УДК: 621.791.75

Oleg Levchenko[1], Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of the Labour Protection, Industrial and Civil Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9737-7212 ***e-mail:*** levchenko.opcb@ukr.net

Yury Polukarov[1], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6261-3991 ***e-mail:*** polukarov@ukr.net

Olga Bezushko[2], Candidate of Technical Sciences, Senior Scientist
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6148-1675 ***e-mail:*** ola.bezushko@gmail.com

Olga Goncharova[2], Candidate of Technical Sciences, Head of the laboratory
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5213-6300 ***e-mail:*** goncharova.olga789@gmail.com

Olena Zemlyanska[1], Senior lecturer of the Department of Labour protection, Industrial and Civil Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9608-3677 ***e-mail:*** o_zemlyanska@i.ua

[1]National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine
[2]E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU, Kyiv, Ukraine

HYGIENIC ASSESSMENT OF MAGNETIC FIELDS IN DIFFERENT METHODS OF ARC WELDING

Abstract. *The purpose of the work was to determine the hygienic characteristics of electromagnetic fields created by various methods of electric arc welding. For this purpose, an analysis of literature data on the electromagnetic safety of electric arc welding was performed. The levels and spectral composition of magnetic fields created by arc welding equipment in various ways were determined in order to assess their impact on the health of the welders. A description of the proposed methodical approaches to determining the level of magnetic fields, means of measuring them, and methods of assessing their impact on the welder's health is given. Modern regulations regarding the assessment of electromagnetic field effects on humans are characterized, as well as their difference from the regulations that were in force until recently. It is shown that new publications about the harmfulness of electromagnetic fields when using electrical production equipment began to appear. Therefore, there was a need to conduct new studies of electromagnetic fields, in particular their magnetic component (magnetic field strength, A/m) when using welding equipment. This is necessary for the hygienic assessment of magnetic fields and the development of appropriate methods and means of protection for welders. To do this, it was necessary to select new generation devices for determining the intensity of magnetic fields created by welding equipment. Based on the analysis of the obtained oscillograms and spectrograms of the magnetic fields, their levels were evaluated when using different methods of arc welding. It is shown that the spectral composition of the magnetic field signal is mainly determined by the welding method itself, the characteristics of the arc combustion and the nature of the transfer of the electrode metal in the arc gap, as well as the initial parameters of the welding arc power sources.*

Key words: *arc welding, electromagnetic field, field strength, oscillograms, spectrograms, protection of welders.*

© О.Г. Левченко, Ю.О. Полукаров, О.М. Безушко, О.М. Гончарова, О.В. Землянська, 2024

О.Г. Левченко[1], Ю.О. Полукаров[1], О.М. Безушко[2], О.М. Гончарова[2], О.В. Землянська[1]

[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
[2]Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА МАГНІТНИХ ПОЛІВ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

Анотація. *Мета роботи полягала у визначенні гігієнічних характеристик електромагнітних полів, що створюються різними способами електродугового зварювання. Для цього виконано аналіз літературних даних щодо електромагнітної безпеки електродугового зварювання. Визначено рівні та спектральний склад магнітних полів, що створюються обладнанням дугового зварювання різними способами, з метою оцінювання їх впливу на організм зварників. Наведено опис запропонованих методичних підходів до визначення рівнів магнітних полів, засобів їх вимірювань та методів оцінки їх впливу на організм зварника. Охарактеризовано сучасні нормативи щодо оцінки дії електромагнітного поля на людину, їх відмінність від нормативів, що діяли до останнього часу. Показано, що почали з`являтись нові публікації про шкідливість електромагнітних полів при використанні електричного виробничого обладнання. Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень електромагнітних полів, зокрема їх магнітної складової (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні зварювального обладнання. Це необхідно для гігієнічного оцінювання магнітних полів та розроблення відповідних методів і засобів захисту зварників. Для цього необхідно було вибрати прилади нового покоління для визначення напруженості магнітних полів, що створюються саме зварювальним обладнанням. На основі аналізу отриманих осцилограм та спектрограм магнітних полів виконана оцінка їх рівнів при застосуванні різних способів дугового зварювання. Показано, що спектральний склад сигналу магнітного поля визначається, переважно, самим способом зварювання, особливостями електродугового процесу і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку, а також вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги.*

Ключові слова: *дугове зварювання, електромагнітне поле, напруженість поля, осцилограми, спектрограми, захист зварників.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.88-101

Вступ

Постановка завдання. Процеси електродугового зварювання все ширше застосовуються у виробництві зварних конструкцій, будівництві, машинобудуванні тощо. Проте разом з позитивними властивостями даний високопродуктивний технологічний процес має й певні недоліки – застосування електричного й електронного зварювального обладнання зазвичай супроводжується генеруванням підвищених рівнів електромагнітних випромінювань [1, 2]. За певних умов ці випромінювання можуть бути шкідливими і, у деяких випадках, небезпечними для організму зварників. Тому особлива увага має бути приділена питанням електромагнітної безпеки зварювального обладнання, дії електромагнітних полів (ЕМП) на людину [3–5], а також створенню відповідних заходів та засобів захисту від них.

Особливої уваги потребують невирішені питання шкідливого та небезпечного впливу ЕМП на організм зварника [1], оскільки саме зварники – це одна з груп робітників, які піддаються дії ЕМП великої інтенсивності, особливо, коли вони розташовуються близько до зварювального обладнання і при прямому контакті кабелів з їх тілом [2, 6]. У залежності від способу зварювання, виду зварювального обладнання і відстані до нього робітника рівні магнітної складової ЕМП, тобто напруженість магнітних полів (МП), можуть перевищувати гранично допустимі рівні і бути небезпечними для організму людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними джерелами МП є сильно навантажені ланцюги, а особливо зварювальний контур. Амплітудне значення напруженості МП на робочому місці зварника залежить від виду і сили зварювального струму, розмірів і форми зварювального контуру, а також від відстані між робочим і джерелом поля [7]. Робота електричного обладнання для дугового зварювання супроводжується генеруванням МП високих рівнів, переважно, у наднизькому діапазоні частот [6]. Це створює певну небезпеку для зварників. Так, у роботі [2] представлено результати вимірювань рівнів МП на робочому місці при напівавтоматичному зварюванні металевим електродом в активному газі відповідно до діючої європейської Директиви 2013/35/ЄС [3]. Отримані результати рівнів МП у смузі частот від 5 Гц до 400 кГц показали, що вони суттєво перевищують рівні МП, що створюються іншими видами електричного обладнання. Це пояснюється тим, що при дуговому зварюванні застосовуються відносно високі електричні струми (до кількох сотень ампер). У [2] для досліджень впливу МП на зварника вимірювали його рівень на робочих місцях за допомогою трьохосьового магнітометра Холла, прикріпленого до зап'ястя руки зварника, тобто у найближчому положенні до джерела МП (біля кабелю джерела струму). Результати вимірювань показали, що магнітна індукція МП у цій точці становила 1,49 мТл, що дещо нижче гранично допустимого рівня (ГДР) за нормативами ДСН 3.36.096-2002 [8] (1,75 мТл для восьмигодинної робочої зміни).

Слід зауважити, що старі санітарні норми [9], що діяли до 2002 року, регламентували МП лише на частоті 50 Гц. Нові ж українські норми [8] враховують весь діапазон частот, характерний для зварювальних процесів, і всі необхідні чинники: частоту, напруженість і час дії МП на організм людини. Це дає можливість дати об’єктивну гігієнічну оцінку їх впливу на організм людини.

Попередні публікації про МП були отримані за застарілими методиками і не дають адекватного уявлення про дію МП. Зараз почали з`являтись деякі нові публікації про шкідливість ЕМП при використанні побутової техніки і відсутні дані про ЕМП при зварюванні. Це пояснюється відсутністю відповідних приладів, які б дозволили фіксувати рівні магнітного поля, характерні саме для зварювального обладнання (не на рівні мкТл, а, переважно, на рівні мТл). Тому виникла необхідність у проведенні нових досліджень МП (напруженості магнітного поля, А/м) при використанні як існуючого, так і нового зварювального обладнання. Причому такі дослідження необхідно виконати в широких діапазонах частот на робочих місцях при застосуванні різних видів зварювання. При цьому слід врахувати вплив на рівень і частоту МП особливостей способів зварювання, відстані робочого місця зварника до джерела МП і час його перебування в зоні небезпечної дії. Такі дані необхідні для розроблення методів і засобів захисту від МП.

Мета дослідження – визначення напруженості магнітних полів при різних способах дугового зварювання для їх гігієнічного оцінювання у відповідності з новими нормативами.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

– визначити оптимальні умови проведення експериментів щодо визначення напруженості МП, що створюються зварювальним обладнанням;

– дати гігієнічну оцінку МП у відповідності з новими нормативами для подальшого розроблення рекомендацій із захисту зварників від МП.

Методика дослідження

Оцінка параметрів МП на робочому місці зварників виконувалась у такій послідовності:

– визначення зони можливого знаходження працюючого біля електричного обладнання під час проходження зварювального струму,

– виділення в цій зоні точок, максимально наближених до джерела МП,

– визначення частотних діапазонів випромінювань і вимірювання напруженості МП в цих точках і діапазонах,

– визначення часових характеристик МП.

Вимірювання напруженості МП при дугових методах зварювання повинні проводитися з урахуванням розміщення електричного кабелю.

Для вимірювання напруженості МП використовували виносний датчик (перетворювач магнітного поля), інтегруючий RC-ланцюг і реєструючий пристрій, в якості якого використовували цифровий запам'ятовуючий осцилограф з функцією швидкого перетворювання Фур'є (ШПФ) з блоком розширення. Застосовували такі прилади:

– датчик магнітного поля ДМП-1 (Україна),

– вимірювач індукції магнітного поля ГФИ-1 (Україна),

– вимірювач індукції магнітного поля ТП2-2У-01 (Україна),

– осцилограф PCS-500 з ПК (Velleman, Бельгія),

– осцилограф цифровий запам'ятовуючий ТДС 1002 (Tektronix, США).

У процесі вимірювань напруженості МП датчик вносили в поле, що досліджувалось, і орієнтували в просторі по максимуму показів реєструючого приладу. Виконували три виміри у вигляді коротких імпульсів з великим періодом тривалості. При цьому датчик розташовується послідовно в трьох взаємно перпендикулярних площинах і реєстрували його показання в кожній площині. Амплітудне значення вектора напруженості МП визначали за формулою [8]:

$$H_m = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}, \quad (1)$$

де H_x, H_y, H_z – значення напруженості МП в кожній площині.

Сумарне значення магнітного поля H визначали за виразом [8]:

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \cdots + H_n^2}, \quad (2)$$

де H_n – напруженість магнітного поля окремої гармоніки.

Тривалість опромінення працюючих в період зміни визначали шляхом проведення хронометражних спостережень. Сума всього часу, затраченого на виконання зварювання, показує час опромінення протягом дня.

Досліди виконувались у зварювальних лабораторіях Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона на типових робочих місцях. Вимірювання напруженості МП проводилися при ручних, автоматичних і напівавтоматичних способах дугового зварювання при застосуванні постійного та змінного струму. На робочій поверхні металевого стола встановлювались деталі для зварювання. Розташування зварювального обладнання (джерела живлення, баластних реостатів, стальних газових балонів тощо) було незалежно-оптимальним. У зв'язку з вільним розташуванням джерел живлення і баластних реостатів зварювальні кабелі також мали вільне положення в просторі і відносно зварника.

Основною задачею вимірювання напруженості МП є порівняння її з сучасними санітарними нормами [8]. При цьому розсіювання МП від джерел живлення, магнітні наводки від сусідніх постів і вплив феромагнітних мас на цьому етапі досліджень не мали принципового значення. Це обумовлено тим, що при ручному зварюванні рівень МП, що індукується на поверхні різних частин тіла зварника та всередині, визначається переважно величиною зварювального струму. Крім того, на рівень МП суттєво впливає площа випромінюючого контуру, розташування зварників відносно основних джерел випромінювання і відстань від випромінювача до тіла зварника.

Схема розташування зон, в яких проводилися вимірювання при ручному і напівавтоматичному зварюванні, представлена на рис. 1.

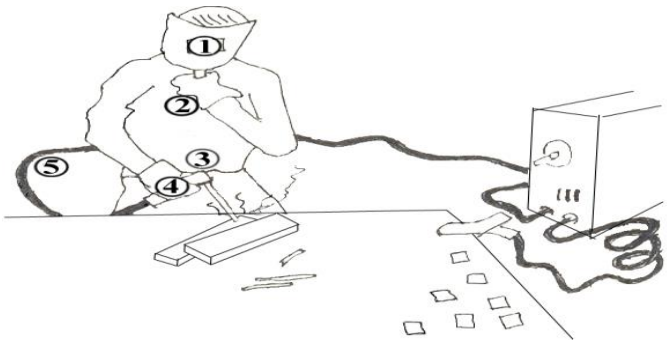

Рис. 1. Схема розташування зон вимірювання напруженості магнітного поля: 1 – голова (лоб), 2 – груди, 3 – живіт, 4 – кисть, 5 – кабель

Наведений опис умов проведення дослідів дозволяє коректно виміряти рівні МП у всіх чутливих точках організму людини, які можуть піддаватись небезпечній та шкідливій дії МП. До таких точок, переважно, належать точки позначені на рис. 1: 1 – головний мозок, 2 – серце й легені (груди), 3 – сечостатеві органи (живіт), 4 – кисть руки. Оскільки електричний кабель може дотикатись до тіла зварника, на ньому також необхідно визначати напруженість МП.

Оцінка отриманих результатів вимірювань напруженості МП виконувалась шляхом їх порівняння з гранично допустимими рівнями (ГДР) [8], для чого необхідно було знати час знаходження (експозиції) зварника в цих полях. Для цього проводили хронометраж конкретного технологічного процесу, який міг

бути здійсненим в реальних умовах промислового виробництва. Проте, раніше виконані дослідження зайнятості зварників показують, що дія МП на організм носить перервний характер. Так, персонал ручного дугового зварювання в цілому протягом восьмигодинної робочої зміни знаходиться в зоні несприятливої дії МП не більше двох годин, що обумовлено необхідністю виконання підготовчих робіт і коефіцієнтом тривалості увімкнення зварювального обладнання (ПВ, %). Зазвичай для обладнання ручного дугового і напівавтоматичного зварювання він складає 20...60% від п'ятихвилинного циклу роботи.

Отже, якщо прийняти за чистий час зварювання 2 години за зміну, значення нормованих параметрів згідно із санітарними нормами будуть мати такі значення (табл. 1).

Таблиця 1. Вимоги до рівнів магнітного поля згідно з ДСН 3.3.6.096-2002 [8]

Параметри	Граничні амплітудні значення в спектральних діапазонах		
	0–5, Гц	5–50, Гц	0,05–1,0, кГц
$EH_{\text{Нгд}}$, $(\text{А/м})^2 \cdot$ год	$1{,}4 \cdot 10^8$	$1{,}6 \cdot 10^7$	70000
$H_{\text{гд}}$, (А/м) на 2 год	11832	2828	187

Примітка: $H_{\text{гд}} = \sqrt{\frac{EH_{\text{Нгд}}}{T}}$, де $EH_{\text{Нгд}}$ – гранично допустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня, T – час дії, год.

Такі умови виконання експериментальних замірів напруженості МП, тобто чистий час зварювання, що становить 2 години за зміну, дозволяє об'єктивно визначити реальні значення ГДР МП.

Результати дослідження

Виконано визначення напруженості МП, отриманих під час дугового зварювання різними способами (автоматичному зварюванні під флюсом, ручному покритими електродами, напівавтоматичному в захисних газах) електричним струмом промислової частоти (50 Гц) та постійним струмом. Умови проведення експериментів (способи зварювання, марка зварювальних матеріалів та обладнання, режими зварювання), а також результати визначення напруженості МП наведено в табл. 2–5.

Напруженість МП при автоматичному зварюванні під флюсом з використанням тиристорного трансформатора з фазовим управлінням ТДФ-1002 визначалась методом аналізу осцилограми та спектрограми, отриманих за допомогою зазначених приладів. Вимірювання проводились на відстані 0,5 м від осі зварювального мундштука автомата ТС-17. Магнітне поле, індуковане зварювальним струмом, на екрані осцилографа візуально сприймається як синусоїдальне (рис. 2). Однак, його дискретний спектр (рис. 3) характеризується як вираженою переважно правою гармонікою з частотою 50 Гц (H_{m50}), що досягає максимальної величини в ділянці живота зварника H_{m50}=360 А/м, так і гармоніками H_{m100}=180 А/м і H_{m150}=150 А/м. Отримані результати вимірювань (табл. 2) порівнювали з нормативними величинами МП.

Таким чином, визначення рівнів МП при автоматичному зварюванні на змінному струмі під флюсом на середньому за потужністю режимі показало задовільні в гігієнічному відношенні результати (табл. 2). Із результатів таблиці видно, що перевищень ГДР МП в усіх досліджених діапазонах частот не виявлено.

При цьому було враховано, що оператор автоматичного зварювання не зобов'язаний постійно знаходитись в зоні впливу МП, тобто може захищатись відстанню від зварювального обладнання, мінімізуючи шкідливу дію МП на організм.

Діюче значення магнітного поля *H*, підраховане за виразом (2), становить 404 А/м, що значно нижче регламентованих (1400 А/м).

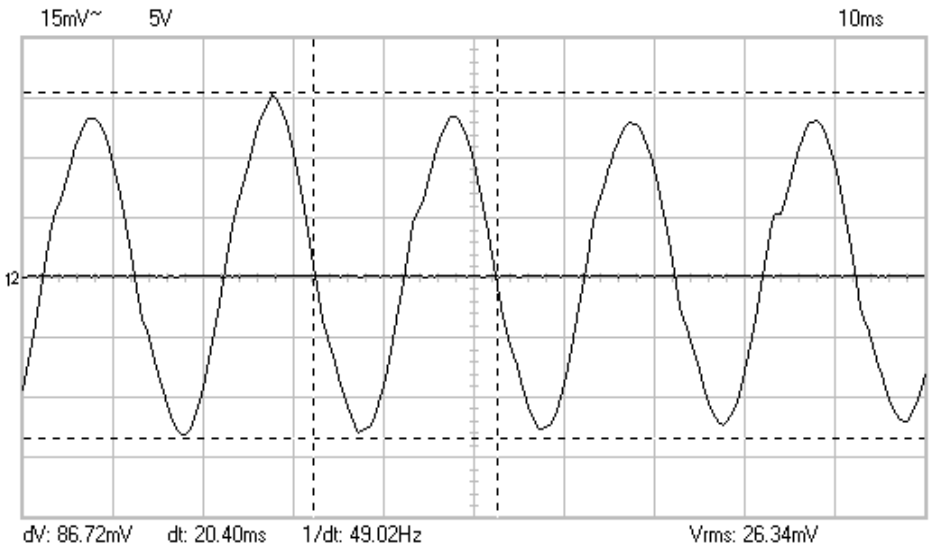

Рис. 2. Осцилограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

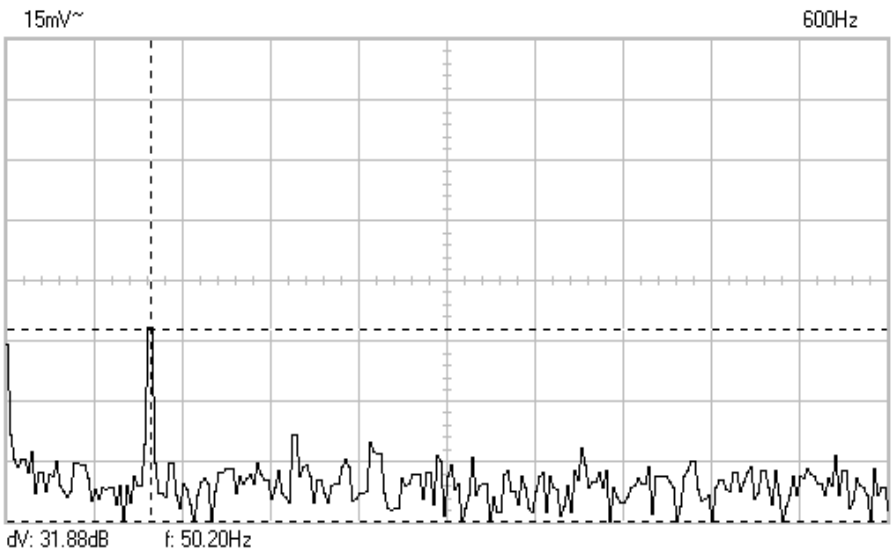

Рис. 3. Спектрограма магнітного поля автоматичного дугового зварювання під флюсом

Таблиця 2. Результати визначення напруженості магнітного поля при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом АН-65, діаметр дроту – 4,0 мм, автомат ТС-17, джерело струму – трансформатор ТДФ-1002, струм – змінний 700 А, 36 В

Діапазони частот, Гц	**Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м**				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	**2 (груди)**	**3 (живіт)**	**4 (кисть)**	**5 (кабель)**
0–5	H_5=83	H_5=130	H_5=230	*	*
5–50	H_{50}=12	H_{50}=210	H_{50}=360	*	*
50–1000	H_{100}=62	H_{100}=98 H_{150}=70 H_{200}=48	H_{100}=180 H_{150}=150	*	*

*Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено*

Подальша перевірка згідно з ДСН 3.3.6.096-2002 складається з перевірки балансу енергетичного навантаження за діапазонами частот і перевищення норми в діапазоні 0-1000 Гц за виразом [8]:

$$\sum H_n^2/\text{ГДР}^2 \le 1, \qquad (3)$$

де ГДР – гранично допустимі рівні МП відповідних діапазонів.

Так, для найбільших напруженостей МП, у даному випадку в ділянці живота зварника, при двогодинній експозиції величина співвідношення (3) більша одиниці. Отже, у цій зоні при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом є перевищення допустимих значень напруженості МП, що вимагає застосовувати заходи захисту зварника (в даному випадку оператора автоматичного зварювання).

Перевищення допустимого рівня МП у розглянутому випадку обумовлене несинусоїдальною формою зварювального струму та наявністю у спектрі другої і третьої гармонік МП H_{m100}=180 А/м та H_{m150}=150 А/м.

Зрозуміло, що в цьому випадку для оператора-зварника немає необхідності знаходитись в зазначеній зоні і можна застосувати так званий “захист відстанню”. В інших випадках, наприклад для ручного та напівавтоматичного зварювання, питання захисту зварника від МП буде складнішим.

Аналогічним чином було виконано аналіз осцилограм і спектрограм, характерних для інших способів дугового зварювання (табл. 3–5).

Результати досліджень рівнів МП (табл. 3) при ручному дуговому зварюванні покритими електродами марки АНО-21 на оптимальному режимі показали, що в частотному діапазоні 0–5 Гц перевищень нормованих рівнів МП немає. У частотному діапазоні 5–50 Гц перевищень також немає: усі значення напруженості МП нижчі ГДР двогодинної і навіть восьмигодинної експозиції. Але напруженість МП біля самого кабелю (струмоводу), який з’єднує випрямляч зварювального струму ВДУ-506 з електродотримачем, в частотному діапазоні 0–5 Гц по всій довжині кабелю становить 3977 А/м. Тобто напруженість у цій зоні майже досягає ГДР (4200 А/м). А у діапазоні частот 50–1000 Гц, для якого ГДР становить 94 А/м для восьмигодинної

робочої зміни, виявлено окремі гармоніки $H_{300=}$896 А/м та H_{600}=179 А/м, які значно перевищують ГДР. Це свідчить про те, що якщо зварник знаходиться близько біля кабелю (обмотує його навколо свого тіла або намотує на руку, якою тримає електрод), це буде небезпечно для його здоров'я.

Таблиця 3. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні електродами АНО-21, діаметр електродів – 4,0 мм, джерело струму – випрямляч ВДУ-506, струм – постійний 200…220 А, 32…34 В

Діапазони частот, Гц	**Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м**				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	**2 (груди)**	**3 (живіт)**	**4 (кисть)**	**5 (кабель)**
0–5	H_5=397	H_5=658	H_5=2386	H_5=1531	H_5=3977
5–50	H_{50}=28	H_{50}=40	H_{25}=283 H_{50}=159	H_{50}=113	H_{25}=253
50–1000	H_{150}=20 H_{300}=32 H_{600}=15	H_{100}=49 H_{150}=64 H_{250}=31 H_{300}=82 H_{450}=15	H_{100}=127 H_{300}=710 H_{400}=113 H_{500}=113	H_{100}=50 H_{300}=357 H_{500}=43	H_{100}=90 H_{150}=56 H_{200}=63 H_{300}=896 H_{350}=23 H_{400}=25 H_{425}=15 H_{500}=21 H_{600}=179

Дослідження напруженості МП (табл. 4) при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі дротом Св-08Г2С показали, що в усіх досліджених зонах тіла зварника є перевищення ГДР МП в частотному діапазоні 50–1000 Гц.

Наявність такої великої кількості гармонік у цьому частотному діапазоні можна пояснити впливом на форму сигналу МП характеристик самого способу зварювання. Зокрема, на форму сигналу МП впливають особливості горіння дуги, характер переносу електродного металу в дуговому проміжку і, звичайно ж, вихідні параметри джерела живлення зварювальної дуги. Процес зварювання може характеризуватись наявністю коротких замикань дугового проміжку, розміром крапель розплавленого металу та іншими факторами [10], які впливають на частоту створюваного МП.

Результати визначення напруженості МП, що створюється при ручному аргонодуговому зварюванні сталі неплавким електродом в аргоні з використанням випрямляча струму MAGIC WAVE-3000 (Австрія), наведено в таблиці 5. Ці результати свідчать про повну відсутність перевищень рівня МП в усіх діапазонах частот і зонах тіла зварника. Це можна пояснити поліпшеними електричними характеристиками зазначеного сучасного випрямляча струму з модуляцією зварювального струму.

Таблиця 4. Результати визначення напруженості магнітного поля при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі, дріт Св-08Г2С, діаметр – 1,2 мм, джерело струму – випрямляч ВДГ-33, струм – постійний 220 А, 20…22 В

Діапазони частот, Гц	**Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м**				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	**2 (груди)**	**3 (живіт)**	**4 (кисть)**	**5 (кабель)**
0–5	H_5=477	H_5=560	H_5=1193	H_5=768	*
5–50	*	H_{46}=356	H_{46}=450	H_{20}=127 H_{40}=318	*
50–1000	H_{75}=318 H_{200}=202 H_{300}=126 H_{400}=51 H_{480}=63 H_{600}=32	H_{66}=226 H_{80}=253 H_{210}=224 H_{232}=126 H_{266}=89 H_{276}=63 H_{300}=561 H_{350}=80	H_{56}=450 H_{114}=316 H_{134}=201 H_{158}=201 H_{178}=201 H_{184}=201 H_{222}=201 H_{300}=201	H_{60}=357 H_{120}=253 H_{186}=253 H_{216}=143 H_{242}=113 H_{276}=113 H_{300}=159 H_{350}=127 H_{400}=63 H_{462}=71 H_{520}=51	*

*Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено*

Таблиця 5. Результати визначення напруженості магнітного поля при ручному дуговому зварюванні неплавким електродом в аргоні, діаметр електрода – 3,0 мм, джерело струму – випрямляч MAGIC WAVE-3000 (Австрія), струм – постійний 100 А, 10 В

Діапазони частот, Гц	**Спектральний склад магнітного поля і амплітуди гармонічних складових H_{mn} в зонах вимірювання за діапазонами частот, А/м**				
	Зони вимірювань				
	1 (лоб)	**2 (груди)**	**3 (живіт)**	**4 (кисть)**	**5 (кабель)**
0–5	H_5=416	H_5=310	H_5=636	H_5=1081	*
5–50	H_{25}=33	*	H_{40}=21	H_{40}=39	*
50–1000	H_{85}=45 H_{100}=35 H_{115}=45 H_{295}=20	*	H_{95}=29 H_{160}=29 H_{270}=40 H_{320}=80	H_{95}=49 H_{160}=51 H_{290}=71 H_{320}=160 H_{550}=41	*

*Примітка: * – у даному діапазоні частот сигналу магнітного поля не виявлено*

Разом з тим, наявність у зоні кисті руки, якою зварник тримає електрод (рис. 1), сигналу МП в частотному діапазоні 50–1000 Гц величиною 160 А/м (H_{320}=160) не означає, що є перевищення ГДР. Це пояснюється тим, що згідно із санітарними нормами у випадку локальної дії МП на кисті рук використовується підвищувальний коефіцієнт:

$$H_{гд\ лок} = 5H_{гд\ заг}, \quad (4)$$

де $H_{гд\ лок}$ – ГДР змінного магнітного поля з частотою 50 Гц при локальній дії (кисті рук), $H_{гд\ заг}$ – ГДР змінного магнітного поля при загальній дії [8].

Тому перевищень ГДР у даному випадку немає: ця гармоніка знаходиться значно нижче допустимого рівня 470 А/м, що нижче ГДР. Отже, для ручного аргонодугового зварювання на постійному струмі перевищень нормованих значень МП немає навіть при восьмигодинній експозиції.

Низькі рівні МП у цьому випадку пояснюються використанням постійного струму невеликої сили та низької напруги дуги, а також особливостями випрямляча струму MAGIC WAVE-3000.

Разом з тим, у цих дослідах ручне зварювання неплавким електродом в аргоні виконувалось без присаджувального дроту. В інших же дослідах при подачі присадки в дуговий проміжок за рахунок хвильових процесів можлива додаткова модуляція сигналу МП і ускладнення (за кількістю гармонік) його спектра.

Отримані результати свідчать про те, що при напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі металевим електродом на робочому місці зварника створюються МП, які перевищують ГДР в частотному діапазоні 50–1000 Гц. Це обумовлено, переважно, наявністю у складі індукованих МП досить інтенсивних високочастотних (у порівнянні з частотою 50 Гц) гармонічних сигналів, оскільки норма МП у цьому діапазоні частот згідно з регламентом [8] різко зменшується (стає більш жорсткою) приблизно в 15 разів.

Для спектра всіх досліджених зварювальних процесів характерна наявність у сигналах МП складових з основними (першими) гармоніками 20, 50, 60, 300 Гц гармонік, кратних основним частотам і комбінаційним частотам. Походження цих гармонік при дуговому зварюванні можна пояснити наступними особливостями процесу зварювання:

20–25 Гц – це частота короткого замикання дугового проміжку, що виникає під час зварювання металевим електродом у вуглекислому газі;

50 Гц – частота напруги мережі, що живить зварювальний трансформатор, випрямляч, інвертор тощо;

60 Гц – частота напруги у вторинному контурі зарубіжних джерел живлення дуги (наприклад MAGIC WEVE-2600);

300 Гц – частота першої гармоніки змінної складової випрямленої напруги при використанні шестифазної схеми випрямляння змінного струму.

Слід також врахувати вплив на форму МП наявності присаджувального дроту в усіх наших дослідах, окрім ручного зварювання неплавким електродом в аргоні, який сприяє додатковій модуляції сигналу МП і ускладнює його спектр.

Аналізуючи закономірності перебігу зварювальних процесів, стає зрозумілим, що спектральний склад сигналу МП, генерованих зварювальним обладнанням, переважно, визначається двома принципово нероздільними факторами:

– самим способом зварювання, особливостями електродугового процесу і характером переносу електродного металу в дуговому проміжку;

– вихідними параметрами джерел живлення зварювальної дуги: трансформаторів, випрямлячів, а також додатковими електричними пристроями, що входять в зварювальний ланцюг (дросель, конденсатори, стабілізатори, осцилятори, «пристрої запалення дуги», баластні реостати тощо).

Природно, що для розробників електричного зварювального обладнання найбільший інтерес являє шлях зниження інтенсивності вищих гармонік за рахунок зменшення впливу другого фактору. Тому, з міркувань електромагнітної безпеки, розробникам такого обладнання слід зменшити крутизну фронту нарощування імпульсів струму і напруги джерел живлення зварювальної дуги, що працюють у ключових режимах. У процесі проєктування джерел живлення необхідно знаходити компромісні рішення, вибираючи деякі оптимальні значення робочої частоти перетворювальних пристроїв і форму імпульсів зварювального струму. Що стосується впливу самих способів ручного та напівавтоматичного зварювання на частотний спектр і інтенсивність МП в робочій зоні, на нашу думку, потрібно:

– постійно обмежувати застосування процесів з короткими замиканнями дугового проміжку і ширше застосовувати зварювання в сумішах газів (Ar + CO_2, Ar + O_2, Ar + O_2 + CO_2) дротами малих діаметрів, що забезпечить відсутність цих замикань;

– розглянути (з гігієнічних позицій) можливість застосування способів зварювання і наплавлення з модуляцією режиму зварювання з метою отримання більш стабільного і передбачуваного процесу генерації МП;

– застосовувати автоматизацію та роботизацію зварювальних процесів.

Висновки

Результати гігієнічної оцінки магнітних полів у відповідності з новими нормативами полягають у наступному:

– напівавтоматичне зварювання металевим електродом у вуглекислому газі характеризується перевищенням гранично допустимого рівня магнітного поля в частотному діапазоні 50–1000 Гц;

– при автоматичному дуговому зварюванні під флюсом перевищення гранично допустимих рівнів окремих гармонік магнітного поля відсутні, але є перевищення сумарного значення усіх гармонічних складових магнітного поля;

– ручне дугове зварювання постійним струмом неплавким електродом в аргоні характеризується помірним рівнем магнітного поля на робочому місці;

– під час ручного дугового зварювання покритими електродами перевищений рівень магнітного поля має місце лише на самому електродному кабелі.

Для мінімізації шкідливої дії магнітних полів на зварників слід керуватись наступними рекомендаціями:

– збільшити відстань тіла зварника від джерела електричної енергії і зварювального обладнання;

– не давати можливості електродному чи зворотному кабелю обвиватися навколо тіла працюючого;

– не давати можливості тілу зварника знаходитися між електродним кабелем і будь-яким іншим електричним кабелем; усі кабелі необхідно тримати разом з одної чи другої сторони.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pačaiová, H., Oravec, M., Šmelko, M., Lipovský, P., & Forraj, F. (2018). Extra low frequency magnetic fields of welding machines and personal safety. *Journal of electrical engineering*, *69*(6), 493-496. URL: https://sciendo.com/pdf/10.2478/jee-2018-0084.

2. Michałowska, J., Przystupa, K., & Krupski, P. (2020). Empirical assessment of the MAG welder's exposure to an electromagnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*, *96*. https://doi.org/10.15199/48.2020.12.48.
3. Modenese, A., & Gobba, F. (2021). Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(4), 1730. https://doi.org/10.3390/ijerph18041730.
4. Stam, R. (2018). Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). Publication of the National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands. URL: https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1.
5. Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J., & Crozier, S. (2008). Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *55*(4), 1355-1364. https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410.
6. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M., Hojo, M., Saito, H., & Okuno, T. (2011). Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, *49*(3), 274-279. https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269.
7. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O., Bezushko, O., Arlamov, O., & Zemlyanska, O. (2022). Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116), 50–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471.
8. Напруженість електромагнітних полів промислової частоти. (2002). ДСН 3.3.6.096-2002. Київ: МОЗ, 16. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text.
9. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц. (1986). Москва: № 3206-85 от 17.01.85, 7. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200031592.
10. Потапьевский А. Г. (2007). Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Часть 1. Сварка в активных газах. Издание 2-е, переработанное. Киев, *Экотехнология*, 192. URL: https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675.

Стаття надійшла до редакції 30.01.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.05.2024

REFERENCES

1. Pačaiová, H., Oravec, M., Šmelko, M., Lipovský, P., & Forraj, F. (2018). Extra low frequency magnetic fields of welding machines and personal safety. *Journal of electrical engineering*, *69*(6), 493-496. URL: https://sciendo.com/pdf/10.2478/jee-2018-0084
2. Michałowska, J., Przystupa, K., & Krupski, P. (2020). Empirical assessment of the MAG welder's exposure to an electromagnetic field. *Przegląd Elektrotechniczny*, *96*. https://doi.org/10.15199/48.2020.12.48
3. Modenese, A., & Gobba, F. (2021). Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance according to the European Directive 2013/35/EU. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(4), 1730. https://doi.org/10.3390/ijerph18041730
4. Stam, R. (2018). Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields). Publication of the National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands. URL: https://rivm.openrepository.com/bitstream/handle/10029/623629/2018998.pdf?sequence=1
5. Fuentes, M. A., Trakic, A., Wilson, S. J., & Crozier, S. (2008). Analysis and measurements of magnetic field exposures for healthcare workers in selected MR environments. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *55*(4), 1355-1364. https://doi.org/10.1109/TBME.2007.913410

6. Yamaguchi-Sekino, S., Ojima, J., Sekino, M., Hojo, M., Saito, H., & Okuno, T. (2011). Measuring exposed magnetic fields of welders in working time. *Industrial health*, *49*(3), 274-279. https://doi.org/10.2486/indhealth.MS1269
7. Levchenko, O., Polukarov, Y., Goncharova, O., Bezushko, O., Arlamov, O., & Zemlyanska, O. (2022). Determining patterns in the generation of magnetic fields when using different arc welding techniques. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (116), 50–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254471
8. Napruzhenist' elektromagnitnykh poliv promyslovoi chastoty [The intensity of electromagnetic fields of industrial frequency]. (2002). DSN 3.3.6.096-2002. Kyiv: MOZ, 16. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text [in Ukrainian].
9. Predelno dopustimye urovni magnitnykh poley chastotoy 50 Hz. [Maximum permissible levels of magnetic fields with a frequency of 50 Hz]. (1986). № 3206-85 from 17th January 1985. Moscow, 7. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200031592 [in Russian].
10. Potapievskiy, A. G. (2007). Svarka v zaschitnykh gazakh plavyaschimsya elektrodom. Chast' 1. Svarka v aktivnykh gazakh. Izdanie 2-e, pererabotannoe. Kiev, *Ekotekhnologiya*, 192. URL: https://themechanic.ru/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=13675 [in Russian].

The article was received 30.01.2024 and was accepted after revision 09.05.2024

Левченко Олег Григорович
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9737-7212 ***e-mail:*** levchenko.opcb@ukr.net

Полукаров Юрій Олексійович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, Україна, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6261-3991 ***e-mail:*** polukarov@ukr.net

Безушко Ольга Миколаївна
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Адреса робоча: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6148-1675 ***e-mail:*** ola.bezushko@gmail.com

Гончарова Ольга Миколаївна
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Адреса робоча: 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5213-6300 ***e-mail:*** goncharova.olga789@gmail.com

Землянська Олена Василівна
старший викладач кафедри охорони праці, промислової та цивільної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, м. Київ-56, Берестейський проспект, 37
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9608-3677 ***e-mail:*** o_zemlyanska@i.ua