

## **ЕЛЕКТРОНІКА**

УДК 621.791.725

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/05>

**Бернацький А.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Набок Т.М.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Юрченко Ю.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Сіора О.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Соколовський М.В.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Бондарєва В.І.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Лукашенко В.А.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України

**Данилейко О.О.**

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРОННОГО ПОМНОЖУВАЧА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ**

*З розвитком технологій лазерного зварювання постало завдання контролю процесу зварювання. Для цього використовуються різні системи та методи моніторингу. Останні дослідження показують, що існує чіткий взаємозв'язок між режимом процесу лазерного зварювання та зареєстрованими сигналами, що дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях. Однак, через високу вартість та низьку точність датчиків, ці методи не були широко застосовані в промисловості раніше. Сучасні розробки у сфері сенсорних технологій і штучного інтелекту значно покращили можливості моніторингу. Зниження вартості лазерної техніки сприяє більш широкому застосуванню лазерних технологій у промисловості, де моніторинг в режимі реального часу може знизити витрати і підвищити якість продукції. Основна увага приділяється оптичному випромінюванню в зоні зварювання, для чого використовуються оптичні датчики. Стаття присвячена створенню макетного зразка системи моніторингу процесу лазерного зварювання на основі фотодатчика. Найпоширенішими для таких завдань є напівпровідникові фотоелементи, але через їхню високу чутливість до інфрачервоного випромінювання, вони не можуть ефективно використовуватися для моніторингу процесу лазерного зварювання. Натомість вакуумні фотоелементи, такі як фотоелектронний помножувач «ФЕУ-35», виявилися більш придатними завдяки своїй спектральній чутливості в діапазоні 300–600 нм і можливості використання оптичних фільтрів для послаблення інфрачервоного випромінювання. Вакуумний фотоелектронний помножувач дозволяє фіксувати відхилення інтенсивності світлення факелу під час зварювання, що сигналізує про можливі дефекти у зварному з'єднанні. При змінах інтенсивності світлення фотоелемент генерує сигнал до 35 мА, що може бути зафіксовано цифровим осцилографом RIGOL. Отримані дані можна зберігати в пам'яті осцилографа або передавати на персональний комп'ютер для подальшої обробки за допомогою програмного забезпечення, такого як Microsoft Office EXCEL. Запропоновано систему*

моніторингу, що є перспективною для інтеграції у виробничі процеси, оскільки дозволяє здійснювати високоточний контроль за процесом лазерного зварювання у режимі реального часу.

**Ключові слова:** лазерне зварювання, моніторинг, напівпровідниковий фотоелемент, датчик, електрична схема, макет, аналоговий сигнал.

**Постановка проблеми.** Лазерне зварювання широко використовується в різних промислових областях, таких як автомобілебудування, суднобудування і будівництво мостів завдяки її перевагам і реалізуючи високу продуктивність, автоматичну обробку і формування високоякісного зварного шва з малим розміром зони термічного впливу (ЗТВ) [1; 2]. Тому онлайн моніторинг і якість перевірки лазерного зварювання має важливе значення для виготовлення високоякісної продукції. Досить багато вчених ще двадцять років тому проводили дослідження з детектування в процесі лазерного зварювання [3–5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових праць за вказаною тематикою показує, що існує взаємозв'язок між режимом технологічного процесу лазерного зварювання та зареєстрованими сигналами і що такий зв'язок проявляє себе в більшій або меншій ступені незалежно від методу дослідження [6]. Достовірність обробки та розпізнавання сигналів залежить в першу чергу від методу, що враховує розподіл та взаємний зв'язок інформативних ознак в сигналі [7; 8]. Однак експериментальні результати не були широко застосовані в промислове виробництво в той час, через значну вартість датчиків, низької точності приладів і поганій ефективності виявлення. Кількість підприємств, які використовували лазер для обробки продукції, тоді була невелика, це вважається ще одним важливим фактором, який обмежував подальший розвиток процесу моніторингу лазерного зварювання. Оскільки ціна лазерних пристроїв зараз постійно зменшується, лазерні технології починають знаходити широке застосування в промисловості. Під час масового виробництва, в режимі реального часу моніторинг процесу зварювання може допомогти зменшити собівартість і поліпшити якість продукції.



Рис. 1. Фотоелектронний помножувач «ФЕУ-35»

Лазерне зварювання в основному передбачає взаємодію між лазерним променем і зварювальним матеріалом. У зварювальному процесі, як правило, лазерне світло проходить через оптичне волокно і лінзу. Відповідно, моніторинг процесу лазерного зварювання в реальному часі, в основному орієнтований на інформацію оптичного випромінювання в зоні зварювання, і велика частина датчиків, що використовуються в дослідженнях, є оптичними датчиками. Розробка, виявлення та реєстрація сигналів в режимі реального часу при лазерному зварюванні, за минулі десять років значно прогресували, завдяки розвитку в області сенсорних технологій і впровадженню технології штучного інтелекту.

**Постановка завдання.** Мета роботи – створення макетного зразка системи моніторингу процесу лазерного зварювання на основі фотодатчика.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що суттєво спростити аналіз відео зображення одержаного під час зварювання дозволяє використання фотоелементу.

Найпоширенішим для вирішення подібної задачі у різних галузях промисловості є застосування напівпровідникових фотоелементів. Це обумовлено їх відносно невеликою вартістю та простотою вимірювальних схем. Але діапазон вимірювання більшості напівпровідникових елементів знаходиться в зоні інфрачервоного випромінювання. Тому під час лазерного зварювання вони будуть повністю засвічені і на виході буде максимальне значення фотоелектроушійної сили (ФЕРС). На фоні максимального значення ФЕРС неможливо буде розрізнити мале значення корисного сигналу. Використання же оптичних фільтрів поглине корисний сигнал. Тому застосування напівпровідникових елементів є недоцільним для вирішення поставленого завдання.

При використанні вакуумних фотоелементів, можуть бути застосовані оптичні фільтри. Тому що вони дозволяють послабити випромінювання інфрачервоного діапазону та зменшити засвічування від плазмового факелу зварювальної ванни. Це обумовлено технічними характеристиками вакуумних фотоелементів, а саме діапазоном спектральної чутливості 300–600 нм.

Аналіз технічних характеристик вакуумних фотоелементів дозволив зупинитись на фотоелектронному помножувачі «ФЕУ-35», як такого, що відповідає вищенаведеним вимогам (рис. 1), а його технічні характеристики представлені у табл. 1.

Технічні характеристики фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

ФЕУ-35А	ФЕУ-35	Тип пристрою
	Торцеве [дюколь]	Розташування вихідного вікна [виводи]
	Ø25	Розмір фотокатода, мм
	C-6 (0,3-0,6) [0,38-0,42]	Тип спектральної характеристики ( $\Delta\lambda$ , мкм) [ $\lambda_{\text{макс}}$ , мкм]
	8	Число діодів (каскадів підсилення)
45	40	$S_p$ , мкА/лм, не менше
10 (1200) 30 (1600)	1 (700-900) 10 (1050) 30 (1250-1750)	$S_a$ , (при $U_p$ , В), А/лм
	$2 \cdot 10^{-2}$ (0,41 мкм)	$S_e$ , А/Вт, не менше
	-	$S_{(0,9)}$ , А/Вт, не менше (на $\lambda$ , мкм)
1600	1750	$U_{\text{живл}}$ , В, не більше
$1 \cdot 10^{-8}$ (10)	$2 \cdot 10^{-8}$ (10)	$I_p$ , А, не більше (при $S_a$ , А/лм)
	$5 \cdot 10^{-5}$	$I_a$ , А, не більше
1,75 кеВ	1,8 кеВ	$F_a$ , лм/Гц <sup>1/2</sup>
	-60...+50	Діапазон робочих температур, °С
	Ø30 × 109 [50]	Габаритні розміри корпусу, мм [маса, г], не більше

Для підключення фотоелектронного помножувача було виготовлено джерело живлення з вихідною напругою 1500 В постійного струму, яке дозволяє отримати паспортні характеристики.

На рис. 2 показана електрична принципова схема джерела живлення. Основним елементом схеми є високочастотний трансформатор TV2, який складається із багатьох вторинних обмоток, виходи яких

підключені кожна до свого мостового випрямляча VD4...VD23. З однієї секції (обмотка та випрямляч) можливо одержати напругу близько 80 В. Високочастотний трансформатор складається з 20 секцій. Усі вони з'єднані послідовно і це дозволяє одержати напругу близько 1600 В. На первинну обмотку високочастотного трансформатора подається прямокутна напруга амплітудою 60 В і частотою 30 КГц.

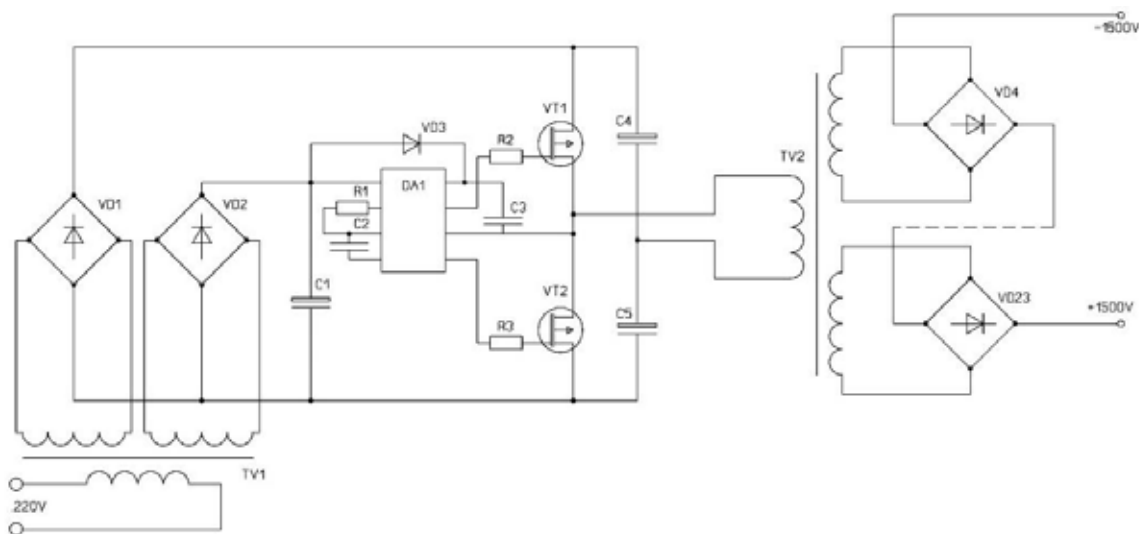
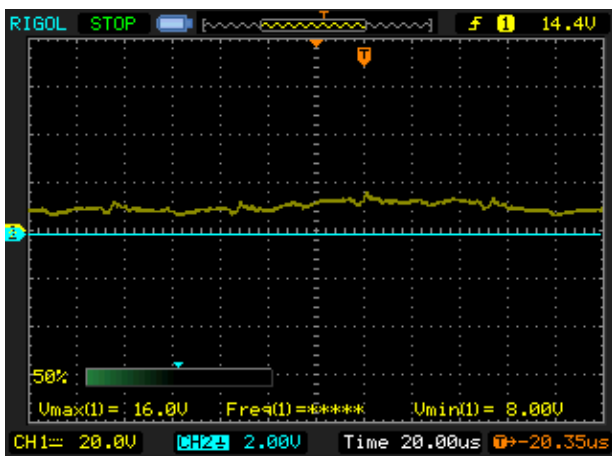


Рис. 2. Електрична принципова схема джерела живлення системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»



а



б

Рис. 3. Цифровий осцилограф “RIGOL”, що використовувався при тестуванні макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

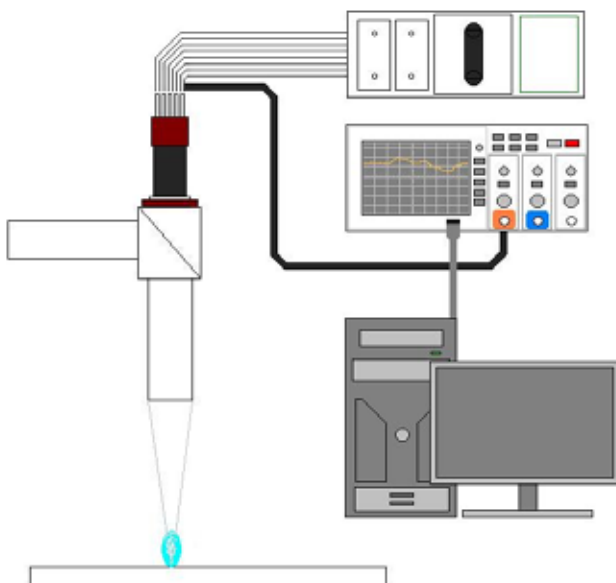


Рис. 4. Загальна схема експерименту з тестування макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35»

Цю напругу формує напівмостовий транзисторний перетворювач. Він складається із двох високовольтних польових транзисторів VT1, VT2 N-канальної структури IRF840 та двох електролітичних конденсаторів C4, C5 ємністю 470 $\mu$ F, та напругою 200В. Сигнали для керування транзисторами формує спеціалізована інтегральна мікросхема DA1 – самотактуючий напівмостовий драйвер IR2153.

Щоб вихідна напруга джерела живлення не перевищувала рекомендованих значень, був застосований понижувальний трансформатор TV1 промислової частоти 50 Гц на обмотки якого формують напруги 56 В та 12 В. Мостові випрямлячі VD1 та VD2 роблять ці напруги постійними для правильної роботи транзисторів та мікросхеми.

Фотоелемент використовується із застосуванням оптичних фільтрів та дозволяє зафіксувати відхилення інтенсивності свічення факелу під час лазерного зварювання. За результатами вимірювання інтенсивності свічення факелу зварювальної ванни, фотоелементом формується сигнал до 35 мА. Зміна інтенсивності свічення факелу призводить до зміни величини сигналу, що дозволяє встановити факт наявності дефектів у зварному з’єднанні. При навантаженні фотоелемента активним опором 1000 Ом на ньому буде фіксуватись падіння напруги в межах 35 вольт. Цієї напруги достатньо для фіксації її цифровим осцилографом RIGOL (рис. 3,а). На рис. 3,б наведений вигляд аналогового сигналу на екрані осцилографу та вже оброблений сигнал.

Загальна схема експерименту з тестування макету системи моніторингу на базі фотоелектронного помножувача «ФЕУ-35» представлена на рис. 4.

Фотоелемент був встановлений на місце відеокамери. Аналоговий сигнал, який формує елемент, надходив на один із каналів цифрового осцилографа. Налаштування осцилографа та вимірювального щупа дозволяють проводити вимірювання сигналу амплітудою до 30 вольт і на часовому відрізку, сумірним із часом протіканням зварювання. Корисний сигнал можливо залишити як у пам’яті цифрового осцилографа, так і передати по кабелю на персональний комп’ютер. На персональному комп’ютері, в свою чергу, обробка даних здійснюється як за допомогою програми DS1000AE, якою був укомплектований осцилограф RIGOL, так і за допомогою програми Microsoft Office EXCEL.

**Висновки:**

1. Обробка та розпізнавання сигналів, що несуть інформативні ознаки технологічного процесу лазерного зварювання, а саме візуальних зображень, різного типу випромінювання чи сигналів акустичної та електромагнітної емісії є комплексною багаторівневою задачею, спроби щодо розв'язання якої неодноразово описані у науковій літературі. Проте побудова цілісної, універсальної системи аналізу зазначених сигналів поки що не реалізована.

2. Аналіз наукових праць за вказаною тематикою показує, що існує взаємозв'язок між режимом технологічного процесу лазерного

зварювання та зареєстрованими сигналами і що такий зв'язок проявляє себе в більшій або меншій ступені незалежно від методу дослідження. Достовірність обробки та розпізнавання сигналів залежить в перу чергу від методу, що враховує розподіл та взаємний зв'язок інформативних ознак в сигналі.

3. Електронно-оптичний варіант макету системи моніторингу лазерного зварювання, заснований на аналізі сигналів з фотодатчиків, показавши гарні результати. Після технологічної перевірки, даний спосіб буде використаний для впровадження оберненого зв'язку по потужності лазерного випромінювання.

**Список літератури:**

1. Glaessel T., Seefried J., Masuch M., Riedel A., Mayr A., Kuehl A., Franke J. Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings for Automotive Traction Drives. *2019 International Conference on Engineering, Science, and Industrial Applications (ICESI)*. Tokyo, Japan, 2019. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICESI.2019.8863004>
2. Churiaque C., Sánchez-Amaya J.M., Üstündağ Ö., Porrúa-Lara M., Gumenyuk A., Rethmeier M. Improvements of hybrid laser arc welding for shipbuilding T-joints with 2F position of 8 mm thick steel. *Optics & Laser Technology*. 2021. № 143. 107284. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107284>
3. Ancona A., Spagnolo V., Lugarà P. M., Ferrara M. Optical sensor for real-time monitoring of CO<sub>2</sub> laser welding process. *Applied Optics*. 2001. № 40 (33). P. 6019–6025. <https://doi.org/10.1364/AO.40.006019>
4. Bardin F., Cobo A., Lopez-Higuera J. M., Collin O., Aubry P., Dubois T., Högström M., Nylen P., Jonsson P., Jones Julian D. C., Hand D. P. Optical techniques for real-time penetration monitoring for laser welding. *Applied Optics*. 2005. № 44 (19). P. 3869–3876. <https://doi.org/10.1364/AO.44.003869>
5. Farson D.F. Progress in real time laser process monitoring: theory and practice. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2000. № 5 (3). P. 194–201. <https://doi.org/10.1179/136217100101538209>
6. Hoffman J., Szymanski Z., Jakubowski J., Kolasa A. Analysis of acoustic and optical signals used as a basis for controlling laser-welding processes. *Welding International*. 2002. № 16 (1). P. 18–25. <https://doi.org/10.1080/09507110209549484>
7. Fan X., Gao X., Liu G., Ma N., Zhang Ya. Research and prospect of welding monitoring technology based on machine vision. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. № 115. P. 3365–3391. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07398-4>
8. Shevchik S. A., Le-Quang T., Vakili Farahani F., Faivre N., Meylan B., Zanolli S., Wasmer K. Laser Welding Quality Monitoring via Graph Support Vector Machine With Data Adaptive Kernel. *IEEE Access*. 2019. № 7. P. 93108–93122. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2927661>

**Bernatskyi A.V., Nabok T.M., Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Sokolovskyi M.V., Bondarieva V.I., Lukashenko V.A., Danyleiko O.O. USING A PHOTOELECTRON MULTIPLIER FOR MONITORING THE LASER WELDING PROCESS**

*With the development of laser welding technologies, the task of monitoring the welding process has arisen. Various monitoring systems and methods are used for this purpose. Recent research shows that there is a clear correlation between the laser welding process mode and the recorded signals, which allows for early detection of defects. However, due to the high cost and low accuracy of the sensors, these methods have not been widely used in industry before. Modern developments in sensor technology and artificial intelligence have significantly improved monitoring capabilities. The reduction in the cost of laser technology is contributing to the wider application of laser technology in industry, where real-time monitoring can reduce costs and improve product quality. The focus is on optical radiation in the welding zone, for which optical sensors are used. This paper is dedicated to the creation of a prototype laser welding process monitoring system based on a photo sensor. Semiconductor photocells are the most common for such tasks, but due to their high sensitivity to infrared radiation, they cannot be effectively used to monitor the laser welding process. Instead, vacuum photocells, such as the FEU-35 photomultiplier tube, have proven to be more suitable due to their spectral sensitivity in the 300–600 nm range and the ability to use optical filters to attenuate infrared radiation. The vacuum photoelectronic multiplier allows you to record deviations*

*in the intensity of the torch during welding, which signals possible defects in the welded joint. When the intensity of the light changes, the photocell generates a signal of up to 35 mA, which can be recorded by a RIGOL digital oscilloscope. The data obtained can be stored in the oscilloscope's memory or transferred to a personal computer for further processing using software such as Microsoft Office EXCEL. The proposed monitoring system shows promise for its integration into various production processes, allowing for high-precision control of the laser welding process in real time.*

**Key words:** *laser welding, monitoring, semiconductor photocell, sensor, electric circuit, layout, analog signal.*