тривалості коротких замикань реального та модельованого процесу. В якості критерію відповідності розподілів застосовували коефіцієнт кореляції між функціями щільності імовірностей. Коефіцієнти кореляції для діаметрів електроду 2, 3 та 4 мм дорівнюють відповідно 0.8943, 0.9261 та 0.8692. Оскільки значення коефіцієнтів кореляції перевищує 0.85, то таку модель можна вважати адекватною.

Для MAG зварювання характерний перенос електродного металу з короткими замиканнями дугового проміжку. Тобто вони відбуваються періодично та мають структурований закон розподілу випадкової величини. Тому такий процес не може бути описаний за допомогою марківських ланцюгів. Процес переносу металу можна

описати за допомогою статистичних методів. Характеристики розподілу параметрів коротких замикань для різних режимів зварювання визначали при зварюванні електродним дротом діаметром 0,8, 1,0, 1,2 та 1,6 мм зразків з низьковуглецевої сталі. Отримані осцилограми струму та напруги фільтрували за допомогою цифрового фільтру Баттерворта з метою видалення високочастотних перешкод з частотою вище 1кГц.

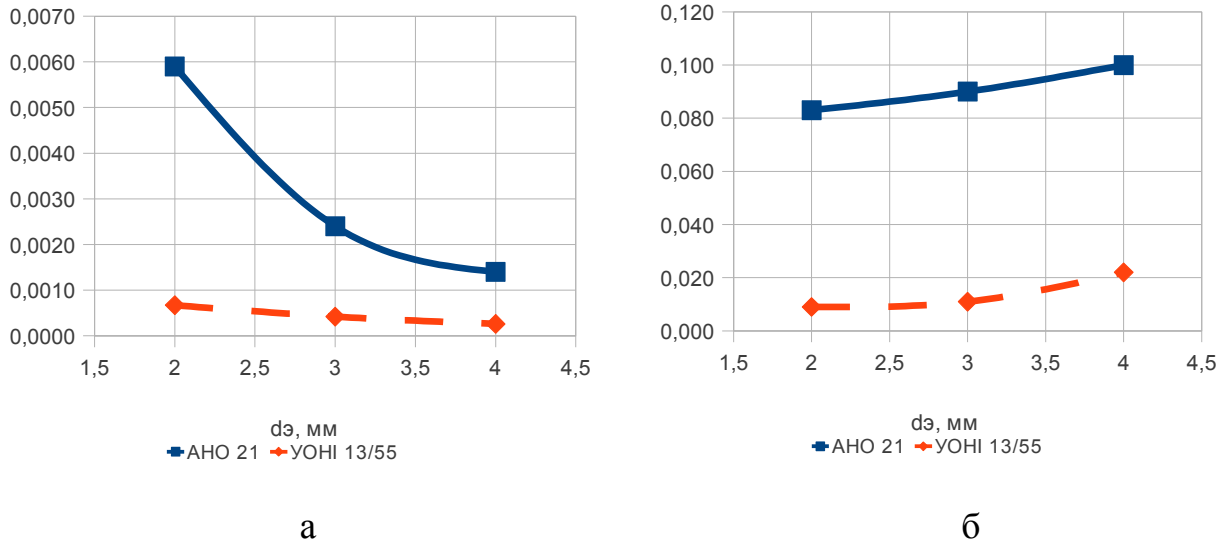


Рис. 6. Імовірності переходів: а – дуга-к.з.; б – к.з.-дуга

Процес *MAG* зварювання складається з двох випадкових процесів: горіння дуги та коротких замикань. Отже розподіли зварювального струму та напруги будуть сумою розподілів імовірностей двох процесів. Визначення виду розподілу проводили за допомогою *Distribution Fitting Tool* з пакету *Matlab*. Для цього будували функції щільності ймовірностей даних розподілів (рис. 7, 8) та визначали коефіцієнт кореляції r між ними.

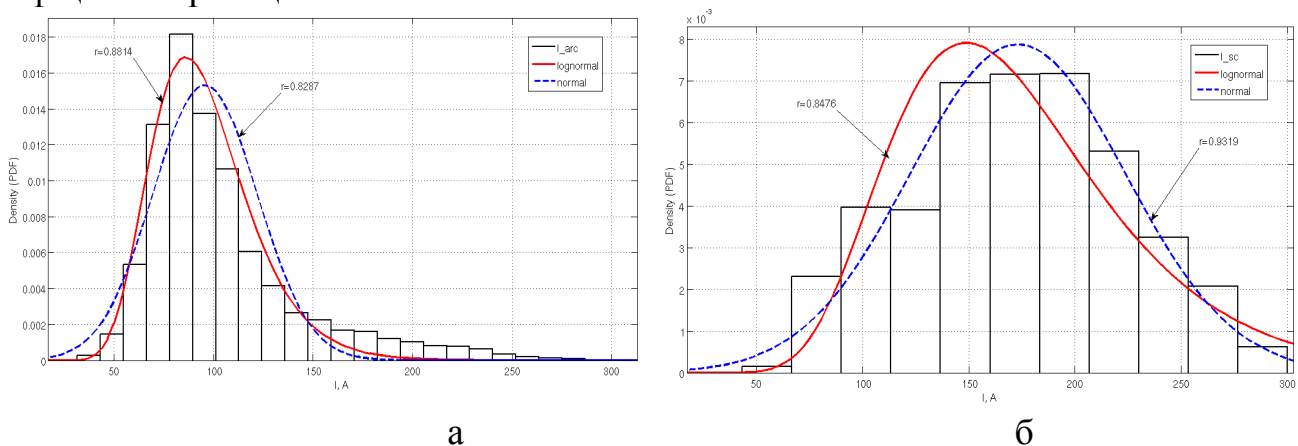


Рис. 7. Функції щільності ймовірностей різних законів розподілу: а – струму дуги; б – струму к.з.

Встановлено, що розподіл випадкової величини струму горіння дуги описується логнормальним законом розподілу, розподіл випадкової величини струму коротких замикань – нормальним, розподіл випадкової величини напруги горіння дуги – логнормальним, а розподіл випадкової величини напруги коротких замикань – нормальним.

Логнормальний та нормальний розподіли характеризуються двома параметрами μ та

σ . Для нормального розподілу параметр μ співпадає з його математичним сподіванням, а σ – з дисперсією. Визначено значення даних параметрів для зварювання дротом 0.8, 1.0, 1.2 та 1.6 мм для діапазону стабільного процесу зварювання. Отримані результати показали, що параметри розподілів струмів та напруг короткого замикання та горіння дуги залежать від зварювального струму і практично не залежать від діаметру зварювального дроту. Тому в подальшому при моделюванні використовували залежності $\mu = f(I_{36})$ та $\sigma = f(I_{36})$. Ці залежності з достатньою точністю описуються степеневими функціями виду $y = a \cdot x^b$.

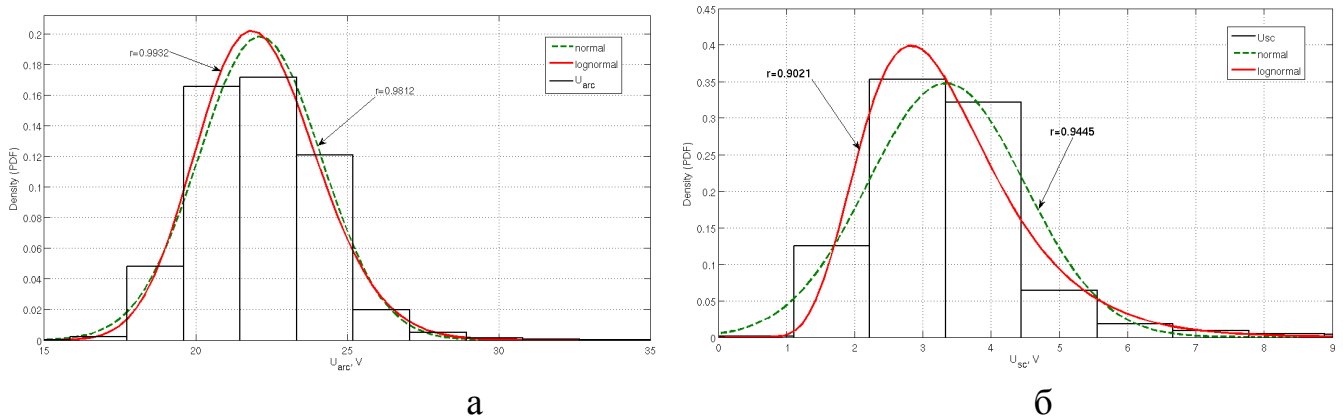


Рис. 8. Функції щільності ймовірностей різних законів розподілу: а – напруги дуги; б – напруги к.з.

Основними характеристиками коротких замикань є їх частота та тривалість. Закони розподілу цих величин визначали аналогічно до законів розподілу струму та напруги (рис. 9). Встановлено, що закон розподілу частоти коротких замикань близький до логнормального, а закон розподілу тривалості коротких замикань – до нормального.

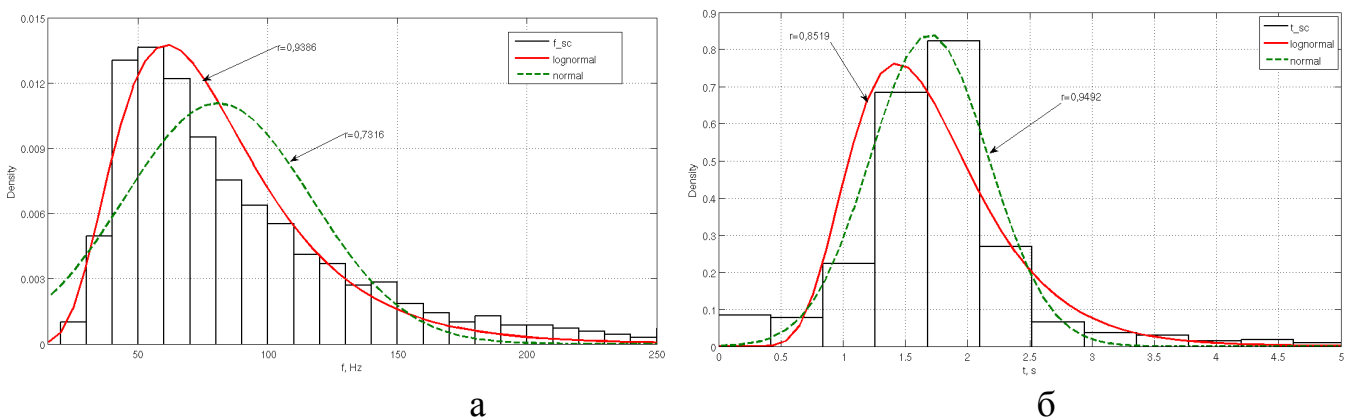


Рис. 9. Функції щільності ймовірностей різних законів розподілу: а – частоти к. з.; б – тривалості к.з.

Визначено значення параметрів μ та σ розподілів частоти та тривалості коротких замикань для зварювання дротом 0.8 – 1.6 мм. Результати показали, що як і для розподілів струму та напруги параметри μ та σ залежать від струму зварювання і з достатньою точністю описуються лінійними функціями виду $y = a \cdot x + b$.

Для перевірки адекватності роботи моделі порівнювали значення параметрів розподілу тривалості та частоти к. з., струму та напруги в дузі, струму та напруги під

час коротких замикань із заданими. Показано, що параметри розподілу тривалості та частоти коротких замикань повністю відповідають заданим. Параметри розподілу струму та напруги на дузі, струму та напруги під час коротких замикань відрізняються від заданих не більше ніж на 10%. Отже таку модель можна вважати адекватною.

Результатом роботи моделі “джерело живлення – зварювальна дуга” є осцилограми струмів та напруг в різних елементах джерела живлення. Це дає змогу на етапі проектування визначати вимоги до кожного елемента схеми та перевірити роботу схеми в цілому. Розроблені комп’ютерні моделі системи “джерело живлення – зварювальна дуга” також дають змогу на етапі проектування оцінити ефективність регулювання вихідних параметрів та визначити параметри регулятора. Це має особливо велике значення для імпульснодугового зварювання. Вибір частоти широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) для керування силовим транзисторним модулем *IGBT* зварювального джерела живлення здійснювали в діапазоні 1...20 кГц і індуктивності дроселя згладжування L 10...50 мГн. Встановлено, що для даної конфігурації силової частини зварювального випрямляча оптимальним є застосування ШІМ з частотою 10 кГц і індуктивністю дроселя згладжування 30 мкГн.

У четвертому розділі наведено результати перевірки методики контролю статичних та динамічних характеристик, а також технічного стану джерела живлення.

Для перевірки методики контролю статичних характеристик джерел живлення для дугового зварювання було використано два зварювальні випрямлячі з рухомими котушками (ВД-306) та їх динамічну комп’ютерну модель. Проводили порівняння характеристик джерел живлення з еталонним зразком. За еталон було взято модель випрямляча. Порівняння характеристик проводили для різних режимів роботи джерел. Отримано дані про відхилення статичних характеристик двох випрямлячів від характеристик еталону (рис. 10 а). Також проведено порівняння характеристик випрямлячів ВД-306 та ВДУ-506 (рис. 10 б).

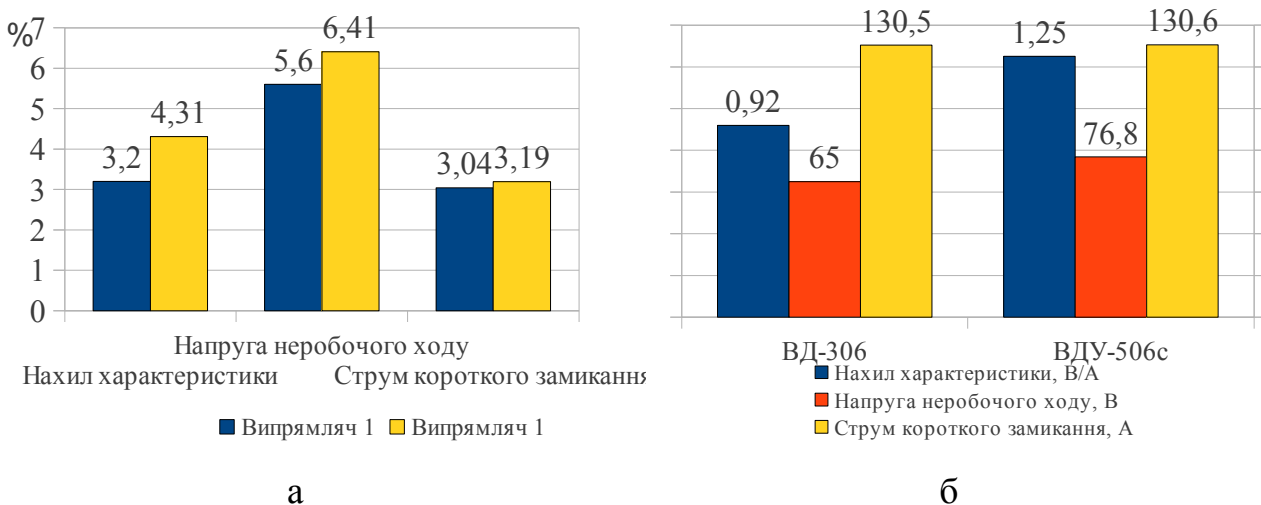


Рис. 10. Результат оцінювання статичних характеристик: а – відхилення статичних характеристик випрямлячів від характеристик еталону; б – порівняння характеристик випрямлячів ВД-306 та ВДУ-506

Здійснено контроль динамічних характеристик джерел живлення для чотирьох типів параметричних моделей (*ARX*, *ARMAX*, *OE* та *BJ*). На вхід моделі подавали одиничну ступінчасту вхідну дію. В якості вихідних даних для побудови моделі використовували відфільтровану та нормалізовану осцилограму реального перехідного процесу. Дослідження проводили для моделей порядків 2, 4, 6 та 8.

Дослідження показали, що для описування перехідних процесів, що відбуваються при переведенні джерела живлення з режиму неробочого ходу до режиму короткого замикання, найбільш доцільно використовувати параметричну модель типу *OE* порядку 4:

$$y(t) = \left[\frac{B(q)}{F(q)} \right] u(t - nk) + e(t)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 \cdot q^{-1} + b_3 \cdot q^{-2} + b_4 \cdot q^{-3} + b_5 \cdot q^{-4}$$

$$F(q) = f_1 + f_2 \cdot q^{-1} + f_3 \cdot q^{-2} + f_4 \cdot q^{-3} + f_5 \cdot q^{-4}$$

Побудову параметричних моделей перехідних процесів проводили за допомогою *System Identification Toolbox* з пакету *Matlab*. За допомогою моделей перехідних процесів визначали такі їх параметри: перерегулювання, час перехідного процесу та коефіцієнт загасання.

Для порівняння динамічних характеристик джерел живлення з еталоном (рис. 11 а) за еталон, як і у випадку порівняння статичних характеристик, було взято динамічну модель зварювального випрямляча з рухомими котушками. В якості випробуваних джерел живлення використовували два випрямлячі ВД-306. Також проведено порівняння динамічних характеристик випрямлячів ВД-306 та ВДУ-506 (рис. 11 б).

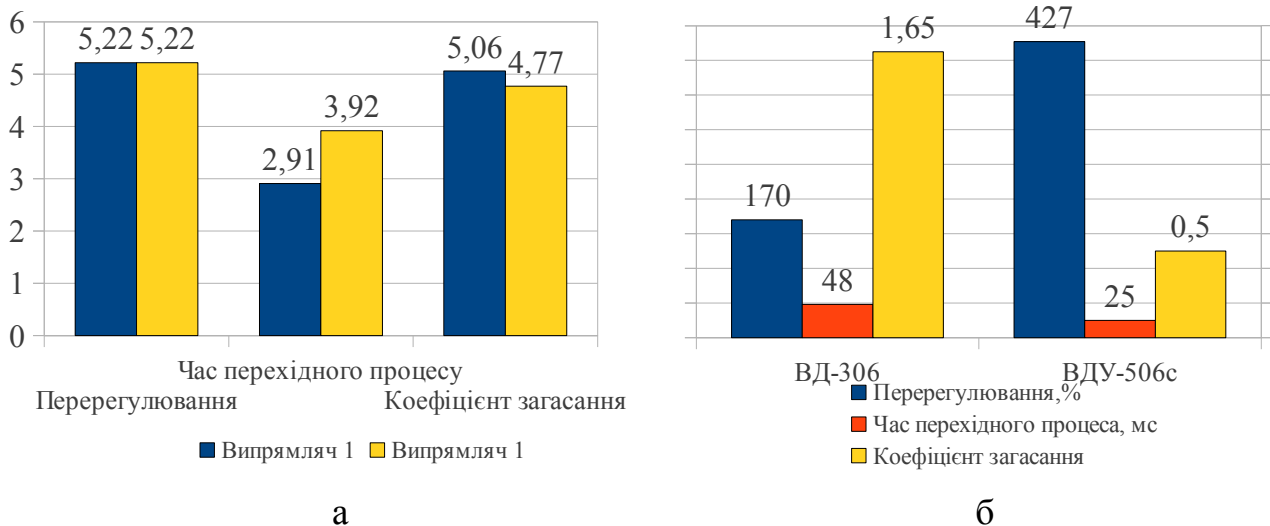


Рис. 11. Результат оцінювання динамічних характеристик: а – відхилення динамічних характеристик випрямлячів від характеристик еталону; б – порівняння характеристик випрямлячів ВД-306 та ВДУ-506

Здійснено оцінку технічного стану джерела живлення пошуком можливих несправностей за вихідними електричними параметрами із застосування штучних нейронних мереж.

Для навчання нейронної мережі сформували вхідний вектор даних, який містить інформацію про роботу джерела з різними типами несправностей. Для отримання цих

даних використовували розроблені комп'ютерні моделі джерел живлення. Після первинної обробки, з кожної осцилограми виділяли блок даних протяжністю 0.06 с. Аналіз типових осцилограм вторинного струму, які характеризують роботу джерел живлення з різними несправностями, та принципів роботи нейронних мереж показав, що на результат суттєвий вплив матиме фаза сигналу. Для виключення цього впливу кожен фрагмент осцилограми піддавали прямому перетворенню Фур'є (рис. 12). Проводили навчання мережі впродовж 1000 циклів.

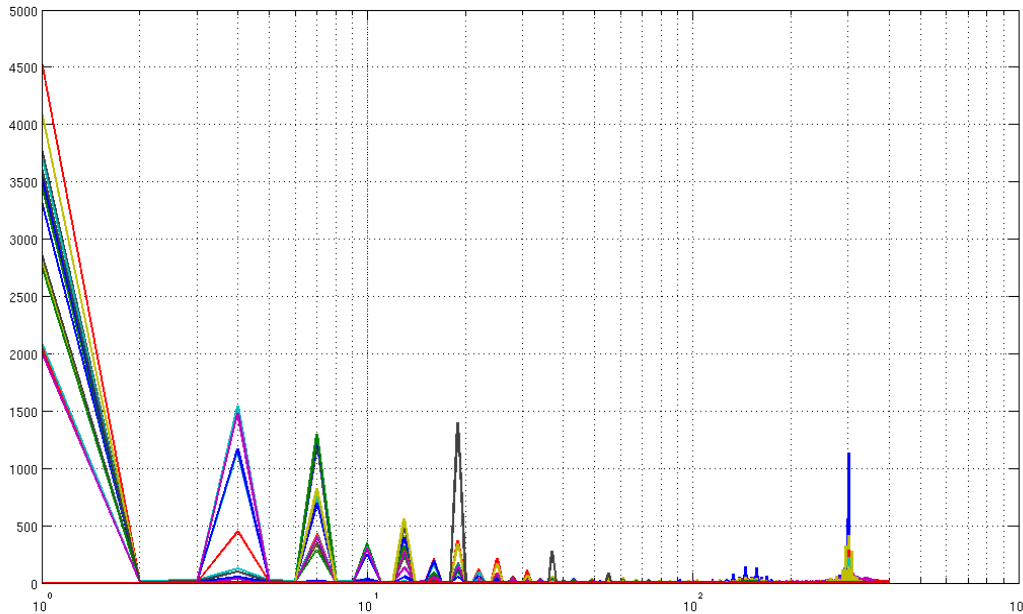


Рис. 12. Результат прямого перетворення Фур'є фрагментів осцилограм вторинного струму

Перевірку якості навчання нейронних мереж здійснюють за показниками точності та ефективності роботи. Точність роботи мережі перевіряли на навчальній вибірці. В результаті перевірки мережа безпомилково розпізнала всі типи несправностей окрім одного, віднісши несправність випрямного блоку до групи “несправність трансформатора”. Детальний аналіз осцилограм показав, що вони практично ідентична до осцилограм з групи “несправність трансформатора”. Таким чином мережа фізично не може вірно розпізнати цю несправність. Для перевірки впливу фази сигналу на визначення несправностей контрольну вибірку сформували з осцилограм з різною фазою сигналу. В результаті отримали вибірку зі 120 вхідних векторів. Отримано результат, ідентичний результату на навчальній вибірці.

Таким чином, точність роботи мережі склала 95,8 %, а ефективність – 100 %.

Розроблено систему оцінки зварювальних джерел для дугового зварювання з використанням алгоритмів нечіткої логіки. Проаналізовано особливості кожного показника зварювальних властивостей та побудовано відповідні функції приналежності. Встановлено можливість оцінки стабільності горіння дуги за коефіцієнтом варіації напруги на дузі. Визначено оптимальні значення коефіцієнту варіації напруги при стабільному горінні дуги залежно від зварювального струму (рис. 13). Система функціонує за алгоритмом Мамдані. В результаті отримали узагальнену оцінку зварювальних властивостей джерела живлення, яка знаходиться в інтервалі $[0, 1]$

Для перевірки роботи системи проводили порівняння результатів оцінювання інвертованого джерела живлення *Fronius TPS 5000* двома методами: згідно стандарту ГОСТ 25616-83 із залученням двох зварників високої кваліфікації та з використанням розробленої автоматизованої системи. Оцінювання проводили для ручного дугового зварювання (табл. 1). Встановлено, що оцінка, яка отримана за допомогою розробленої автоматизованої системи аналогічна оцінці за ГОСТ.

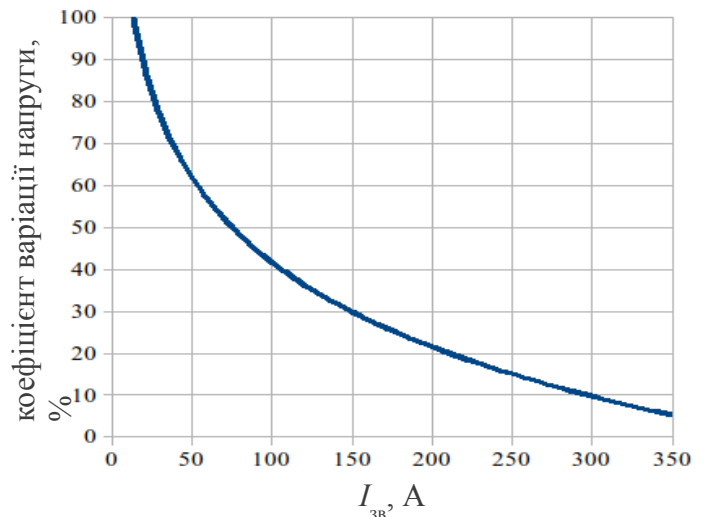


Рис. 13. Залежність коефіцієнта варіації напруги на дузі від зварювального струму при ММА зварюванні

Таблиця 1.

Порівняння результатів оцінювання зварювальних властивостей

	оцінка автоматизованою системою	середньозважена оцінка за ГОСТ 25616-83
Початкове запалювання дуги	4,6	4,75
Стабільність процесу зварювання	3,8	4
Розбризування металу	4,5	4,55
Якість формування шву	4,4	4,05
Еластичність дуги	4,8	4,67
Сумарна оцінка	22,1	22.02

У п'ятому розділі розроблено алгоритм контролю джерел живлення для дугового зварювання та описано апаратно-програмний комплекс для моніторингу якості джерел живлення.

Представлено результати випробування розробленої системи оцінювання зварювальних властивостей на основі алгоритмів нечіткої логіки при визначенні зварювальних властивостей дослідних зразків зварювального комплексу "Аркон-500К".

ВИСНОВКИ

1. На етапі проектування джерел живлення для дугового зварювання з метою забезпечення якості доцільно використовувати математичне моделювання системи "джерело живлення - зварювальна дуга" для прогнозування характеристик обладнання та визначення параметрів елементів. На етапах виробництва та експлуатації для контролю зварювальних властивостей та технічного стану джерел живлення доцільно використовувати системи контролю з використанням систем штучного інтелекту з метою підвищення

рівня автоматизації та зменшення суб'єктивності контролю.

2. Електричні процеси при ручному дуговому зварюванні покритими електродами адекватно описуються математичними моделями на основі марківських ланцюгів з точністю не менше ніж 83%, а при зварюванні в захисних газах – математичними моделями на основі методів статистичного аналізу з точністю не менше ніж 90%. Використання розроблених моделей “джерело живлення - зварювальна дуга” дозволяє визначити, з урахуванням стохастичних процесів у дузі, вимоги до кожного елемента схеми та параметри регулятора, що забезпечують необхідні властивості джерела живлення.
3. Для оцінки зварювальних властивостей джерел живлення для дугового зварювання доцільно використовувати системи, що базуються на оцінці показників зварювальних властивостей за осцилограмами зварювальних струму та напруги. Зведення результатів оцінки до узагальненого показника доцільно виконувати за допомогою алгоритмів нечіткої логіки. Розроблена система оцінювання дозволила скоротити витрати часу та матеріальні витрати на проведення оцінки зварювальних властивостей, а також суттєво знизити суб'єктивність оцінки.
4. За статичними та динамічними характеристиками зварювальних джерел живлення можна оцінювати їх зварювальні властивості. Спадні ВАХ слід оцінювати за напругою неробочого ходу, струмом короткого замикання та нахилом характеристики в робочому діапазоні, жорсткі – напругою неробочого ходу та нахилом характеристики в робочому діапазоні. Коливальні перехідні процеси у вторинному колі джерела живлення слід оцінювати за часом наростання, часом перехідного процесу, перерегулюванням та коефіцієнтом загасання. Встановлено, що для адекватного описання перехідних процесів у вторинному колі джерела живлення, які відбуваються при переведенні джерела живлення з режиму на режим, найбільше підходить параметрична модель зворотної помилки типу ОЕ порядку 2...6.
5. За електричними параметрами на виході джерела живлення доцільно оцінювати їх технічний стан, а саме можливість виникнення несправностей. Для аналізу цих електричних параметрів слід використовувати штучні нейронні мережі. Використання штучної нейронної мережі LVQ для аналізу осцилограм вторинного струму з метою пошуку несправностей дозволило виявити несправності з точністю 95,8 %. Ефективність роботи мережі складає 100 %. Для виключення впливу величини електричних параметрів на результат роботи штучних нейронних мереж слід проводити нормалізацію даних так, щоб мінімальне значення дорівнювало 0, а максимальне - 1. Для виключення впливу фази сигналу на результат штучних нейронних мереж слід проводити пряме перетворення Фур'є цих даних.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. *Скачков І. О.*. Методика контролю якості джерел живлення для дугового зварювання із застосуванням штучних нейронних мереж / *Скачков І. О.*,

- Шевченко М. В.* // Наукові вісті Національного технічного університету України “КПІ”. – 2008. – №4. С115-122
2. *Павшук В. М.* Визначення взаємозв’язку швидкості плавлення електродного дроту і параметрів імпульсів при зварюванні плавким електродом у захисних газах модульованим струмом / *Павшук В. М., Скачков І. О., Шевченко М. В.* // Наукові вісті Національного технічного університету України “КПІ”. – 2010. – №2. С124-129
 3. *Шевченко Н. В.* Методика оцінки сварочних свойств источников питания для дуговой сварки / *Шевченко Н. В., Скачков И. О., Пономарев В. Е.* // Автоматическая сварка. – 2011. – №4. С.50-54.
 4. *Шевченко М. В.* Моделювання процесу ручного дугового зварювання / *Шевченко М. В., Скачков І. О.* // Вісник Донбаської державної академії машинобудівної академії: тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2011. – №1(22). – С. 168-171
 5. *Шевченко М. В.* Контроль зварювальних властивостей джерел живлення в умовах виробництва / *Шевченко М. В., Скачков І. О.* // Міжнародна науково-технічна конференція “Досконалість зварювання – комплексний підхід”. – НТУУ “КПІ”, Київ, 2007. – С.53-55
 6. *Шевченко М. В.* Контроль технічного стану зварювальних джерел живлення / *Шевченко М. В., Різник Ю. М.* // IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів. – Київ, 2007. – С.222-223
 7. *Шевченко М. В.* Моделювання зварювальних джерел живлення / *Шевченко М. В., Ткаченко О. В.* // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів. – Київ, 2009. – С.237-228
 8. *Шевченко М. В.* Контроль зварювальних властивостей джерел живлення за електричними параметрами / *Шевченко М. В., Ткаченко О. В.* // V Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів. – Київ, 2009. – С.168-169

АНОТАЦІЯ

Шевченко М. В. Моніторинг якості джерел живлення для дугового зварювання протягом життєвого циклу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», МОНМС України, Київ – 2011 р.

У дисертаційній роботі розглянуто питання моніторингу якості джерел живлення для дугового зварювання з метою оцінки їх зварювальних властивостей та технічного стану за електричними параметрами.

Наведено аналіз сучасного стану розвитку джерел живлення для дугового зварювання. Проаналізовано сучасні методи оцінки властивостей джерел живлення для дугового зварювання.

Сформульовано критерії оцінки статичних та динамічних характеристик джерел живлення для дугового зварювання, а також критерії оцінки їх технічного стану.

Розроблено математичні моделі для моделювання електричних процесів в системі “джерело живлення – зварювальна дуга” при ручному дуговому зварюванні та зварюванні в захисних газах плавким електродом.

Розроблено систему оцінки зварювальних властивостей джерел живлення на основі систем нечіткої логіки, а також систему оцінювання технічного стану джерел живлення за електричними параметрами на основі штучних нейронних мереж.

Ключові слова: джерело живлення для дугового зварювання, зварювальні властивості, технічний стан джерел живлення, модель системи “джерело живлення – дуга”.

АННОТАЦІЯ

Шевченко Н. В. Мониторинг качества источников питания для дуговой сварки на протяжении жизненного цикла. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.06 – Сварка и родственные процессы и технологии. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», МОНМС Украины, Киев – 2011 г.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы мониторинга качества источников питания для дуговой сварки с целью оценки их сварочных свойств и технического состояния по электрическим параметрам. В результате проведения работы решена актуальная задача повышения объективности и автоматизация контроля качества сварочных источников питания в процессе их производства и эксплуатации, а также оценки их технического состояния.

Приведен анализ современного состояния развития источников питания для дуговой сварки. Выявлено, что есть тенденции к увеличению объемов производства источников питания для дуговой сварки. Проанализированы современные методы оценки свойств источников питания для дуговой сварки. Установлено, что перспективным является построение системы оценки с использованием систем искусственного интеллекта.

Проанализированы возможности систем искусственного интеллекта. Определено, что для построения многокритериальных систем оценивания наиболее подходят системы на основе алгоритмов нечеткой логики, а для решения задач распознавания образов и кластеризации данных - искусственные нейронные сети.

Сформулированы критерии оценки статических и динамических характеристик источников питания для дуговой сварки, а также критерии оценки их технического состояния. Техническое состояние сварочных источников питания оценивали по наличию технических неисправностей, возникающих в результате износа элементов или производственного брака. Наличие неисправностей определяли по форме тока или напряжения во вторичной цепи источника питания. Для таких задач целесообразно применять искусственные нейронные сети встречного распространения LVQ.

Разработаны математические модели для моделирования электрических процессов в системе "источник питания - сварочная дуга" при ручной дуговой сварке и сварке в защитных газах плавящимся электродом. Электрические

процессы при ручной дуговой сварке моделировали с помощью макрковских цепей. Определены вероятности переходов системы из одного состояния в другое для различных марок электродов. Моделирование процесса сварки плавящимся электродом в защитных газах производили на основании статистической оценки совокупности двух процессов: горения дуги и короткого замыкания дугового промежутка. Определены законы и параметры распределения случайной величины мгновенных значений тока и напряжения в сварочной цепи, а также частоты и длительности коротких замыканий дугового промежутка.

Разработана система оценки сварочных свойств источников питания на основе систем нечеткой логики. Определены функции принадлежности для каждого показателя сварочных свойств и алгоритм получения обобщенной оценки. Адекватность работы системы подтверждена сравнением результатов оценки источников питания для ручной дуговой сварки разработанной системой и традиционным методом с использованием экспертной оценки двух сварщиков высокой квалификации. Результат оценки системы не отличается от оценок сварщиков.

Разработана система оценки технического состояния источников питания по электрическим параметрам на основе искусственных нейронных сетей. Проанализировано влияние разного рода неисправностей на электрические параметры источника питания. Предложена методика подготовки данных для обучения искусственных нейронных сетей с целью предотвращения влияния уровня и фазы сигнала на качество распознавания неисправностей. Точность распознавания неисправностей составила 95 %, а эффективность работы системы 100 %.

Ключевые слова: источник питания для дуговой сварки, сварочные свойства, техническое состояние источника питания, модель системы "источник питания — дуга".

ABSTRACT

Shevchenko M. V. Monitoring of quality of arc welding power supplies during their life cycle. - Manuscript.

Thesis for candidate of technical sciences degree in speciality 05/03/06 — Welding and related processes and technologies. - National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, - 2011.

The thesis reveals problems of monitoring of quality of power supplies for arc welding. The purpose of monitoring is to evaluate their welding characteristics and operating conditions by values of electrical parameters.

Up-to-date state of art in arc welding power supplied production was analyzed as well as methods of evaluation of their welding characteristics.

Criteria for evaluation of static and dynamic characteristics of power supplies and for evaluation of their operation conditions were developed.

Computer models for simulation of electrical processes in the “power supply — welding arc” system were developed for MMA and MIG/MAG welding methods.

The system for evaluation of welding characteristics of power supplies based on fuzzy logic was developed. The system for evaluation of operation conditions of power supplies based on artificial neural network was developed.

Key words: power supply for arc welding, welding characteristics, operating conditions of power supply, model of “power supply — welding arc” system.