

*urządzenia spawalnicze, trójfazowy mostek tyrystorowy,
układy sterowania*

Wiesław STOPCZYK*, Zdzisław NAWROCKI*

STEROWANIE TRÓJFAZOWEGO MOSTKA TYRYSTOROWEGO PRZY ODKSZTAŁCONYM NAPIĘCIU ZASILAJĄCYM

W artykule przedstawiono sposób rozwiązania problemu sterowania mostka tyrystorowego zasilanego z trójfazowego źródła o niestabilnej częstotliwości i o niesinusoidalnym przebiegu napięcia. Opisywane rozwiązanie posłużyło autorowi artykułu do skonstruowania mikroprocesorowego układu sterowania i zastosowaniu go w nowozaprojektowanym urządzeniu spawalniczym CV510 o mocy 20 kW. W urządzeniu tym, sześciopulsowy tyrystorowy mostek prostowniczy służy do regulacji napięcia spawania. Przeprowadzono badania urządzenia spawalniczego zasilanego z agregatu prądotwórczego Vantage 400 o mocy 13,2 kW.

1. WSTĘP

1.1. WPŁYW JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA PRACĘ ZASILANYCH URZĄDZEŃ

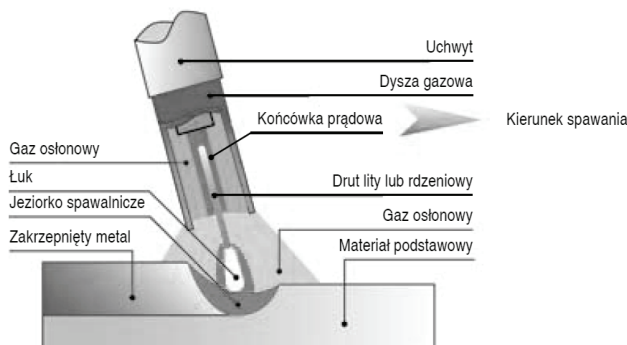
Jakość energii elektrycznej ma znaczący wpływ na pracę zasilanych urządzeń. Prawna, niezakłócona praca urządzeń jest szczególnie ważna w przypadku urządzeń wykorzystywanych w przemyśle. Zła jakość energii może się przyczynić do powstania szkód materialnych w wyniku przerwania lub zakłócenia procesu technologicznego. Może nawet spowodować uszkodzenie zasilanego urządzenia. Ponieważ nie zawsze mamy wpływ na jakość energii elektrycznej, rozwiązaniem jest projektowanie urządzeń o wysokiej odporności na niekorzystne warunki zasilania. Jednymi z podstawowych urządzeń stosowanych w przemyśle w zautomatyzowanych procesach a także przy wszelkich pracach naprawczych są urządzenia spawalnicze. Podstawową grupą urządzeń spawalniczych wykorzystywanych w przemyśle są urządzenia spawające

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, wieslaw.stopczyk@pwr.wroc.pl, wstopczyk@lincolnelectric.eu, zdzislaw.nawrocki@pwr.wroc.pl

metodą GMAW (*Gas metal arc welding*). Wśród tych urządzeń poważną grupę stanowią urządzenia tyrystorowe (takie urządzenia będą omawiane w tym artykule).

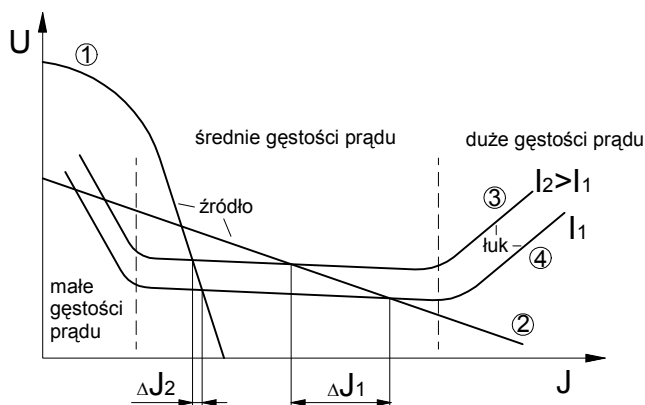
1.2. WYMAGANIA STAWIANE URZĄDZENIOM SPAWALNICZYM

W metodzie spawania GMAW łuk elektryczny jest wytworzony pomiędzy materiałem spawanym a drutem spawalniczym i jest chroniony przez osłonę gazową (rys. 1).



Rys. 1. Metoda spawania GMAW [7]

Zadaniem urządzenia spawalniczego jest przemiana energii elektrycznej o parametrach sieci zasilającej na energię elektryczną o parametrach niezbędnych do długotrwałego i stabilnego procesu spawania, czyli do podtrzymania palenia się łuku elektrycznego. Napięcie wyjściowe urządzenia powinno zawierać się w przedziale 20–40 V a prąd w przedziale 30–1000 A. Aby zapewnić stabilność palenia się łuku urządzenie spawające metodą GMAW powinno mieć sztywną charakterystykę statyczną [1] (rys. 2).

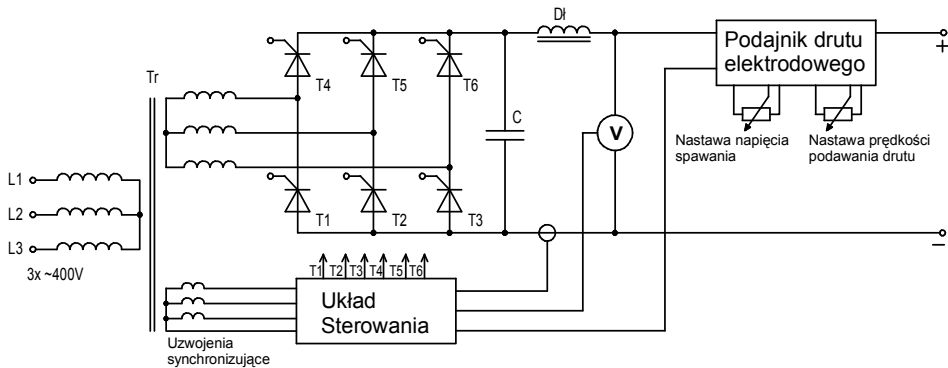


Rys. 2. Parametry urządzenia spawalniczego GMAW

Jeżeli z jakiegokolwiek przyczyny nastąpi wydłużenie łuku ($l_2 > l_1$) – patrz charakterystyka łuku 3 (rys. 2) – wzrośnie jego napięcie. Wywoła to zmniejszenie gęstości prądu o ΔJ . Zmiana będzie większa dla źródła spawalniczego o charakterystyce opisanej krzywą 2, niż dla źródła o charakterystyce 1. Zmniejszenie prądu spowoduje zmniejszenie prędkości stapiania drutu elektrodowego i tym samym skrócenie łuku spawalniczego. Czyli wystąpi samoregulacja długości łuku spawalniczego. Czułość samoregulacji będzie większa dla większych zmian gęstości prądu ΔJ . Układ sterowania mostkiem tyrystorowym powinien zapewnić takie nachylenie charakterystyki wyjściowej $U = f(J)$, przy której urządzenie będzie miało najlepsze własności spawalnicze. Będzie to miało miejsce, gdy jego charakterystyka zewnętrzna dla średnich gęstości prądu będzie opisana krzywą 2 (rys. 2). Złej jakości energia elektryczna, mająca wpływ na charakterystykę wyjściową źródła spawalniczego spowoduje zakłócenia w procesie spawania.

1.3. TYRYSTOROWE URZĄDZENIA SPAWALNICZE SPAWAJĄCE METODĄ GMAW

Stosowane są różnorodne rozwiązania układowe urządzeń spawalniczych. Najczęściej są to urządzenia diodowe, tyrystorowe lub z wewnętrzną przemianą częstotliwości. Dla każdego z tych urządzeń zła jakość zasilania rzutuje na proces spawania. W artykule rozpatrzono urządzenia z układami tyrystorowymi. Od stabilnej pracy tyrystorowego układu zasilania zależy przebieg procesu spawania, a tym samym, jakość wykonywanych połączeń spawanych. Najczęściej tyrystorowe urządzenia spawalnicze projektowane są w oparciu o mostki trójfazowe sześciopulsowe.



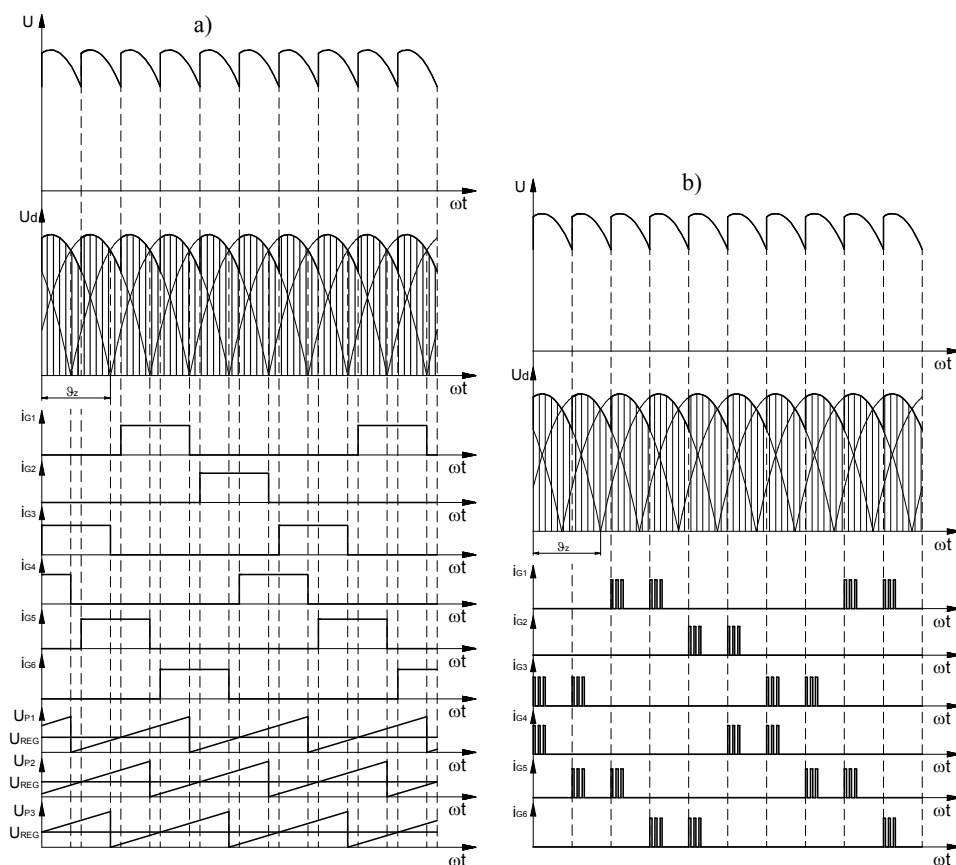
Rys. 3. Uproszczony schemat ideowy urządzenia spawalniczego GMAW

Typowe profesjonalne tyrystorowe urządzenie spawalnicze spawające metodą GMAW składa się z transformatora głównego, dławika, trójfazowego mostka tyrystorowego, układu chłodzenia, układu sterowania i podajnika drutu elektrodowego

(rys. 3). Po wyprostowaniu przez prostownik sterowany impulsów indukowanych po wtórnej stronie trójfazowego transformatora spawalniczego i po filtrowaniu na wyjściu urządzenia spawalniczego pojawia się napięcie powodujące przepływ prądu o parametrach wymaganych przez proces spawania.

1.4. UKŁADY STEROWANIA TRÓJFAZOWEGO MOSTKA TYRYSTOROWEGO

W tyrystorowych urządzeniach różnie jest realizowany układ sterowania mostka tyrystorowego. Na rysunku 4 porównano przebiegi napięć i prądów dla analogowego i mikroprocesorowego układu sterowania, gdzie: U_d – napięcie wyprostowane, i_G – prądy bramkowe tyrystorów, U_P – napięcie układu formowania impulsów piłokształtnych, U_{REG} – napięcie odniesienia, α_z – kąt załączenia tyrystora. Obecnie układy ste-



Rys. 4. Formowanie impulsów bramkowych dla:

a) analogowego układu sterowania, b) cyfrowego układu sterowania

Fig. 4. Shaping of the gate pulses: a) analog control system, b) digital control system

rowania działające na zasadzie formowania przebiegów piłokształtnych (rys. 4a) są zastępowane układami mikroprocesorowymi. Układy te za pomocą wejść analogowych i przetworników A/C dokonują pomiaru napięcia i prądu wyjściowego i na podstawie tego, znając wartość nastawy, obliczają kąt załączenia każdego z tyrystorów (rys. 4b). Obliczenia są wykonywane najczęściej poprzez realizację algorytmu regulatora PI lub PID. Układy mikroprocesorowe umożliwiają uzyskanie dowolnej charakterystyki wyjściowej zasilacza [5].

2. PRZEPROWADZONE BADANIA

Przeprowadzono badania tyrystorowego sterowanego cyfrowo urządzenia spawalniczego CV510 (rys. 5) o mocy maksymalnej 20 kW, które zasilano za pomocą agregatu prądotwórczego Vantage 400 (rys. 6) o mocy 13,2 kW, oraz porównano jego właściwości z urządzeniem spawalniczym sterowanym analogowo.

CV510 i Vantage 400 są urządzeniami produkowanymi przez firmę Lincoln Electric.



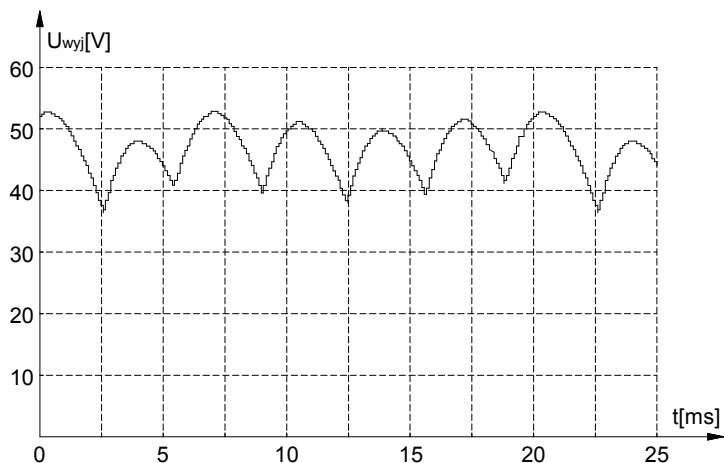
Rys. 5. Badane urządzenie spawalnicze obciążone opornicą



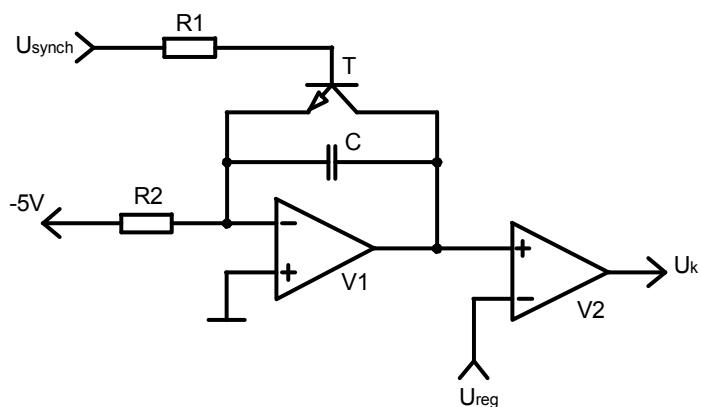
Rys. 6. Agregat prądotwórczy

Wykonano pomiary urządzeń spawalniczych obciążonych opornicą spawalniczą dla prądu obciążenia 500A. Na rysunkach 7 i 9 przedstawiono przebiegi napięć wyjściowych urządzeń spawalniczych z analogowym i cyfrowym układem sterowania

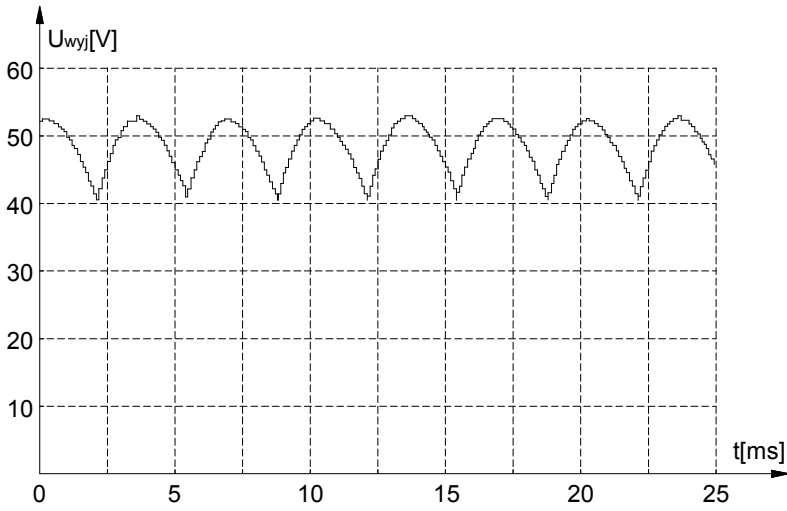
przy prawidłowo działającej detekcji punktów synchronizacji (urządzenia zasilane bezpośrednio z sieci energetycznej). Wykonano pomiary starszej generacji urządzeń firmy Lincoln Electric, obecnie już nieprodukowanych spawarek tyrystorowych CV500. Są to spawarki z analogowym układem sterowania. W przypadku tych urządzeń występowały różnice w amplitudach poszczególnych pulsów. Różnice te wynikały z niesymetrii torów wyzwalania tyrystorów (rys. 8), spowodowane rozrzutem pojemności kondensatorów C w poszczególnych torach.



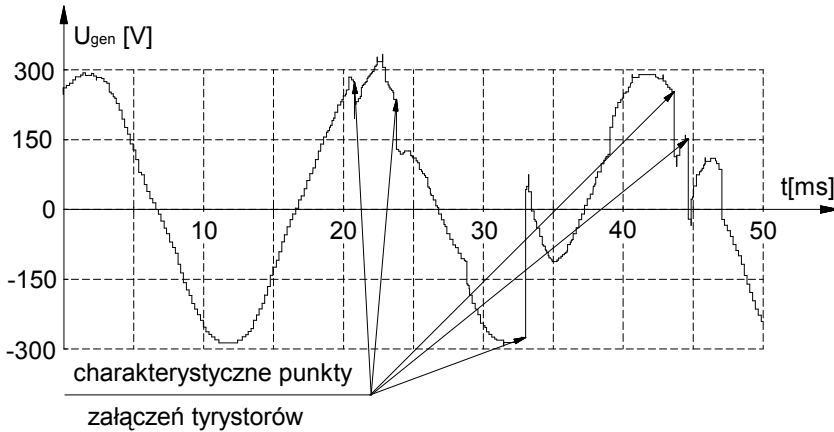
Rys. 7. Przebieg napięcia wyjściowego urządzenia spawalniczego z analogowym układem sterowania



Rys. 8. Przykład jednego z torów układu formowania przebiegu piłokształtnego analogowego układu sterowania

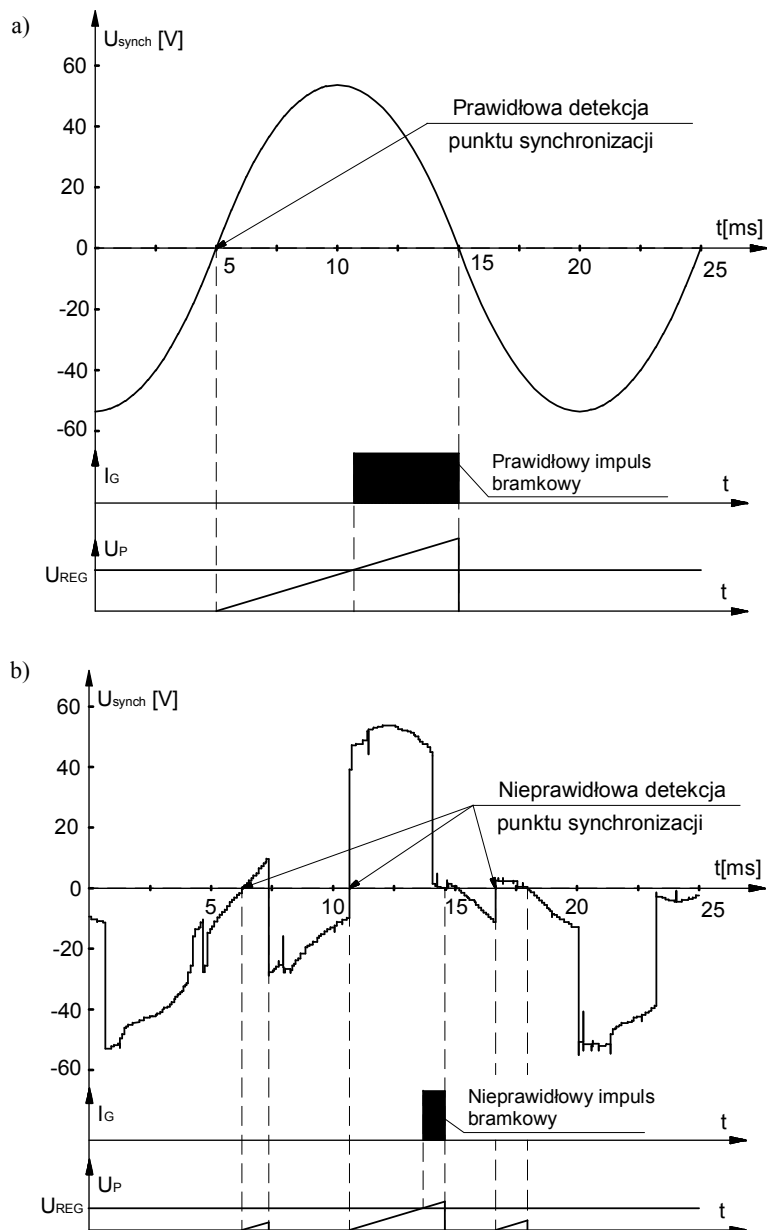


Rys. 9. Przebieg napięcia wyjściowego urządzenia spawalniczego z cyfrowym układem sterowania



Rys. 10. Przebieg napięcia jednej z faz agregatu prądowórczego

Przy zasilaniu urządzeń spawalniczych z agregatu prądowórczego, same urządzenia zasilane powodowały odkształcenie przebiegu napięcia zasilającego. Na rysunku 10 pokazano przebieg napięcia fazowego agregatu prądowórczego w momencie przejścia urządzenia spawalniczego ze stanu jałowego w stan pracy. Na rysunku można wyróżnić charakterystyczne miejsca, w których następowało załączanie poszczególnych tyrystorów.



Rys. 11. Mechanizm powstawania nieprawidłowych impulsów bramkowych przy silnie odkształconym napięciu zasilającym: a) prawidłowy impuls bramkowy przy nieodkształconym napięciu zasilającym, b) nieprawidłowy impuls bramkowy przy silnie odkształconym napięciu zasilającym

Na rysunku 11 pokazano mechanizm powstawania nieprawidłowych impulsów bramkowych przy nieprawidłowej detekcji punktów synchronizacji. Każde przejście przez zero napięcia synchronizującego wyzwała generator przebiegu piłokształtnego. Gdy napięcie tego przebiegu przekroczy wartość napięcia odniesienia U_{REG} , to zostanie wygenerowany impuls załączający tyrystor. Należy zauważyć, że w przypadku błędnej detekcji przejść przez zero napięcia synchronizującego, nieprawidłowe impulsy bramkowe występują tylko, gdy napięcie piłokształtne U_p przekroczy wartość napięcia odniesienia U_{REG} . Przy zakłóconym napięciu zasilającym impuls bramkowy może nie wystąpić, lub może mieć zbyt krótki przebieg, co może prowadzić do uszkodzenia tyrystora.

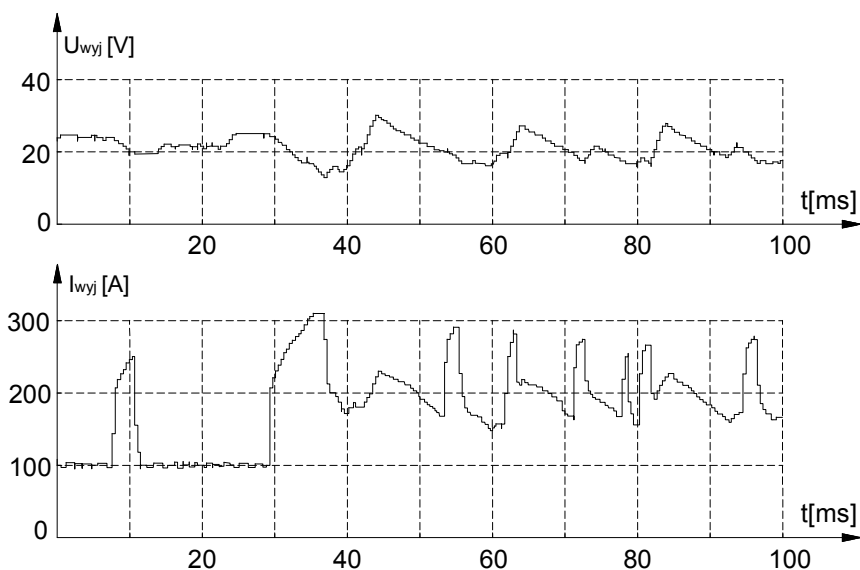
W czasie przeprowadzania badań nastąpiło uszkodzenie urządzenia spawalniczego. Uszkodzeniu uległ tyrystor SCT280 będący częścią modułu tyrystorowego PTT650DVA włoskiej firmy S.CO.M.E.S. Na rysunku 12 pokazano płytkę krzemową uszkodzonego tyrystora. Powodem uszkodzenia było silne odkształcenie przebiegu napięcia zasilającego, które miało wpływ na pracę układu formującego impulsy bramkowe tyrystorów. Zbyt krótkie impulsy bramkowe powodowały wydłużenie czasu rozprzestrzeniania się obszaru przewodzenia struktury krzemowej. Duża gęstość prądu w obszarze przyległym do bramki powodowała wydzielanie nadmiernej energii strat na małej powierzchni, a następnie stopienie złącza w pobliżu bramki i rozprzestrzenienie się defektu [2], [6].



Rys. 12. Uszkodzona płytkę krzemowa tyrystora

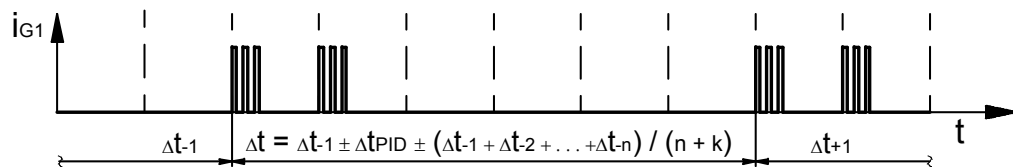
3. STEROWANIE TRÓJFAZOWEGO MOSTKA TYRYSTOROWEGO PRZY ODKSZTAŁCONYM NAPIĘCIU ZASILAJĄCYM

Odkształcony przebieg napięcia zasilającego może się przyczynić do uszkodzenia urządzenia spawalniczego, ale też może mieć zasadniczy wpływ na przebieg procesu spawania (rys. 13).



Rys. 13. Przebieg napięcia i prądu spawania przy nieprawidłowej detekcji punktów synchronizacji

Aby uniezależnić się od błędnej detekcji punktów synchronizacji, dla odkształconego napięcia zasilającego, zmieniono sposób sterowania mostkiem tyrystorowym. Idea tego rozwiązania polega na sterowaniu załączaniem tyrystorów poprzez korygowanie położenia w czasie, punktu załączania tyrystorów na podstawie wartości uchybu otrzymywanego z cyfrowego regulatora PID (rys. 14). Gdy urządzenie znajduje się w stanie jałowym ustalane jest wstępnie położenie punktu załączania tyrystorów z uwzględnieniem punktów synchronizacji.



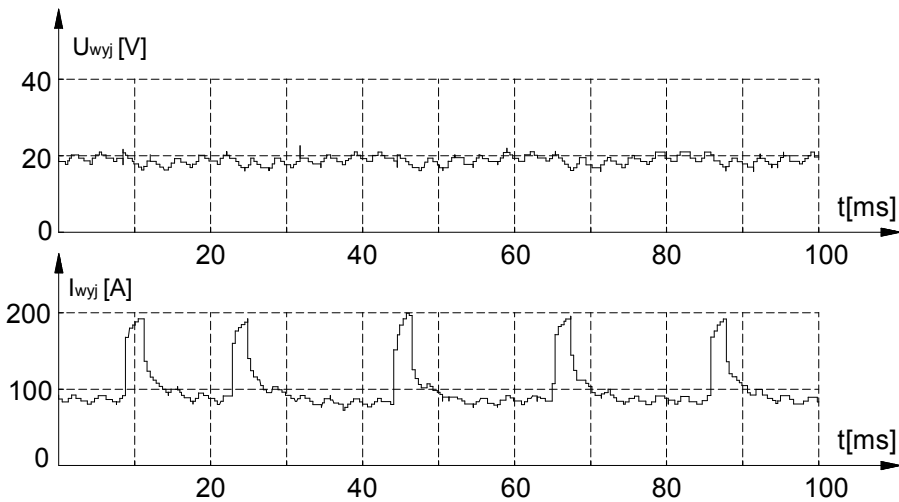
Rys. 14. Sterowanie położeniem impulsów bramkowych

Zmodyfikowano mikroprocesorowy program układu sterowania tak, aby położenie w czasie, kolejnych generowanych impulsów bramkowych, odbywało się zgodnie z zależnością:

$$\Delta t = \Delta t_{-1} \pm \Delta t_{PID} \pm \frac{\Delta t_{-1} + \Delta t_{-2} + \dots + \Delta t_{-n}}{n + k} \quad (1)$$

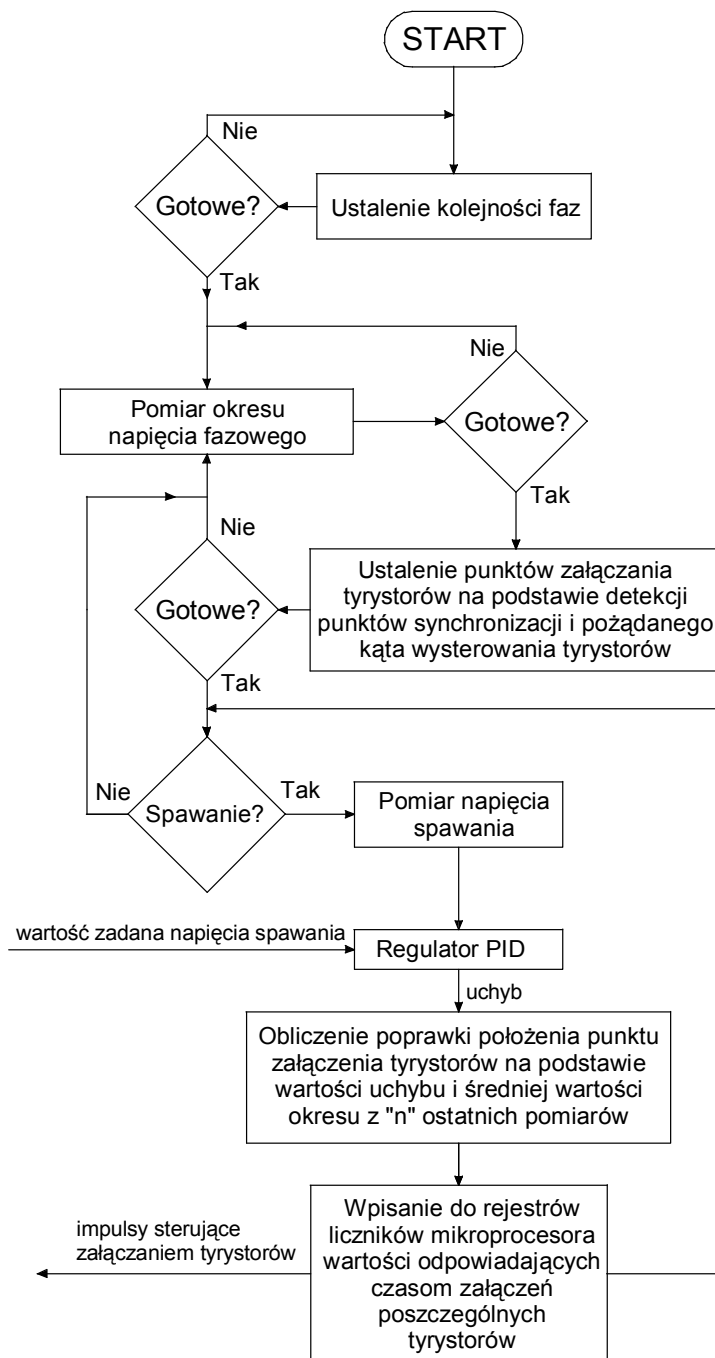
gdzie:

- $\Delta t_{-2}, \Delta t_{-1}, \Delta t_{-n}$ – przedziały czasowe między kolejnymi impulsami bramkowymi,
- Δt_{PID} – wartość korekcji przesunięcia czasowego otrzymanego z regulatora *PID*,
- n, k – stałe zależne od własności dynamicznych generatora prądowórczego.

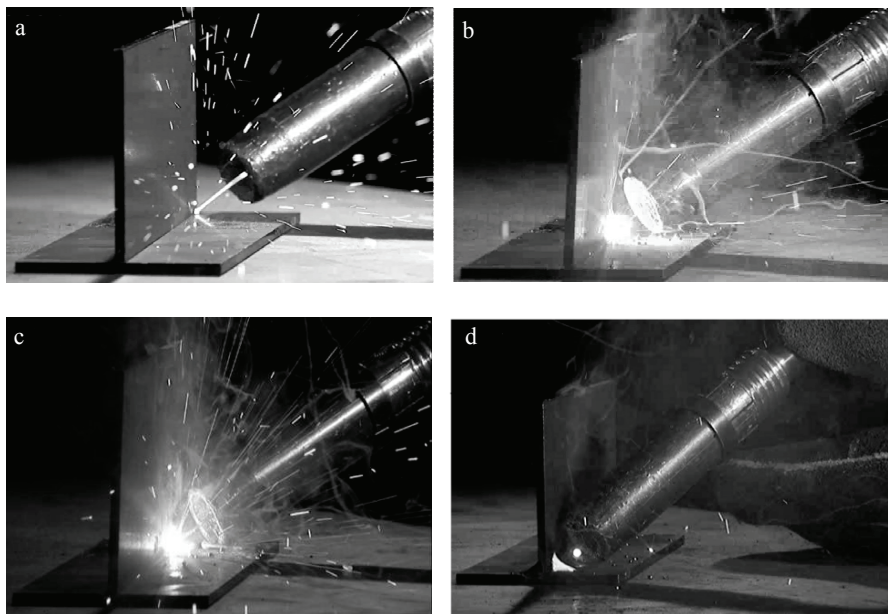


Rys. 15. Przebieg napięcia i prądu spawania po zastosowaniu zmodyfikowanego układu sterowania

Po modyfikacji algorytmu mikroprocesora sterującego tyrystorami (rys. 16), wykonano próby spawania. Pomimo silnie odkształconego napięcia zasilającego uzyskano stabilny łuk spawalniczy (rys. 15, 17). Tyrystory są załączane trzema impulsami gwarantującymi pewność załączenia i nieuszkodzenie tyrystorów. Prawidłowe wyznaczenie punktów synchronizacji przez układ sterowania pozwoliło na uzyskanie niezakłóconej charakterystyki statycznej $= f(J)$ (rys. 2, charakterystyka 2), z nachyleniem regulowanym poprzez realizację algorytmu sterowania mikroprocesora.



Rys. 16. Schemat blokowy algorytmu sterowania mostka tyrystorowego



Rys. 17. Proces spawania: a) i b) zajarzanie łuku, c) palenie się łuku, d) wygaszenie łuku

4. PODSUMOWANIE

W urządzeniach spawalniczych, w których stosuje się mostki tyrystorowe, przy silnie odkształconym napięciu zasilającym, w typowych rozwiązaniach układowych występuje problem z prawidłową detekcją punktów synchronizujących. Niezależnie, jaki układ sterowania badano, analogowy, czy cyfrowy, to poprawne działanie układu regulacji zawsze zależało od precyzji, z jaką były wykrywane momenty przejść przez zero napięć fazowych. Zastosowanie nowego opracowanego rozwiązania układu cyfrowego sterowania wyzwaniem tyrystorów, uniezależniło pracę układu, od jakości energii zasilania. Urządzenie stało się niewrażliwe na znaczne odkształcenie przebiegu napięcia zasilającego, gdzie w przypadku typowych analogowych i cyfrowych układów sterujących poprawna praca stawała się niemożliwa. Szczególnie jest to istotne w przypadku urządzeń spawalniczych, gdzie każde zaburzenie pracy układu zasilającego ma wpływ na jakość otrzymywanych połączeń spawanych.

LITERATURA

- [1] DOBAJ E., *Maszyny i urządzenia spawalnicze*, WNT, Warszawa 2005.
- [2] LUCIŃSKI J., *Układy tyrystorowe*, WNT, Warszawa 1978, 52–85.

- [3] NAWROCKI Z., *Wzmacniacze operacyjne i przetworniki pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [4] PAWLACZYK L., ZAŁOGA Z., *Energoelektronika. Ćwiczenia laboratoryjne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2005.
- [5] STOPCZYK W., NAWROCKI Z., *Wirtualny punkt synchronizacji w układach sterowania trójfazowymi mostkami tyrystorowymi*, [w:] *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe* nr 98, Katowice 2013, 199–203.
- [6] ŻYBORSKI J., LIPSKI T., *Zabezpieczenia diod i tyrystorów*, WNT, Warszawa 1979, 17–49.
- [7] *Equipment catalogue*, Lincoln Electric, Cleveland 2013.

CONTROL OF THREE-PHASE THYRISTOR BRIDGE POWERED BY DEFORMED VOLTAGE SUPPLY

In welding power systems with thyristor regulatory elements where stability and accuracy of the control of output parameters play a key role it becomes important to precisely detect moments of zero crossing in adequate phase voltage of power line. When we have strong mains with sinusoidal voltage waveforms, zero crossing detection of phase voltages is simple. It is different in the case of mains phase voltage waveforms which are deformed and when switching thyristor bridge visibly deformed voltage waveforms. Such a situation we have where the thyristor bridge is powered by the generator. The article describes the digital control system of 20 kW three-phase, 6-pulse thyristor bridge using new control system. The system was tested in the welding machine with 500A of output current, powered by generator with output power of 13.2 kW. Despite a significant deformation voltage supply, system still worked correctly. The article presents the output voltage waveforms for typical control systems and a new system with the deformed power supply.