

Wiesław Stopczyk, Zdzisław Nawrocki  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## POPRAWA SPRAWNOŚCI ENERGETYCZNEJ URZĄDZEŃ SPAVALNICZYCH

### IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF WELDING MACHINES

**Streszczenie:** W artykule zajęto się zagadnieniem poprawy sprawności energetycznej urządzeń spawalniczych spawających metodą GMAW (Gas Metal Arc Welding). Badano wpływ różnych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń na ich sprawność. Przebadano trzy podstawowe grupy urządzeń spawalniczych, reprezentujących różne rozwiązania konstrukcyjne: transformatorowe, tyrystorowe i inwertorowe. Są to typowe, obecnie produkowane urządzenia jednego z producentów profesjonalnych urządzeń spawalniczych. Rozwiązania konstrukcyjne tych urządzeń w zakresie analizowanych właściwości reprezentowały analogiczne grupy urządzeń głównych światowych producentów urządzeń spawalniczych. Pokazano, jak na tle tych rozwiązań wypada ich sprawność. Przedstawiono i omówiono wyniki badań. Wykazano zasadniczy wpływ przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego na sprawność urządzenia spawalniczego. W dalszej części artykułu skupiono się na urządzeniach inwertorowych. Pokazano układ elektryczny spawarki rezonansowej LLC. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych rezonansowego urządzenia spawalniczego dla różnych metod sterowania. Symulowano pracę urządzenia przy zastosowaniu regulacji mocy wyjściowej metodą modulacji gęstości impulsów i sterowania fazowego. Porównano straty załączania i wyłączania tranzystorów pracujących w układzie mostkowym przy zerowych i niezerowych wartościach prądu drenu i napięcia dren-źródło. Podsumowano wyniki pomiarów i symulacji.

**Abstract:** This article addresses the topic of improving the energy efficiency of welding machines with GMAW system (Gas Metal Arc Welding). The research tested the influence of various design solutions on their efficiency. Three basic groups of welding machines were examined, with the machines representing various design solutions: transformer, thyristor and inverter. These are the typical welding machines produced currently by one of the manufacturers of professional welding equipment. Design solutions of these welding machines tested within the scope of the selected properties are equally representative of the group of welding machines produced by the global leading manufacturers of welding equipment. The proposed solutions demonstrated the efficiency of the machines. Research results were presented and discussed. It has been proved that the adopted the design solution has the major impact on the efficiency of the welding machines. Another part of the article focused on the inverter machines. Electrical scheme of the resonant LLC welding machine was presented. The results of the resonant welding machines simulation studies for various control methods were presented. The operation of the resonant welding machine for various control methods was simulated and presented. The operation of the resonant welding machine was simulated by the application of the output power control performed by the pulse density modulation and phase control method. Next, the comparison was made between the losses of switching on and off the transistors operating in the bridge circuit at zero and non-zero values of the drain current and drain-source voltage. The results of measurements and simulations were summarized.

**Słowa kluczowe:** *sprawność energetyczna, GMAW, układ rezonansowy LLC, modulacja gęstości impulsów*  
**Keywords:** *energy efficiency, GMAW, LLC resonant circuit, pulse density modulation*

### 1. Wstęp

Rosnące koszty energii oraz problemy związane z obciążalnością źródeł energii i ochroną środowiska wymuszają prowadzenie prac konstrukcyjnych nad zwiększeniem sprawności energetycznej urządzeń elektrycznych. Powszechność wykorzystania urządzeń spawalniczych w przemyśle i stosunkowo duże moce tych urządzeń mają duży wpływ na całkowite zużycie energii. Nawet niewielkie zwiększenie

sprawności tych urządzeń globalnie przynosi znaczące korzyści.

### 2. Sprawność urządzeń spawalniczych

Poniżej przedstawiono trzy podstawowe grupy urządzeń spawalniczych, reprezentujące zupełnie odmienne rozwiązania konstrukcyjne. Są to typowe, obecnie produkowane urządzenia jednego z producentów profesjonalnych urządzeń spawalniczych spawających metodą

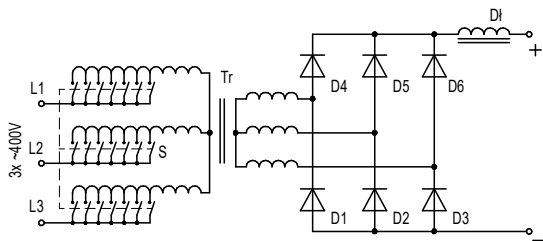
GMAW (Gas Metal Arc Welding). Rozwiązania konstrukcyjne tych urządzeń w zakresie analizowanych właściwości reprezentują analogiczne grupy urządzeń głównych światowych producentów urządzeń spawalniczych. Sprawdzono, jak na tle tych rozwiązań wypada ich sprawność.

### 2.1. Transformatorowe urządzenie spawalnicze

W transformatorowym urządzeniu spawalniczym (rys. 1) charakterystyka zewnętrzna spawarki kształtowana jest przez charakterystykę transformatora spawalniczego. Regulacja napięcia spawania odbywa się poprzez przełączenie odczepów uzwojenia pierwotnego transformatora za pomocą przełącznika S (rys.2).



Rys. 1. Urządzenie transformatorowe [2]



Rys. 2. Uproszczony schemat ideowy transformatorowego urządzenia spawalniczego

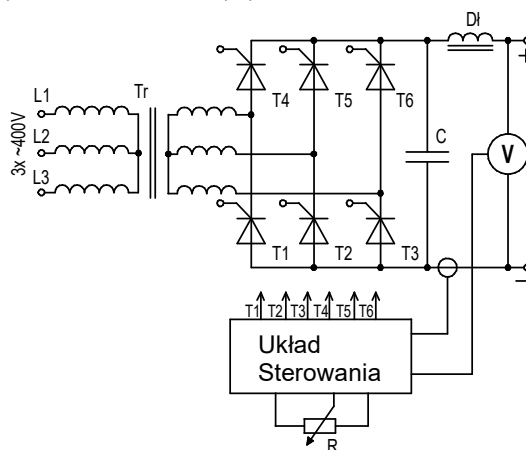
### 2.2. Tyrystorowe urządzenie spawalnicze

W tyrystorowym urządzeniu spawalniczym (rys. 3) charakterystyka zewnętrzna spawarki kształtowana jest przez układ sterujący pracą trójfazowego mostka tyrystorowego. Regulacja

napięcia spawania odbywa się za pomocą potencjometru R (rys. 4).



Rys. 3. Urządzenie tyrystorowe [2]



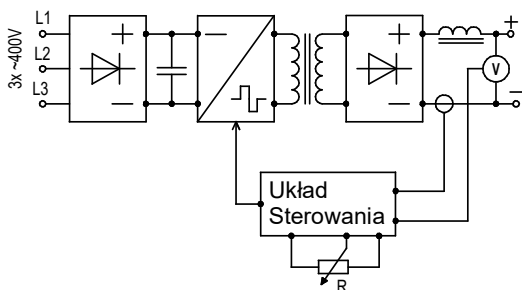
Rys. 4. Uproszczony schemat ideowo-blokowy tyrystorowego urządzenia spawalniczego

### 2.3. Inwertorowe urządzenie spawalnicze

Jednymi z ważniejszych elementów obwodu spawarki inwertorowej (rys. 5) są elektroniczne elementy przełączające służące do kształtowania charakterystyki wyjściowej urządzenia spawalniczego. Są nimi najczęściej, z uwagi na najniższe straty energii, tranzystory IGBT [3]. Regulacja napięcia spawania odbywa się za pomocą potencjometru R (rys. 6).



Rys. 5. Urządzenie inwertorowe [2]



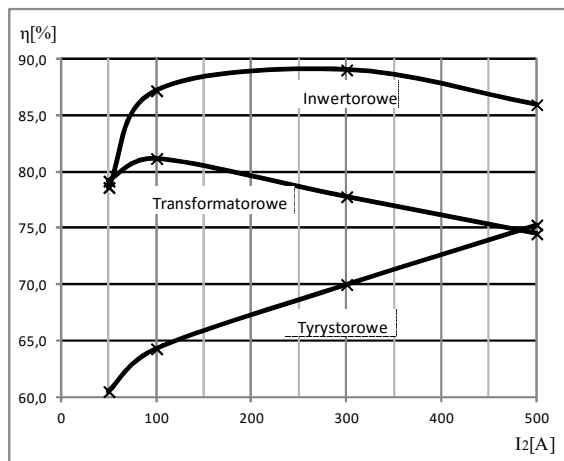
Rys. 6. Uproszczony schemat ideowo-blokowy inwertorowego urządzenia spawalniczego

**2.4. Wyniki badań urządzeń spawalniczych**

Autorzy referatu wykonali pomiary elektryczne powyższych urządzeń spawalniczych. Skróczone wyniki pomiarów i obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów

Urządzenie spawalnicze	$I_2$	$U_2$	$\cos\phi$	$\eta$
	A	V	-	%
Transformatorowe	50	16,5	0,94	79,2
	100	19,0	0,95	81,2
	300	29,0	0,95	77,8
	500	39,0	0,96	74,5
Tyrystorowe	50	16,5	0,21	60,5
	100	19,0	0,28	64,3
	300	29,0	0,54	70,0
	500	39,0	0,86	75,3
Inwertorowe	50	16,5	0,65	78,6
	100	19,0	0,87	87,2
	300	29,0	0,94	89,1
	500	39,0	0,95	86,0

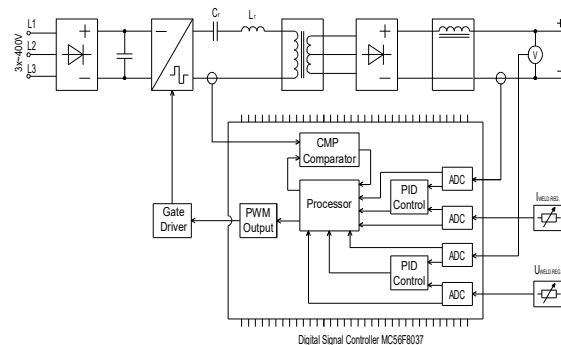


Rys. 7. Zależność sprawności poszczególnych typów urządzeń spawalniczych od prądu spawania

Na podstawie wykonanych pomiarów widzimy (rys. 7), że najwyższą sprawność osiąga urządzenie inwertorowe. Dla prądu spawania powyżej 100A charakteryzuje się stosunkowo stałym poziomem sprawności. Urządzenia transformatorowe i tyrystorowe wykazują się dużym wpływem prądu spawania na sprawność. Urządzenie tyrystorowe osiąga (z pośród badanych urządzeń) najniższą sprawność z wyjątkiem maksymalnego prądu spawania tj. 500A.

**3. Urządzenie spawalnicze z rezonansowym układem LLC**

Zastosowanie układów rezonansowych pozwala na zwiększenie sprawności urządzeń spawalniczych poprzez eliminację strat przełączania elementów elektronicznych służących do kształtowania charakterystyki wyjściowej urządzenia spawalniczego. Na rysunku 8 przedstawiono schemat urządzenia spawalniczego z rezonansowym układem LLC.

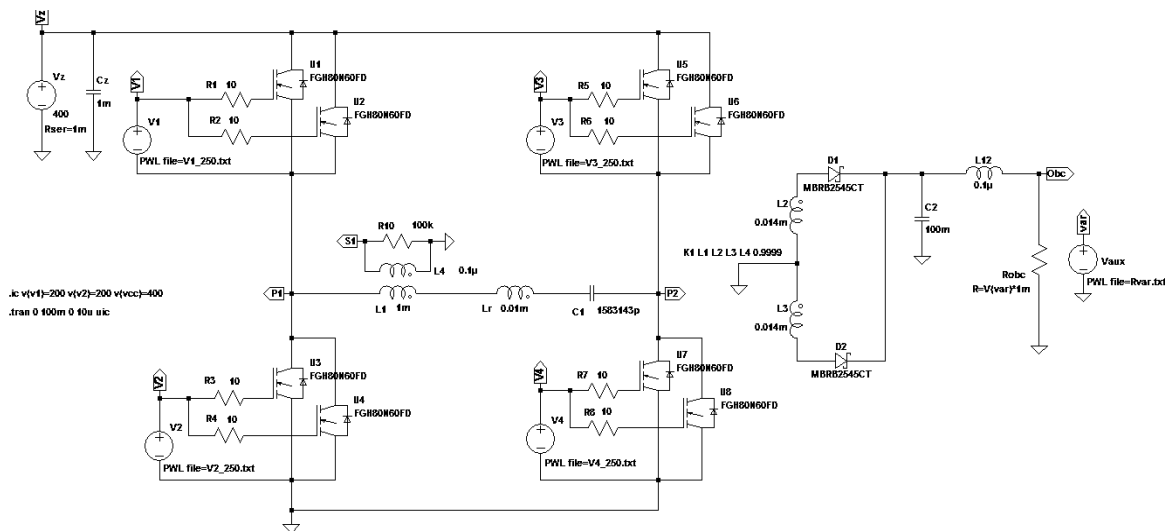


Rys. 8. Uproszczony schemat ideowo-blokowy urządzenia spawalniczego z rezonansowym układem LLC

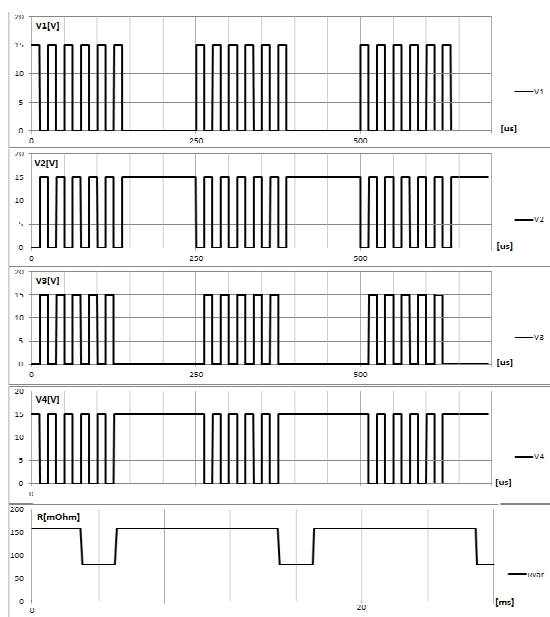
### 3.1. Badania symulacyjne

Poniżej przedstawiono wyniki badań symulacyjnych urządzenia spawalniczego, w którym zastosowano rezonansowy układ LLC (rys.9). Badania przeprowadzono za pomocą programu LTSpiceIV. Symulowano pracę urządzenia przy zastosowaniu regulacji mocy wyjściowej metodą modulacji gęstości impulsów i sterowania fazowego (rys. 10-13). Stosowanie układów rezonansowych w układach zasilających ma na

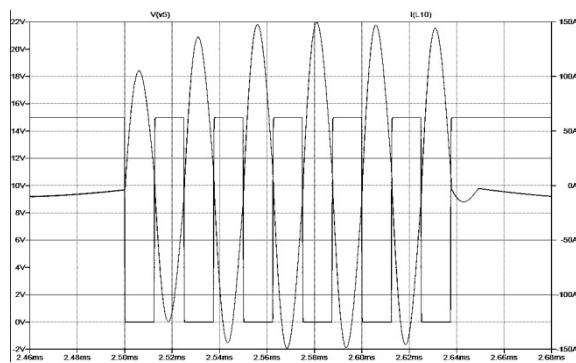
celu minimalizację strat przełączania tranzystorów kluczujących pracujących w układzie mostkowym [1]. Gdy przełączenie nastąpi w momencie przejścia przez zero napięcia dren źródła (lub prądu drenu) straty przełączania zostaną ograniczone do zera. Głównym źródłem strat elementów półprzewodnikowych jest wtedy rezystancja przewodzenia. Technika ta jest nazywana przełączaniem ZVS (Zero Voltage Switching) lub ZCS (Zero Current Switching).



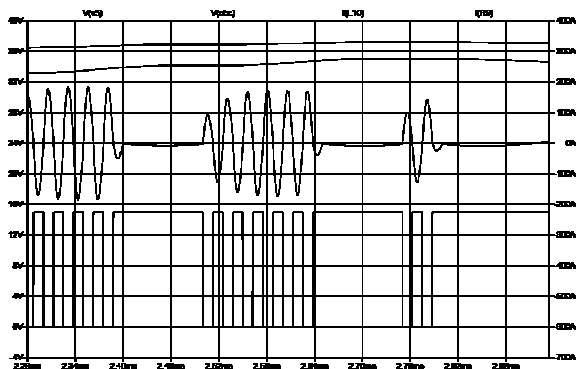
Rys. 9. Urządzenie spawalnicze z rezonansowym układem LLC – symulacja układu za pomocą programu LTSpiceIV



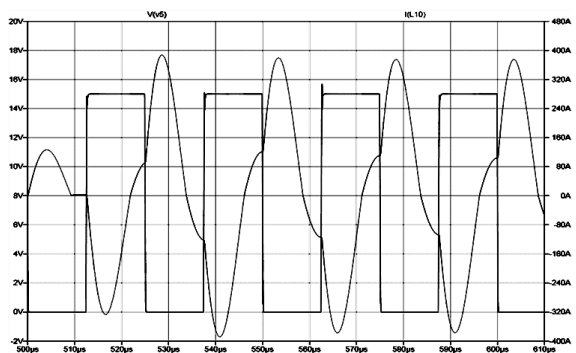
Rys. 10. Symulowane przebiegi napięć bramkowych tranzystorów generowane przez układ sterowania i symulowana rezystancja obciążenia



Rys. 11. Przebiegi napięcia bramkowego tranzystorów kluczujących (przebieg prostokątny) i prądu obwodu rezonansowego, gdy częstotliwość przełączania tranzystorów jest równa częstotliwości rezonansowej – nie występują straty przełączania

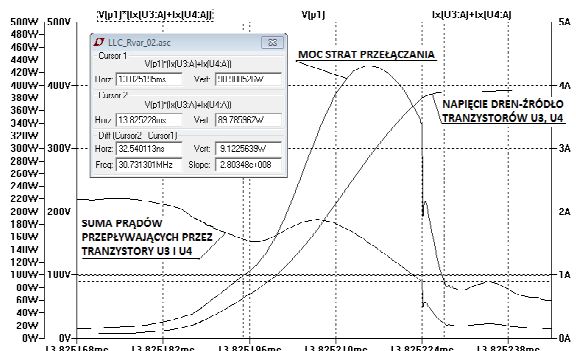


Rys. 12. Przebiegi występujące w symulowanym obwodzie typowe dla sterowania metodą gęstości impulsów (od góry kolejno: prąd i napięcie wyjściowe, przebieg prądu w obwodzie rezonansowym, przebieg napięcia bramkowego tranzystorów kluczujących)

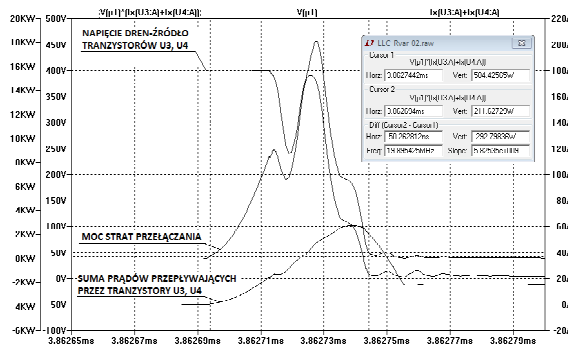


Rys. 13. Przebiegi napięcia bramkowego tranzystorów kluczujących (przebieg prostokątny) i prądu obwodu rezonansowego występujące w symulowanym obwodzie - typowe dla sterowania fazowego

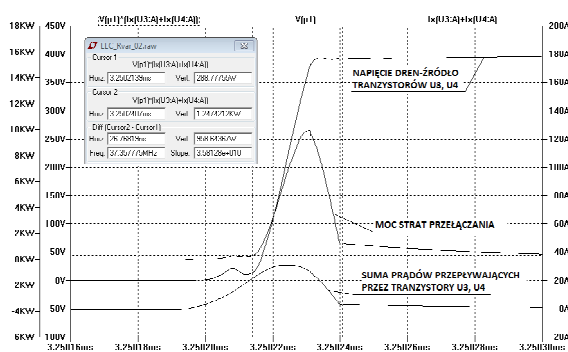
3.2. Wyniki badań



Rys. 14. Straty występujące na tranzystorach dla metody sterowania fazowego (moment wyłączania tranzystorów)



Rys. 15. Straty występujące na tranzystorach podczas ich załączania przy niezerowych wartościach prądu drenu i napięcia dren-źródło



Rys. 16. Straty występujące na tranzystorach podczas ich wyłączania przy niezerowych wartościach prądu drenu i napięcia dren-źródło

Tabela 2. Moc strat przełączania mostka tranzystorowego dla różnych metod sterowania

Metoda sterowania	Moc strat przełączania mostka tranzystorowego		
	Straty załączania [W]	Straty wyłączania [W]	Straty łączne [W]
Sterowanie metodą gęstości impulsów (ZCS)	0	0	0
Sterowanie fazowe	1,1	2,5	3,6
Sterowanie przy niezerowych wartościach prądu drenu i napięcia dren-źródło	26	72	98

$$P_{\text{strat przełączania}} = \frac{1}{2} U_{DS} I_D t_{\text{załączania}} f \quad (1)$$

Na rys. 14-16 przedstawiono przebiegi napięcia dren-źródło, prądu drenu i mocy strat podczas przełączania tranzystorów mostka dla różnych metod sterowania. Wyniki przedstawiono w tabeli 2. Straty załączania obliczono dla częstotliwości przełączania  $f=40\text{kHz}$  według wzoru (1). Analogicznie obliczono straty wyłączania. Można zauważyć, że dla sterowania metodą gęstości impulsów (przy ZCS) straty łączeniowe

nie występują. Największe straty występują podczas przełączania przy niezerowych wartościach prądu drenu i napięcia dren-źródło. Straty takie występują w układach inwertorowych niewykorzystujących technik rezonansowych.

#### 4. Podsumowanie

Zastosowanie w urządzeniu spawalniczym rezonansowego układu LLC sterowanego metodą gęstości impulsów pozwala na wyeliminowanie strat przełączania i tym samym na zwiększenie sprawności urządzenia. Straty te występują w urządzeniach inwertorowych niewykorzystujących techniki ZVS (Zero Voltage Switching) lub ZCS (Zero Current Switching). Zastosowanie ZCS lub ZVC pozwala zmniejszyć całkowite straty urządzenia spawalniczego o 98W (tabela 2). Odniesiono uzyskaną redukcję strat przełączania do wyników pomiarów trzech podstawowych typów urządzeń spawalniczych spawających metodą GMAW (tabela 1). Dla maksymalnego prądu spawania w przypadku urządzenia inwertorowego obniżenie strat przełączania pozwala na poprawę sprawności o 0,5 punktu procentowego.

#### 5. Literatura

- [1]. Citko T.: *Układy rezonansowe w energoelektronice*. Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, 2001, s. 95-103
- [2]. Katalog produktów, Lincoln Electric Bester S.A., 2015, s. 21, 27, 39
- [3]. Pawlaczyk L.: *Inverter welder with compensation of surge active power consumption*, International scientific conference, Proceedings, Warszawa, Drukarnia Wojciech Lewicki, 2001

#### Autorzy

Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn,  
Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław  
e-mail: wieslaw.stopczyk@pwr.edu.pl  
zdzislaw.nawrocki@pwr.edu.pl