

ЛЕВЧЕНКО О. Г., д-р техн. наук, професор
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ

МЕТОДОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ ПОЛІЧАСТОТНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОБОЧІЙ ЗОНІ ЗВАРНИКА

Анотація. На основі аналізу отриманих осцилограм та спектрограм магнітних полів (МП), що створюються машинами контактного точкового зварювання, виконано дослідження форми сигналів напруженості МП в різних частотних діапазонах. Встановлено графічні залежності запропонованого узагальненого показника перевищення рівня МП в робочій зоні від відстані та режимів контактного точкового зварювання типовою машиною МТ-2202 з урахуванням спектрального складу МП, що стало основою створення методики визначення рівня полічастотного МП.

Ключові слова: контактне зварювання, магнітне поле, режим зварювання, показник перевищення рівня магнітного поля.

Abstract. Based on the analysis of the obtained oscillograms and spectrograms of magnetic fields (MF) generated by contact spot welding machines, the study of the shape of the signals of the MF intensity in different frequency ranges is performed. The graphic dependences of the proposed generalized indicator of exceeding the level of MF in the working area on the distance and modes of contact spot welding by a typical machine MT-2202 taking into account the spectral composition of MF, which became the basis for creating a method for determining the level of polyfrequency MF.

Keywords: electric resistance welding, magnetic field, welding operation, magnetic field excess indicator.

Широке впровадження контактного зварювання в автомобільній, авіаційній, будівельній та інших галузях промисловості України привело до створення великого парку електричного обладнання і зварювальних машин (здебільшого змінного струму 50 Гц) різних типів та призначення потужністю більше десятків і сотень кВт. Під час експлуатації цього обладнання на робочих місцях зварників

(операторів контактного зварювання) генеруються магнітні поля (МП) значної напруженості, які багаторазово перевищують гранично допустимі рівні і можуть призводити до негативних функціональних змін в організмі людини, діючи на серцево-судинну, нервову, статеву, ендокринну та інші системи. Отже, питання шкідливого впливу МП на організм людини і, зокрема, операторів контактного зварювання на сьогоднішній день привертає особливу увагу. У закордонних публікаціях [1–5] відзначається, що зварники це одна з груп робітників, що піддаються дії ЕМП значної інтенсивності.

Головною проблемою визначення загального рівня МП є концептуальний підхід до методології оцінювання його загального впливу з урахуванням усіх частотних діапазонів. Так, до недавнього часу в гігієнічній практиці інтенсивність МП нормувалась згідно діючим нормам тільки на частоті 50 Гц [6]. Але останнім часом у зв'язку із введенням в Україні в дію нового нормативного документу – ДСН 3.3.6.096-2002 [7], що регламентує умови безпеки праці при роботі з постійними МП; постійними МП, що створюються випрямленим трифазним струмом; змінними МП частотою 50 Гц та імпульсними ЕМП у спектральному діапазоні частот від 0 до 1000 МГц виникає необхідність у вимірюванні й оцінюванні сигналів МП з урахуванням їхнього спектрального складу. Останнє тільки ускладнює методику визначення рівнів цих МП та оцінку їх дії на організм людини. І, як показали наші дослідження, таку методику можна створити на основі експериментальних досліджень і теоретичних узагальнень.

Метою даної роботи є створення методології визначення загального рівня полічастотного МП шляхом дослідження залежностей напруженостей його окремих гармонічних складових від електричної характеристики джерела МП (машини контактного точкового зварювання) і режимів зварювання (модуляції зварювального струму та зміни кута його фазового регулювання).

Для цього досліджували залежності рівнів МП у повному частотному діапазоні їх дії від технологічних параметрів роботи машини контактного зварювання, що їх створює, і відстані до неї.

Для експериментальних досліджень напруженості МП та їх спектральних діапазонів частот в робочій зоні використовували індукційний датчик магнітного поля ДМП-1, до складу якого входить мілітесламетр ТП2-2У; цифровий осцилограф «Vellemon PC Scopes» з функцією швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і ПК «Ezbook-700».

Вимірювання індукції МП виконувались у лабораторії Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України на типовому робочому місці оператора контактного зварювання в трьох взаємно перпендикулярних площинах. Вимірний датчик розміщувався на відстані 200, 400 і 600 мм від осі точки торкання електродів (L) ± 2 мм та з боку від машини. Вимірювання здійснювалось на рівні живота оператора-зварника — 1000 мм від підлоги.

Контактне точкове зварювання виконувалось стаціонарною машиною марки МТ-2202 загального призначення на змінному струмі з постійним зусиллям стискання одним або декількома імпульсами струму деталей з низьковуглецевих сталей. Характеристика машини: напруга живлення — 380 В, максимальний вторинний струм — 22 кА, споживча потужність машини — 40 кВА. Трансформатор машини має чотири ступені регулювання потужності, кожна наступна з яких збільшує потужність на 25 %. Для з'єднання деталей застосовують різні прийоми точкового зварювання за допомогою двох електродів з двостороннім підведенням модульованого імпульсного струму. Необхідна величина зварювального струму встановлювалась зміною форми його синусоїди методом регулювання кута фазового зсуву α між струмом і напругою холостого ходу трансформатора за допомогою тиристорів.

Для дослідження характеристик МП розглянемо форми сигналів зварювального струму джерела живлення машини контактного зварювання. Осцилограми зварювального струму (зміна сили струму $I_{зв}$ з часом t) цих машин представлені на рис. 1: а) одноімпульсне; б) двоімпульсне; в) триімпульсне; г) одноімпульсне з модуляцією переднього фронту; д) одноімпульсне з модуляцією заднього фронту; е) одноімпульсне з модуляцією переднього та заднього фронтів. Найбільш розповсюджена форма кривої зварювального струму, яка призначена для зварювання деталей зі звичайної низьковуглецевої сталі товщиною 0,5–2 мм, представлена на рис. 1, а. Для такої ж сталі, але більшої товщини (3–6 мм), корисна модульована крива струму (рис. 1, г). В залежності від властивостей металів використовують модуляцію зварювального струму заднього фронту (рис. 1, д), модуляцію переднього та заднього фронтів струму (рис. 1, е). Для сталей великої товщини (до 15–20 мм) слід рекомендувати криву струму, наведену на рис. 1, б. Тут початковий період нагрівання іде з відносно меншою силою струму, ніж процес кінцевого зварювання. Як амплітуда струмів підігрівачого $I_{пд}$ та зварювання $I_{зв}$, так і час $t_{пд}$ і $t_{зв}$ мо-

жуть регулюватися в широких границях. Трьохімпульсне вмикання струму, показане на рис. 1, в, досить ефективно при зварюванні погано зачищених деталей великої товщини. Дана система нагрівання добре підходить і для зачищених деталей, але великих габаритних розмірів, наприклад балок та ферм, коли конструктивна міцність не дозволяє негайне надійне контактування в зоні зварного з'єднання. При імпульсному зварюванні (рис. 1, б, в) також використовують принцип подачі першого підігрівуючого імпульсу та другого зварювального. Основний та додатковий імпульси струму мають незалежне регулювання за амплітудою і можуть подаватися з паузою або без неї. Основний імпульс має модуляцію переднього фронту $t_{\phi} = 0,025$ с, $t_{зв} = (0,03...0,07)$ с (рис 1, г).

У машинах контактного зварювання різних видів зварювальний струм має перервно-імпульсний характер, його амплітуда вимірюється в межах від одиниць до сотень кА, тривалість протікання струму – від 0,002 с до 30 с, тривалість пауз – від 0,020 с і більше. При цьому електричний струм створює в навколишньому середовищі МП з відповідними характеристиками, які можуть багатократно перевищувати нормативні значення.

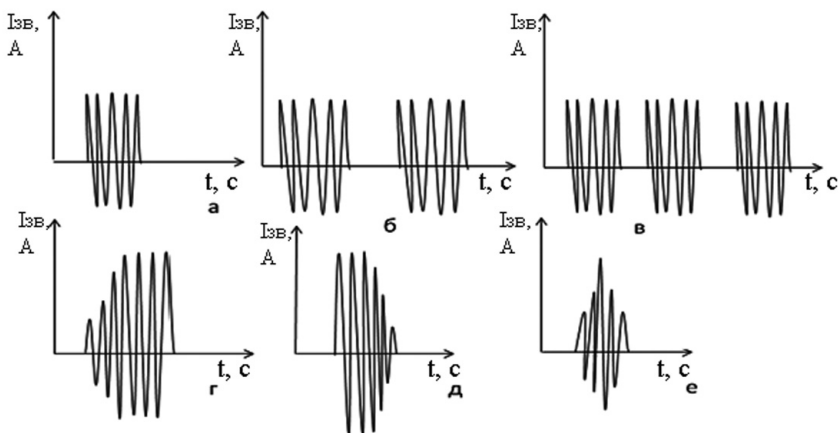


Рис. 1. Осцилограми зварювального струму контактної точкового зварювання

Гранично допустимий рівень (ГДР) напруженості імпульсних ЕМП в спектральному діапазоні частот від 0 до 1000 МГц на робочих місцях операторів-зварників у відповідності з ДСН 3.3.6.096-2002 [7]

визначається з допустимого енергетичного навантаження та часу впливу за формулою (1)

$$H_{\Gamma Д} = \sqrt{\frac{E H_{H_{\Gamma Д}}}{T}}, \quad (1)$$

де $H_{\Gamma Д}$ – гранично допустиме значення напруженості магнітного поля (А/м); $E H_{H_{\Gamma Д}}$ – гранично допустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня, (А/м)² год; T – час дії, год.

Оскільки напруженість МП однієї з гармонік може бути більшою від ГДР, а іншої меншою, об'єктивно оцінити загальне енергетичне навантаження МП на організм операторів контактної зварювання, враховуючи одночасно всі гармонічні складові МП, неможливо. Тому для діапазону частот ≤ 300 МГц, в яких працюють джерела МП і для яких встановлено різні ГДР, необхідно дотримуватися наступних вимог [7]:

$$\frac{H_1^2}{H_{\Gamma Д1}^2} + \frac{H_2^2}{H_{\Gamma Д2}^2} + \dots + \frac{H_n^2}{H_{\Gamma Дn}^2} \leq 1. \quad (2)$$

де H_1, H_2, H_n – фактична напруженість МП у різних діапазонах частот, А/м; $H_{\Gamma Д1}, H_{\Gamma Д2}, H_{\Gamma Дn}$ – гранично допустимий рівень у відповідних діапазонах частот, А/м.

Це ж саме стосується і гармонічних складових МП одного джерела випромінювань. Тому, позначивши суму співвідношень виразу (2) як MFE (magnetic field excess indicator), його можна представити в наступному вигляді:

$$MFE = \sum \frac{H_n^2}{H_{\Gamma Дn}^2} \leq 1. \quad (3)$$

Отже, якщо дане співвідношення перевищує одиницю, то воно показує у скільки разів рівень МП перевищує нормативне значення енергетичного навантаження МП на організм оператора-зварника і є не що інше як узагальнений показник перевищення рівня магнітного поля (MFE).

Таким чином, якщо $MFE > 1$, загальний рівень полігармонічного МП перевищує ГДР; отже на робочих місцях повинні застосовуватися відповідні заходи захисту операторів контактної зварювання, які б забезпечували безпечні умови праці.

Згідно ДСН 3.3.6.096-2002 для діапазону частот ≤ 300 МГц встановлено 8 спектральних ділянок (піддіапазонів) частот (0–5, 5–50 Гц, 0,05–1, 1–10, 10–60 кГц, 0,06–3, 3–30, 30–300 МГц) з

відповідними ГДР [7]. Експериментально ж було встановлено, що при контактному точковому зварюванні були виявлені характерні гармоніки МП тільки в ділянках частот 5–50 та 50–1000 Гц. Тому в даній роботі виконувалось сумування співвідношень встановлених напруженостей МП до їх ГДР лише для визначених гармонік МП за формулою (3), для яких регламентовано відповідні ГДР для восьмигодинної робочої зміни 1400 та 94 А/м. З чого видно, що гармоніки діапазону 50–1000 Гц майже в 15 раз жорсткіші (небезпечніші), ніж – 5–50 Гц, оскільки створюють більше енергетичне навантаження на організм людини.

На першому етапі досліджень за допомогою осцилографа з функцією швидкого перетворення Фур'є визначали спектральний склад МП – залежність амплітудного значення МП (U , мВ) від частоти (f , Гц) і аналізували отримані спектрограми (рис. 2). Так, їх аналіз (на прикладі МП, отриманого під час контактного точкового зварювання одним імпульсом зварювального струму з фазовим регулюванням тиристорного контактора $\alpha \approx 45^\circ$) показав, що для цього процесу характерні такі закономірності. Форма зварювального струму у вигляді короткої пачки (пачок) синусоїдальних імпульсів – відрізків синусоїди (див. рис. 1) має перехідний характер (проміжний між дискретним і суцільним). У діапазонах частот 5...50 та 50...1000 Гц було зафіксовано наявність гармонік МП (рис. 2), які визначають проблеми електромагнітної безпеки цього способу зварювання. На спектрограмі наведено залежність амплітудних значень МП U , виміряних в мВ, від їх частоти f . Визначення напруженості МП здійснювалось шляхом перерахунку мВ в А/м за каліброваною шкалою.

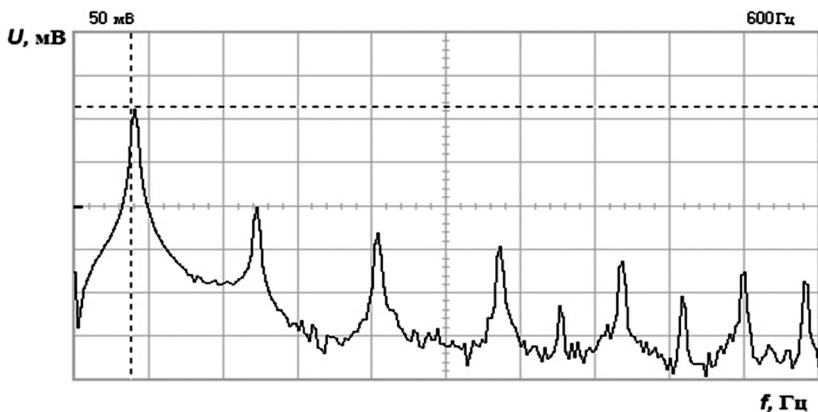


Рис. 2. Спектрограма МП контактної точкової зварювання

На другому етапі роботи вимірювали амплітуди всіх реально існуючих гармонік МП даних спектрів частот, розраховували їх сумарне значення у вигляді *MFE*, порівнювали з одиницею і будували графічні залежності даного показника на різних режимах зварювання від відстані до осі точки торкання електродів машини МТ-2202. Таким чином, кратність перевищення *MFE* показує, у скільки разів повинна бути скорочена тривалість виконання зварювання оператором на протязі робочої зміни згідно з установленими нормами, або — необхідний ступінь його екранування.

Режими при точковому зварюванні можна вважати досить різноманітними з точки зору отримуваних спектрів МП, що мають значний вплив на його склад у залежності від кількості імпульсів у пачці і кількості пачок (до трьох: підігрівальний, зварювальний і відпалювальний). Ще більш значимим фактором, що визначає амплітуди гармонік спектра МП, є величина зварювального струму, тобто показники потужності режиму, обумовлені ступенем регулювання зварювального трансформатора. Фазове регулювання тиристорних контакторів зварювального струму має значний вплив на магнітну обстановку в робочій зоні і призводить до її різкого погіршення. У цьому випадку спектр МП зміщується вправо з основною гармонічною складовою 100 Гц.

На рис. 3 представлено сумарне значення рівнів МП у вигляді залежностей *MFE* від відстані до осі точки торкання електродів зварювальної машини МТ-2202 і параметрів режиму зварювання на робочому місці оператора контактного зварювання. Так, крива 1, отримана при зварюванні однією пачкою з 10 синусоїдальних повнофазних імпульсів зварювального струму частотою 50 Гц з модуляцією переднього та задніх фронтів (по одному напівперіоду) на 1-му (мінімальному) ступені трансформатора; 2 — те ж саме на 4-му (максимальному) ступені потужності (від 1 до 4 ступеня). З графіків видно, що для розглянутого режиму можливі значення *MFE* на відстані від осі точки торкання електродів $L = 200$ мм перевищують ГДР (пряма 7) і мають проміжні значення. На відстані $L = 400$ мм ці значення не перевищують допустимих. Значимо, що при зменшенні тривалості пачки імпульсів *MFE* збільшується.

Результати досліджень показали, що встановлення кута фазового регулювання нагрівання $\alpha = 45^\circ$ (крива 3) на відстані $L = 200$ мм призводить до збільшення *MFE* в 1,6 раза в порівнянні з режимом 1 (1-й ступінь потужності) на відстані $L = 400$ мм в 3 рази, що від-

повідляє режиму зварювання повнофазними імпульсами на 4-му ступені потужності, а для відстані $L = 600$ мм MFE перевищує допустиме значення. Зварювання на режимі $\alpha = 90^\circ$ (крива 4 на 3-му і 4-му ступенях потужності) результат аналогічний попередньому з деяким збільшенням значень MFE . Це пояснюється тим, що зі збільшенням кута фазового регулювання зростає величина зварювального струму, що і призводить до підвищення MFE .

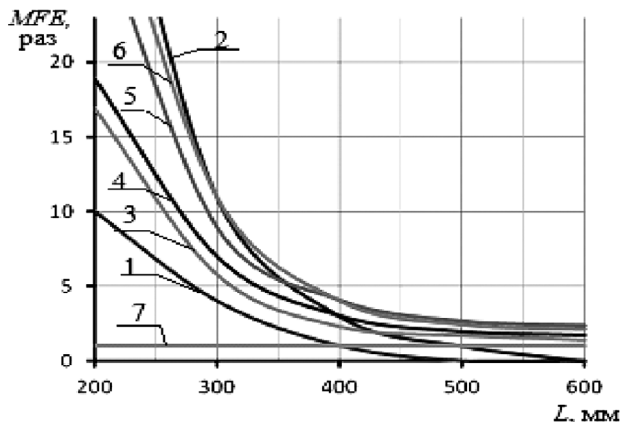


Рис. 3. Залежність показника перевищення рівня МП MFE від відстані L до осі торкання електродів машини контактного зварювання на різних режимах (опис режимів зварювання наведено в тексті статті)

Як видно з графіка, збільшення кута фазового регулювання $\alpha = 120^\circ$ (крива 5) та $\alpha = 140^\circ$ (крива 6) при зварюванні на 4-му ступені потужності призводить до подальшого збільшення MFE . На відстані $L = 200$ мм величина MFE нижча, ніж для 4-го контрольного ступеня режиму зварювання (крива 2), при $L = 400$ мм перевищує значення контрольного режиму для 1-го ступеня регулювання в 4–5 раз, а при $L = 600$ мм в 2–3 рази для 4-го ступеня регулювання і приблизно в 2 рази перевищує допустиме значення.

У результаті обробки отриманих експериментальних залежностей MFE від відстані до осі торкання зварювальних електродів та режиму зварювання методом множинної регресії за допомогою програми Microsoft Office Excel 2007 були отримані відповідні рівняння для різних режимів зварювання на машинах контактного зварювання. Регресійний аналіз отриманих кривих показав, що дані залежності в загальному випадку відповідають функціям

$$P = K/L^{2,5+3,82}, \quad (4)$$

де P – MFE , K – коефіцієнт пропорційності, L – відстань від машини до точки вимірювання.

Тобто, отримані графічні залежності близькі до обернено пропорційних кубічних, що свідчить про подібність магнітних полів, які виникають при контактному точковому зварюванні, до типових ідеальних МП.

Виконані дослідження показали, що будь-які зміни режиму зварювання, в порівнянні з режимом зварювання однією пачкою повнофазних імпульсів зварювального струму, призводить до збільшення MFE на робочому місці оператора контактного зварювання, яке за певних умов (у залежності від режиму зварювання і відстані до джерела МП) може перевищувати нормативне значення.

Висновки.

Отримані результати досліджень стали основою методології визначення загального рівня МП для оцінювання його гігієнічного впливу на організм зварника.

Застосування запропонованої методології дозволило встановити наступні закономірності:

- показано, що при контактному точковому зварюванні в робочій зоні генерується МП з гармонічними складовими в діапазонах частот 5...50 та 50...1000 Гц, які можуть перевищувати їх гранично допустимі рівні, що відповідно призводить до підвищення запропонованого узагальненого показника перевищення рівня магнітного поля (MFE);

- встановлено, що будь-які зміни режиму контактного точкового зварювання, в порівнянні з режимом зварювання однією пачкою повнофазних імпульсів зварювального струму, призводять до підвищення MFE більше гранично допустимого рівня на відстані до 800–1000 мм від осі точки торкання електродів зварювальної машини; модулювання переднього та заднього фронтів імпульсу дає можливість знизити MFE , а збільшення кута фазового регулювання режиму нагрівання підвищує його рівень.

Література

1. K. Weman. Health hazards caused by electro – magnetic fields during welding. Svetsaren. 1994. Vol. 48. № 1. 2 p.
2. IIW Doc. VIII-G100-95. A review of arc welding and electromagnetic compatibility. Bourton M. 5 p.

3. IIW Doc. VIII-99. Notes on magnetic fields in welding. 24 p.
4. Krzyztof Stefaniszyn. Zagrozenia electromagnetyczne w spawalnictwie. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. 2003. № 2. S. 39–44.
5. IIW Doc. VIII-1858-98. Health hazards from exposure to electro-magnetic fields in welding. 1 p.
6. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. М., 1986. № 3206-85. 7 с.
7. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Вид. офіц. Київ: МОЗ. 2002. 16 с.

Інформація про автора: E-mail: levchenko.opcb@ukr.net