

Технічні науки

УДК 621.314

Петрикеев Євген Ігорович

студент кафедри Промислової електроніки

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Петрикеев Евгений Игоревич

студент кафедры Промышленной электроники

Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Petrykeiev Yevhen

Student of the Faculty of Industrial Electronic

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Науковий керівник:

Бондаренко Олександр Федорович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри Промислової електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЗІ

ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ С

ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

CONTROL SYSTEM FOR CONTACT WELDING WITH FEEDBACK

***Анотація.** Основним завданням роботи є аналіз результатів існуючих систем та створення програмного забезпечення для врахування*

параметрів зворотних зв'язків для досягання найбільшої відповідності реального закону до заданого.

В роботі зведено дані про дослідження впливу приладів регулювання на джерело контактного живлення, обрано необхідні зворотні зв'язки для отримання даних до мікроконтролеру та обрано необхідний спосіб регулювання за струмом та напругою.

Дана робота має практичне застосування у промисловості для контактної зварювання різних металів.

Ключові слова: контактне зварювання, зворотній зв'язок, зварювальний імпульс, джерело живлення, регулятор, мікроконтролер.

Аннотация. Основной задачей работы является анализ результатов существующих систем и создание программного обеспечения для учета параметров обратных связей для достижения наибольшего соответствия реального закона с заданным.

В работе сведено данные об исследовании влияния приборов регулирования на источник контактной питания, избран необходимые обратные связи для получения данных в микроконтроллера и избран необходимый способ регулирования по току и напряжению.

Данная работа имеет практическое применение в промышленности для контактной сварки различных металлов.

Ключевые слова: контактная сварка, обратная связь, сварочный импульс, источник питания, регулятор, микроконтроллер.

Summary. The main task of the work is to analyze the results of existing systems and create software to take into account the parameters of feedback to achieve the highest compliance with the real law to the given.

In this work, the data on the study of the influence of control devices on the power supply source is compiled, the necessary feedback is selected for

obtaining data to the microcontroller, and the necessary method for adjusting the current and voltage is selected.

This work has practical application in the industry for contact welding of various metals.

Key words: contact welding, feedback, welding pulse, power supply, regulator, microcontroller.

Вступ. Контактне зварювання - один з провідних способів нероз'ємного з'єднання деталей в різних галузях техніки, це один із видів зварювання тиском, під час якого з'єднання утворюється у результаті нагрівання країв заготовок джоулевым теплом (теплом опору) при проходженні зварювального електричного струму через деталі та наступної або одночасної пластичної деформації під зусиллям тиснення. Цей метод зварювання відрізняється дуже високим ступенем механізації, роботизації, автоматизації і, як наслідок, високою продуктивністю. Завдяки вдосконаленню технологічного процесу і модернізації устаткування області, використання контактного зварювання безперервно розширюються. В даний час контактне зварювання є провідним процесом отримання нероз'ємних з'єднань металів. Точкова зварка найбільш автоматизований процес, широко вживаний в масовому виробництві сучасних легкових автомобілів, конструкцій літаків [1].

Якість з'єднань при контактному зварюванні залежить від стабільності тепловиділення у розплавленому ядрі зварної точки, на яку має вплив ряд зовнішніх факторів. До таких факторів відносяться відхилення, коливання, несинусоїдальність напруги живлення, наявність окислів або забруднень у зварному з'єднанні. Оскільки контактне зварювання може бути використано для різних матеріалів, параметри процесу постійно необхідно змінювати та коригувати, в залежності від бажаного результату. Для коригування параметрів зварювання шляхом

формування правильного електричного імпульсу використовуються автоматичні системи керування.

Весь процес контактного зварювання описується за формулою (1) енергії, що вивільнюється у зоні зварювання.

$$W_{36} = \int u_k(t) \cdot i_2(t) dt, \quad (1)$$

де $u_k(t)$ - миттєва напруга на зварювальному контакті; $i_2(t)$ - миттєвий зварювальний струм.

Таким чином виникає задача розробки способу стабілізації тепловиділення у зварювальному контакті, що дозволяє стабілізувати зварювальний процес. Тобто, для керування і встановлення різних режимів зварювання необхідно керування двома основними параметрами – зварювальна напруга та струм [2].

Сучасні системи керування для контактного зварювання можуть бути ручні, де користувач має змогу виставляти певні параметри процесу зварювання або автоматизовані, де система розраховуватиме автоматично параметри для найбільш якісного процесу зварювання. Оскільки, для розробки приладу для контактного зварювання можуть бути обрані різні структури побудови приладу, системи керування також повинні враховувати це.

Основною задачею систем керування являється формування імпульсу, який передається відповідним чином до джерела живлення, для коректного відтворення процесу контактного зварювання. За формування імпульсів заданої форми відповідають мікропроцесорні системи, сигнал яких підсилюється за допомогою підсилювальних каскадів до джерела живлення для контактного зварювання. Нинішні системи керування можна поділити на три види:

- Із ручним налаштуванням;
- Із автоматичним налаштуванням, без зворотного зв'язку;

- Із автоматичним налаштуванням, із зворотнім зв'язком за струмом та напругою.

Системи керування із зворотнім зв'язком дають можливість автоматично коригувати зварювальний імпульс відповідно до параметрів, для отримання найбільш якісного зварювання.

Топології контактного зварювання

Сучасні прилади контактного зварювання можуть мати різну структуру, в залежності від потреб. Такі апарати можуть бути підвісними, стаціонарними або переносними, в залежності від умов роботи. Структура таких приладів відрізняється формою та видом електродів, що контактують, а також джерелом живлення. Саме різні види джерел живлення, що можуть бути використані для приладу контактного зварювання впливають на можливості приладу щодо зварювання різних матеріалів, а також якості зварного шву. На даний момент широко використовуються такі джерела живлення зварювальних приладів, як:

- Трансформаторне джерело живлення;
- Трансформаторне джерело живлення з випрямлячем;
- Інверторне джерело живлення;
- Суперконденсаторне джерело живлення.

Трансформаторний тип має на увазі використання мережевого трансформатора для перетворення напруги до необхідного рівня. Регулювання вихідних значень струму може проводитися за допомогою зміни зазору між обмотками трансформатора. При цьому вихідний струм має змінну форму. Даний тип апаратів є найбільш надійним, але в той же час габаритним, і не може забезпечити високий рівень якості зварювання.

Тип трансформаторного джерела живлення з випрямлячем, відрізняється від трансформаторного наявністю вихідного випрямного блоку. В даному випадку зварювальний струм виявляється постійним. Це

призводить до поліпшення якості зварювального шва. Однак недоліки, вага і габаритність, зберігаються.

Інверторний тип є найбільш сучасним джерелом струму для зварювальних апаратів. За останні п'ятнадцять років характеристики використовуваних в таких джерелах напівпровідникових елементів, їх якість і надійність значно зросли. Інверторні джерела живлення дозволяють досягти високої якості регулювання параметрів зварного струму, отримати високостабільні параметри, поліпшити масогабаритні характеристики [3].

Трансформатор в якості джерела живлення являється найбільш розповсюдженою технологією, який використовується з моменту винаходу технології зварювання. Якщо в якості джерела живлення встановлено трансформатор, то перед зварюванням, системі керування необхідно дослідити параметри трансформатора, для того щоб налаштувати параметри зварювального імпульсу відповідно до режиму зварювання. Після закінчення зварювання, система керування має підготувати трансформатор до повторного процесу.

Структура блоку живлення інверторного зварювального апарату складається з декількох основних складових: вхідного випрямляча, коректора коефіцієнта потужності, інвертора, ВЧ-трансформатора, системи управління (рис. 1). Якщо потрібне отримання постійного вихідного струму, в структуру легко може бути доданий вихідний випрямляч. Система управління формує ШІМ-сигнал для силових ключів, обробляє сигнали зворотного зв'язку від навантаження, здійснює взаємодію з оператором, виявляє виникнення аварійних ситуацій і так далі.

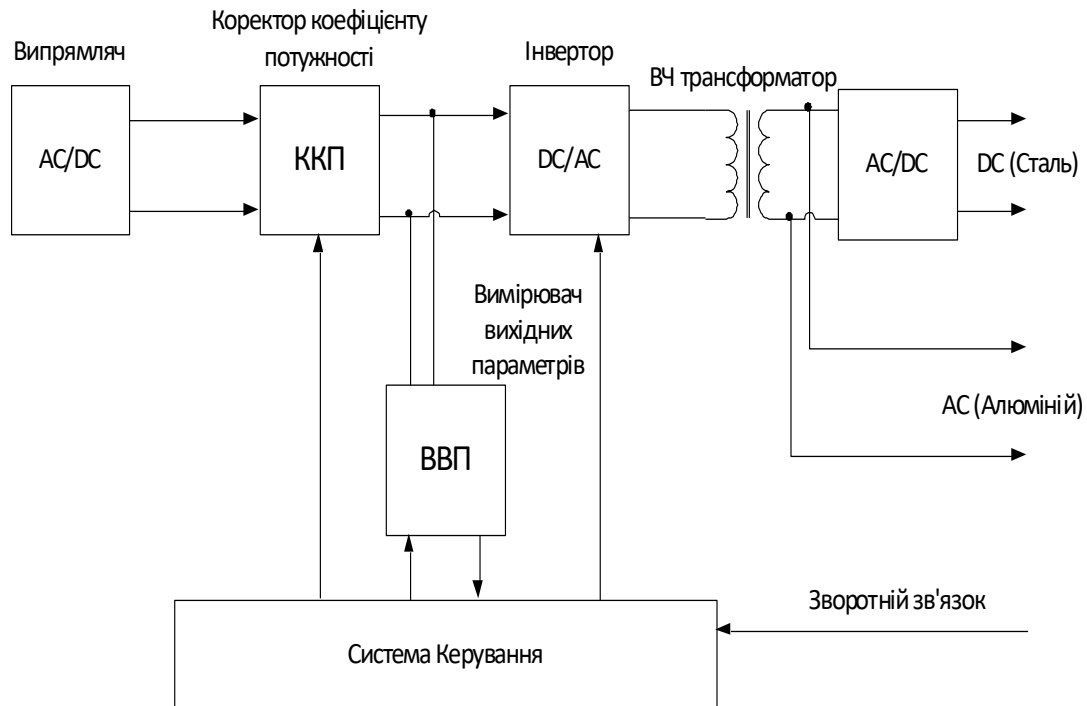


Рис. 1. Структурна схема інверторного зварювального приладу

Проте проблема великих габаритів та маси трансформатора досі залишалася актуальною, тому подібні топології зварювальних приладів, що використовують трансформатор не позбавлені цієї проблеми. Сучасні технології дозволили використання у якості джерела живлення суперконденсатори, що значно зменшили розміри та масу приладів, а також дали змогу більш точно контролювати параметри зварювання, як частота та максимальне значення струму, що підвищило якість зварювання.

Для цього типу виробів найприйнятнішими є машини з конденсаторними дозувальниками енергії, які володіють принциповими позитивними якостями: менша чутливість до варіації контактного опору в початковій стадії нагрівання, плавна неперервна зміна густини струму, принципова можливість узгодження температурного поля з фізичними ефектами утворення з'єднання, монотонність зміни основних параметрів процесу (зменшення ймовірності дефектності виробів у разі порушень технології та жорстких режимах зварювання [4]. Також слід врахувати

простоту комутації при заряді і розряді батареї конденсаторів і можливість тонкого дозування накопиченої енергії за рахунок регулювання рівня напруги заряду або тривалості імпульсу впливу. В даний час в якості ємнісних накопичувачів енергії все частіше знаходять застосування конденсаторні батареї, які виконані на базі осередків з подвійним електричним шаром, - суперконденсатори (СК). Однак, енергії одного СК може не вистачити на більш енергоємні процеси, тому СК об'єднують у декілька послідовно з'єднаних комірок (рис. 2). При використанні суперконденсаторів, системі керування необхідно враховувати час заряду після кожного процесу зварювання.

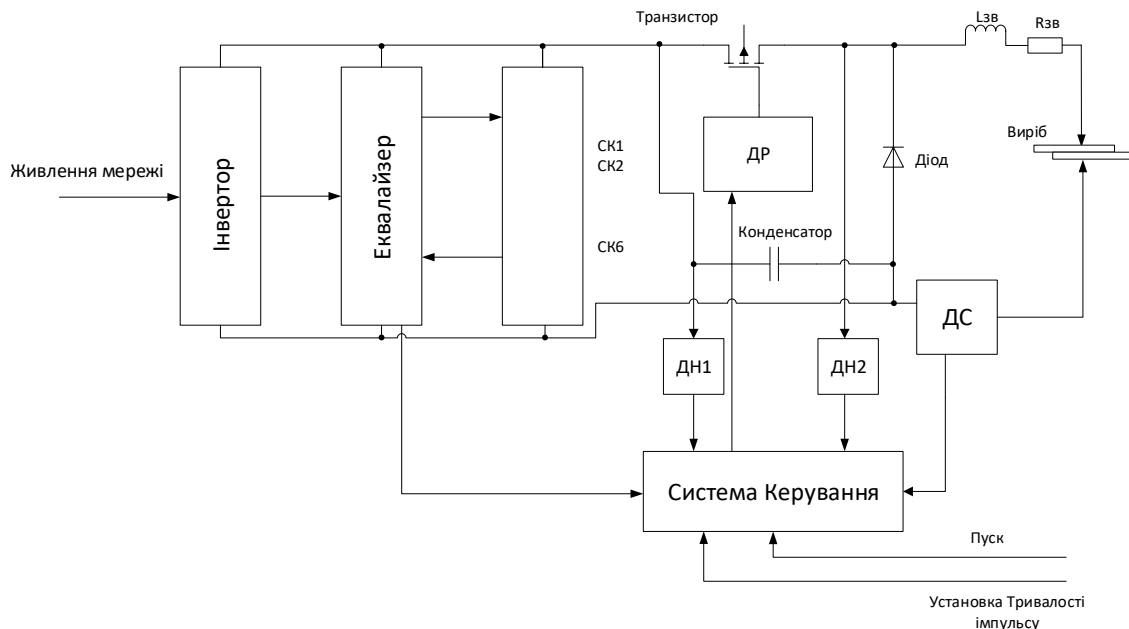


Рис. 2. Структурна схема використання суперконденсаторів для контактного зварювання

При проведенні експериментів із СК було помічено, що напруга на об'єднаній СК батареї (СКБ) напруга менше ніж номінальна. Для найбільш ефективного використання енергетичних параметрів СКБ використовується еквайзер, що вирівнює напруги на різних комірках конденсаторної батареї. Існують різні типи еквайзерів:

- Пасивні розсіюють;
- Активні розсіювальні;

- Активні енергозберігаючі.

У зв'язку з сучасними вимогами до екології енергосистем та енергозбереження за доцільне детально розглянути побудову систем дозаряду СК із застосуванням активних енергозберігаючих еквалайзерів.

ДН1, ДН2 – давачі напруги, що виступають в якості зворотного зв'язку.

ДС – давач струму для реалізації зворотного зв'язку за струмом.

ДР – драйвер, що використовується для узгодження керування транзистора комутації із системою керування.

На практиці комірки СК слід об'єднувати в батареї для отримання необхідних і прийнятних струмів навантаження ємнісного накопичувача енергії. Кількість послідовно з'єднаних осередків в такій батареї визначає її робоча напруга, а кількість паралельно з'єднаних ланок - її максимальний робочий струм і ККД, що необхідно враховувати при створенні СКБ. Для якісного зварювального шву необхідно точна дозована кількість енергії, що передається за допомогою комутатора у вигляді транзистора, найчастіше IGBT [5].

Особливості контактного зварювання

Для налаштування системи керування необхідно враховувати не тільки параметри різних матеріалів для зварювання, а також протікання самого зварювального процесу. Електричний опір зварювального контакту змінюється в процесі зварювання іншим чином. Поверхня металу, навіть добре обробленого, має нерівності, і при стисненні металевих деталей зіткнення відбувається лише в окремих фізичних точках (рис. 3). При пропущенні електричного струму в контакті спостерігається більш-менш значне падіння напруги, що свідчить про відповідний омичному опору контакту.

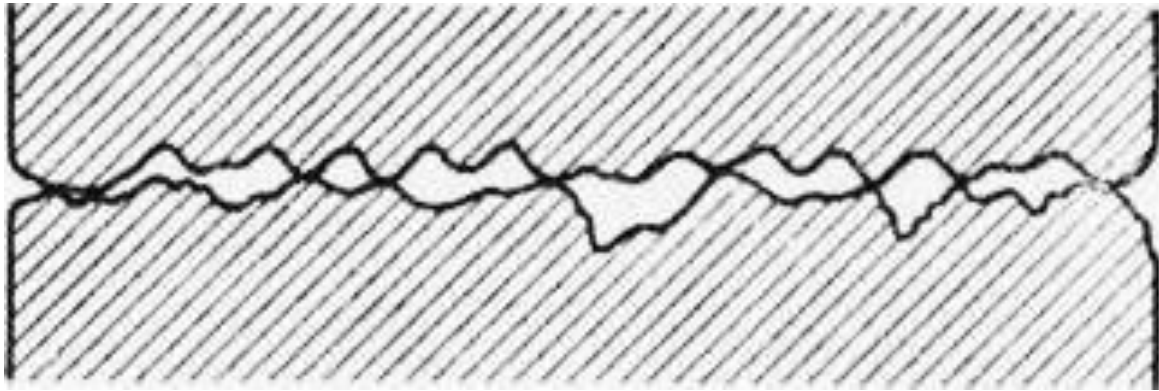


Рис. 3. Поверхні зварювальних матеріалів

Опір контакту зменшується з підвищенням температури. Це пояснюється збільшенням пластичних деформацій металу з підвищенням температури і можливим руйнуванням поверхневих плівок при нагріванні. При температурі близько 500°C контактний опір стали стає дуже малим і практично не залежить від тиску. При температурах вище $600-800^{\circ}\text{C}$ опір контакту стає настільки малим, що їм зазвичай можна знехтувати. Таким чином, складові загального опору зварювального кола при контактному зварюванні - опір металу і опір контакту при підвищенні температури - змінюються в протилежних напрямках: опір металу зростає, опір контакту падає, і загальний опір зварювального кола змінюється не так вже сильно, в залежності від температури.

Отже, для того щоб метал до і після зварювання залишив свої властивості після термічного процесу, зварювальний струм, за переднім фронтом, необхідно налаштувати таким чином щоб у метала був час нагрітися по всій площі поверхні, що контактує зі зварювальним контактом, для запобігання недогріву. Для запобігання виплеску зварювального матеріалу система повинна пропорційно збільшити амплітуду зварного струму, а для того щоб запобігти появу тріщин зварного ядра необхідно збільшити час кристалізації, що можливо зробити, якщо налаштувати зменшення подачі зварного струму після процесу

зварювання за заднім фронтом. Для найбільш оптимального рішення, щодо форми зварного струму пропонується (рис. 4).

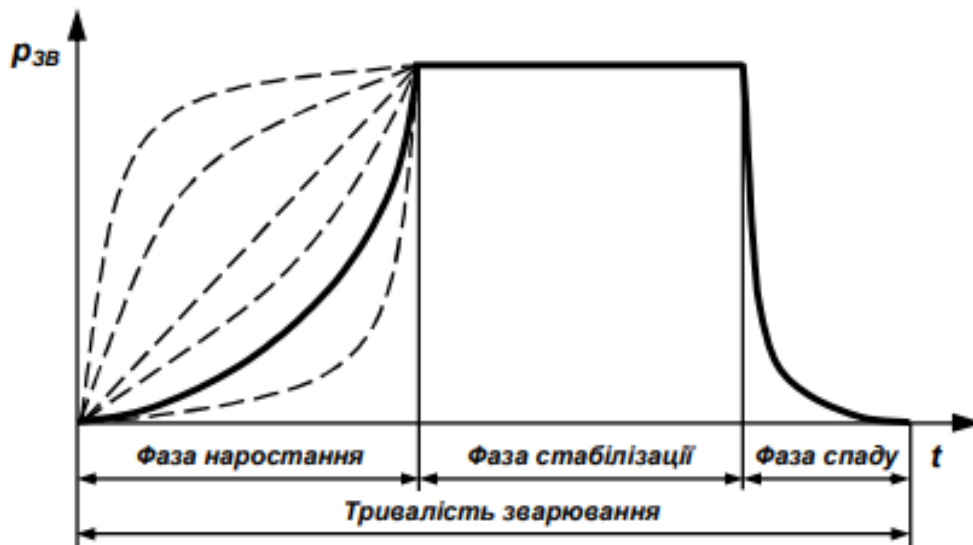


Рис. 4. Зміна потужності навантаження в процесі зварювання

Перевагами такого імпульсу є універсальність, так як такий імпульс найбільше підходить для аморфних матеріалів, тонких плівок, а також тонких проводів. До того ж існує можливість контролю процесу для більшої якості зварних швів. Зварювальний апарат при цьому встигає охолонути і повторити процес з частотою $\leq 1 / \text{с}$ [6].

Реалізація цього сигналу здобувається за допомогою ЦАП (цифрово-аналоговий перетворювач) у мікроконтролері або на його периферії. Сучасні прилади керування контактним зварюванням дають змогу обирати певні режими зварювання на основі даної форми сигналу, проте не дають більш точного коригування сигналу відповідно до потреб користувача. На платформі мікроконтролера STM32F429 розроблено програмований прилад керування процесами зварювання, що дає змогу керувати кути нахилу переднього фронту, тривалість амплітудного значення сигналу та амплітуду самого імпульсу, а також кут нахилу заднього фронту. Це дає змогу налаштування системи на будь який вид контактного зварювання, з будь-якими матеріалами. Система має зворотні зв'язки, що отримують

реальну форму сигналу під час зварювання і далі порівнює значення, для компенсації недоліків реальної форми імпульсу, таким чином користувач матиме змогу отримати дані, зі зварювальних контактів, а система керування буде досягати заданої форми імпульсу шляхом перерахунку отриманих даних із сенсорів зворотного зв'язку.

Побудова регуляторів струму та напруги

Регулятори струму. Оскільки процеси зварювання супроводжуються різними змінами у провідності матеріалів, це впливає і на електричні параметри джерела живлення. Струм та напруга можуть різко змінюватися під час процесу і для їх стабілізації зварювальні прилади мають регулятори за струмом та напругою.

Конструктивно регулятор розділений на функціональні блоки:

Блок живлення, який складається із трансформатора і блока стабілізаторів на печатній платі і служить для перетворення напруги живлення мережі в напругу необхідної форми і величини для живлення всіх блоків регулятора;

Блок циклу, призначений для задання необхідної циклограми роботи контактної машини;

Блок рахунку, призначений для перетворення двійково-десятькового ходу і погодження з заданими значеннями тривалості позицій перемикача;

Блок регулювання струму, призначений для керування фазою включення тиристорного контактора. В схему фазового регулювання входить також понижувальний трансформатор, через який вводиться напруга з тиристорів контактора;

Блок підсилювачів, призначений для підсилення імпульсів керування тиристорним контактором, а також для включення клапанів.

Керування регуляторами проводиться шляхом замикання і розмикання контактів зварювальної машини. Дана структура була розглянута прикладі приладу РКС-801 [7].

Автоматичне регулювання струму також залежить від джерела живлення, що використовується у приладі. Для схеми живлення з акумульованою енергією (в електричному полі конденсатора), а протягом останніх років - з живленням постійним струмом або струмом низької частоти використовується регулятор, що вимірює струм спеціальними вимірювальними перетворювачами, що використовують шунти, трансформатори струму, пояс Роговського, датчики Холла та ін. Оскільки вторинні струми контактних машин сягають кількох десятків і навіть сотень кілоампер, найзручнішим датчиком струму є пояс Роговського. Датчики Холла використовують для вимірювання великих струмів, однак вони не є достатньо стабільними, особливо під час коливання температури оточуючого середовища. Шунти і вимірювальні трансформатори на великі струми мають занадто громіздку конструкцію [8].

Пояс Роговського є тороїдом із немагнітного матеріалу, наприклад, текстоліту, рівномірно обвитого тонким дротом, який надівають на струмоведучі частини вторинного контуру зварювальної машини. Е.Р.С. на виході пояса Роговського пропорційна швидкості змінювання зварювального струму:

$$e = -\mu_0 F \frac{\omega}{l} \frac{di_{3\phi}}{dt}, \quad (2)$$

де, μ_0 - магнітна стала; F - поперечний переріз тороїда; ω - кількість витків обмотки; l - довжина середньої лінії тороїда.

Напруга з тороїда подається на інтегратор, вихідна напруга якого виявляється пропорційною миттєвому значенню зварювального струму $I_{3\phi}$.

Подальше перетворення сигналу залежить від того, яке значення струму необхідно виміряти для регулювання: діюче $I_{3\phi}$, середнє $I_{сер}$, або амплітудне I_m . В машинах для конденсаторного зварювання, низькочастотних і постійного струму звичайно вимірюють амплітудне

значення I_m . В машинах змінного струму - діюче I_{36} або середнє значення струму $I_{ср}$.

Діюче значення струму найтісніше пов'язане з тепловими характеристиками процесу зварювання, однак іноді, щоб зробити простішою вимірювальну апаратуру, в системах регулювання використовують середнє значення струму.

Щоб одержати діюче значення струму необхідно виконати перетворення:

$$I_{36} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{36}^2 dt}, \quad (3)$$

а для одержання середнього значення

$$I_{ср} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_{36} dt, \quad (4)$$

де T - період напруги живильної мережі.

Напруга, пропорційна величині змінного струму, порівнюється з еталонним значенням. Одержаний сигнал помилки використовують для керування фазообертачем, що встановлює такий кут вмикання контактора, за якого середнє або діюче (в залежності від алгоритму керування, що використовується) значення зварювального струму дорівнює заданому.

Сучасні регулятори забезпечують стабілізацію зварювального струму з похибкою не більше як $\pm 1..2\%$. Швидкодія схеми складає 1-0,5 періоди напруги живильної мережі. Застосування регуляторів струму дозволяє усунути вплив на якість зварювання коливань напруги живильної мережі, зміни опору контуру машини внаслідок його нагрівання або внесення феромагнітних мас. В регуляторах струму контактного точкового зварювання використовується принцип керування за відхиленням.

Регулятори напруги. В регуляторах напруги на вхід вимірювального пристрою подається напруга, яку знімають з електродів зварювальної машини. Вимірювання падіння напруги між електродами пов'язане з

певними складнощами, які полягають у тому, що абсолютне значення $U_{ел}$ звичайно, невелике і не перевищує 0,5-1,5 В. У той же час на вимірювальне коло діє наведення від проходження зварювального струму, що складається з вимірювальною напругою і вносить визначену похибку. Існують методи компенсації цього наведення за допомогою зустрічно-ввімкненої напруги U_k , яка знімається з індуктивності, встановленої у контурі зварювальної машини (рис. 5).

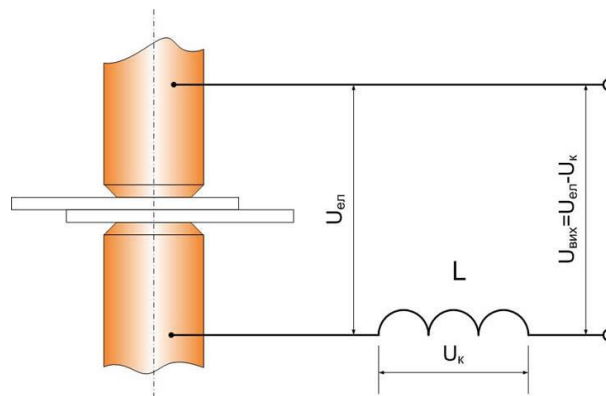


Рис. 5. Схема компенсації наведення під час вимірювання $U_{ел}$

В результаті вдається в певних межах зменшити похибку вимірювання $U_{ел}$. В усьому іншому принцип дії регулятора напруги аналогічний роботі регулятора струму і використовує також принцип керування за відхиленням [9].

Іншим рішенням є використання імпульсного регулятора (ІР) напруги, підключеного на вході інвертора, що забезпечує стабілізацію і зміна вихідної напруги, а також виконує функції захисту від перевантажень і аварійних процесів в силовій частині інвертора і навантаження [10].

Для регулювання струмів та напруг у регуляторах живлення використовується зворотній зв'язок виконаний у вигляді сенсорів струму та напруги, що передає значення на центральний контролер, що дає змогу перерахувати кут відкриття тиристорів, при використанні тиристорного керування, та коефіцієнт заповнення для транзисторного керування.

Висновки. Досліджені дані щодо конструктивних особливостей, та параметрів, що впливають на протікання процесу зварювання, дали необхідну інформацію про те, що слід враховувати для формування зварювального імпульсу, а також які дані необхідно отримувати зі зворотних зв'язків для досягнення на виході заданої форми зварювального імпульсу. Системі слід враховувати параметри, як на контактах зварювального приладу, так і на системі джерела живлення. Джерела живлення можуть мати різну складову: трансформаторну або конденсаторну, що створює додаткові параметри та залежності під час комутації. Для зменшення впливу цих параметрів на процес зварювання використовуються регулятори струмів та напруги, що мають свою систему керування та зворотні зв'язки із джерелом живлення.

Таким чином, систему керування, розроблену на мікроконтролері STM32F429 можна вважати універсальною для різних видів контактного зварювання, враховуватиме параметри матеріалів, що використовуються, а також вихідні дані під час процесу для досягнення ідеально заданої форми імпульсу користувачем, що збільшить якість зварних швів.

Література

1. Matviichuk O. Tekhnolohiya kontaktnoho zvaryuvannya, Rivne: rivnens'kyu profesiynyy litsey, 2013.
2. Podnebennaya S. Burlaka, V. и Gulakov S., «Avtomatizirovannaya sistema upravleniya istochnikom upravleniya pitaniya mashiny kontaktnoy svarkoy,» Vísnik priazov'skogo derzhavnogo tekhníchnogo uníversitetu, P. 134-138, 2016.
3. Gavrikov V. «Proyektiruyesh' svarochnyy apparat? – voz'mi komponenty International Rectifier!,» Novosti yelektroniki, Smolensk, 2015.

4. Biloborodchenko V. «Spetsializovani mashyny (km) dlya kondensatornoho tochkovoho mikrozvaryuvannya» Natsional'nyy universytet "L'vivs'ka politekhnika", Lviv, 2006.
5. Korotynskiy A., Drachenko N. i Shapka V. Avtomaticheskaya svarka Osobennosti primeneniya superkondensatorov v ustroystvakh dlya impul'snykh tekhnologiy svarki / Avtomaticheskaya svarka. № 9. P. 36-40, 2014.
6. Bondarenko A., Bondarenko Y., Safronov P. i Sydorec V. «Doslidzhennya systemy avtomatychnoho rehulyuvannya dzherela zhyvlennya dlya kontaktnoho mikrozvaryuvannya,» Energoberezhniye, eneregetika, audit. т. 1. № 9. P. 25-26. 24 05 2006.
7. V. Lebedev i V. Chernish, Avtomatizatsiya svarochnik protsessov, Kiyev: Golovnoye izdatel'stvo izdatel'skogo ob'yedineniya «Vishcha shkola», 1986.
8. Klimov V., Antsiborov A., Klimov A. i Kudinov A., Sposob izmereniya svarochnogo toka / RU Patent RU 2424096, 20 07 2011.
9. Skachkov I. Avtomatizatsiya kontaktnogo tochkovogo zvaryuvannya / KPI, 2009. URL:
http://moodle.ipo.kpi.ua/moodle/file.php/166/moodl_akz/r5t3.html
10. Petrosyan N. Setevoy preobrazovatel' dlya moshchnykh istochnikov elektrokontaktnykh svarochnykh ustanovok / nan ra i giua, т. LIV. 2001. № 1. P. 81-82.