

Badanie zjawisk w łuku elektrycznym z wykorzystaniem charakterystyk czasowo-częstotliwościowych

Streszczenie. Praca przedstawia wykorzystanie charakterystyk czasowo-częstotliwościowych do oceny przebiegu procesów technologicznych, w których wykorzystywany jest łuk elektryczny, na przykładzie procesu spawania. Opisuje sposoby wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych oraz przedstawia różnice pomiędzy metodami. Przedstawia wykorzystanie metody czasowo-częstotliwościowej do oceny przebiegu zjawisk w spawalniczym łuku elektrycznym. Przedstawia analizę porównawczą dla różnych metod spawania, pod kątem możliwości wykrywania zakłóceń w przebiegu procesu. Wyniki przedstawione w pracy mogą być wykorzystane do tworzenia systemów kontroli jakości prac spawalniczych oraz innych procesów wykorzystujących łuk elektryczny.

Abstract. The paper presents the use of time-frequency characteristics, to evaluate of technological processes in which an electric arc is used, for example, the welding process. Describes how to determine the time-frequency characteristics and presents the differences between the methods. Demonstrates the use of time-frequency methods to evaluate the course of events in the welding arc. Presents a comparative analysis of different welding methods, in terms of the ability to detect disturbances in the process. The results presented in the work can be used to produce quality control systems of welding processes and others using an electric arc. (*Investigation of phenomena in electric arc with time-frequency characteristics*).

Słowa kluczowe: spawanie, łuk elektryczny, charakterystyki czasowo-częstotliwościowe, zakłócenia, kontrola jakości.

Keywords: welding, electric arc, time-frequency characteristics, disturbances, quality control.

doi:10.12915/pe.2014.02.12

Wprowadzenie

Spawanie z wykorzystaniem łuku elektrycznego jest powszechnie stosowaną technologią łączenia metali [1]. Wyróżnić można kilka dominujących metod:

- spawanie elektrodą otuloną - MMA,
- spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazu - MIG/MAG,
- spawanie elektrodą nietopliwą - TIG,
- spawanie łukiem krytym SAW.

W przypadku wykorzystania każdej z tych metod, istotne jest zapewnienie odpowiedniej jakości spawu [2]. Ocena poprawności wykonanej spoiny może być dokonana z wykorzystaniem metod niszczących, ale tylko na etapie opracowania technologii wytwarzania serii produktów. Innym sposobem badania są metody nieniszczące, wykonywane najczęściej po zakończeniu operacji spawania. Metody te można stosować do większości produktów. W przypadku wykrycia nieprawidłowości wadliwą spoinę w spawanym elemencie należy najczęściej usunąć i wykonać od nowa. Późne wykrycie nieprawidłowości jest wadą metod realizowanych po zakończeniu procesu.

Pewną grupę metod nieniszczących stanowią sposoby wykorzystujące charakterystyki łuku elektrycznego [3]. Metody te pozwalają na ciągłe monitorowanie zjawisk zachodzących w łuku i wykrywanie zakłóceń w przebiegu procesu spawania. Najczęściej stosowana jest obserwacja wartości skutecznych napięć i prądów łuku. Sposób ten jest jednak mało dokładny i pozwala tylko na zgrubną ocenę poprawności przebiegu procesu. W wyniku uśredniania w stosunkowo długich interwałach czasowych, pomijanych jest wiele zjawisk mogących świadczyć o nieprawidłowości. Innym sposobem jest analiza statystyczna zjawisk występujących w łuku. Przykłady oceny przebiegu spawania metodami statystycznymi przedstawiono w pracach [4, 5] w odniesieniu do metod MAG i MMA. Sposób ten znacznie ułatwia ocenę przebiegu procesu spawania i pozwala w przypadku produkcji powtarzalnej, na sprawdzenie zgodności wykonanych spawów w porównaniu z elementem wzorcowym.

Wadą wszystkich przedstawionych metod jest mała czułość na drobne zakłócenia występujące w łuku elektrycznym podczas spawania, związane na przykład z niedokładnym oczyszczeniem elementów z rdzy lub

brakiem przetopu. W związku z tym w ramach badań poszukiwano metod, które pozwalają przedstawić w wygodny i bardziej dokładny sposób przebieg zjawisk w łuku. Jednym ze sposobów reprezentacji zjawisk w łuku są charakterystyki czasowo-częstotliwościowe. W ramach pracy wyznaczono charakterystyki czasowo-częstotliwościowe dla kilku metod spawania. Dokonano także ich oceny pod kątem możliwości obserwacji zakłóceń w przebiegu procesu spawania.

Metody wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych

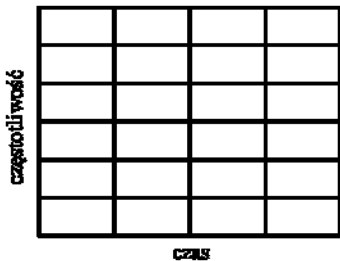
W cyfrowych systemach pomiarowych i sterujących stosowanych w elektrotechnice, podstawowym sposobem reprezentacji sygnałów jest zapis będący funkcją czasu. Sygnał opisany jest za pomocą ciągu liczb otrzymanych z przetwornika A/C, w określonych równomiernych odstępach czasu. Odstępki te dobierane są na podstawie zawartości harmonicznym mierzonego sygnału przy wykorzystaniu prawa Kotelnikowa-Shannona.

Innym popularnym sposobem reprezentacji sygnałów jest zapis w funkcji częstotliwości. Możliwy jest on do uzyskania poprzez realizację dyskretnej, lub szybkiej transformaty Fouriera, przebiegów zarejestrowanych w funkcji czasu. Reprezentacje te pod względem ilości danych potrzebnych do opisu sygnału możemy traktować jako równoważne.

W opisie sygnałów w funkcji częstotliwości z wykorzystaniem dyskretnej, lub szybkiej transformaty Fouriera występuje problem związany z tym, że nadają się one tylko do opisu sygnałów stacjonarnych. W przypadku, gdy sygnał zmienia swoje widmo częstotliwościowe w funkcji czasu, opis ten nie pozwala na określenie chwil czasu, w których te zmiany następują. Powoduje to, że nie nadaje się on do przetwarzania informacji o tego typu sygnałach. Rozwiązaniem problemu opisu częstotliwościowego sygnałów niestacjonarnych, jest wykorzystanie krótkookresowego przekształcenia Fouriera opisywanego skrótem STFT (ang. Short Time Fourier Transform).

Przekształcenie STFT pozwala na ocenę zmian w przebiegu sygnałów, ma jednak wadę związaną z trudnością opisu jednocześnie szybkich i wolnych zjawisk, co wynika z zasady nieokreśloności. Powodowane jest to

stałą szerokością okna czasowego, co przedstawia rysunek 1. W przypadku wąskiego okna mamy większą dokładność lokalizacji czasowej, ale małą rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości. Dla szerokiego okna czasowego mamy dokładniejsze przedstawienie częstotliwości, ale pogorszenie dokładności lokalizacji czasowej. W zależności od kształtu okna wyznaczone charakterystyki będą miały różną dokładność reprezentacji sygnału. Opis ten jest jednak wystarczający do analizy zakłóceń występujących w łuku elektrycznym. Sposobem graficznego przedstawienia przekształcenia STFT jest spektrogram pokazujący w formie obrazu amplitudy składowych częstotliwościowych.

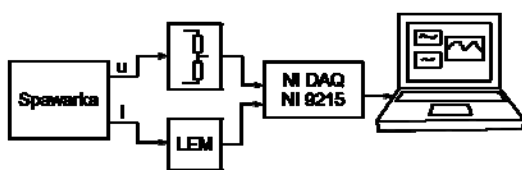


Rys. 1. Rozdzielczość czasowo-częstotliwościowa.

Przedstawione sposoby reprezentacji sygnałów są najczęściej spotykane w elektrotechnice. W innych dziedzinach stosowane są inne sposoby reprezentacji sygnałów np. wykorzystujące przekształcenie falkowe. Opisy te nie pozwalają na bezpośrednią analizę zawartości harmonicznnych. Działanie tych metod jest zbliżone do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych z wykorzystaniem transformaty STFT, jednak w przypadku tych metod nie wyznacza się transformaty dla całego przebiegu z jednakowym oknem, ale dla różnych częstotliwości okna mają inną szerokość.

Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk czasowo-częstotliwościowych

Do zebrania danych występujących w trakcie procesu spawania, wykorzystano stanowisko badawcze, składające się z urządzenia spawalniczego podłączonego do systemu pomiarowego. Konfigurację systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Konfiguracja systemu pomiarowego.

System pomiarowy obejmował tor wejściowy składający się z dzielnika napięcia do pomiaru napięcia łuku oraz przetwornika pomiarowego firmy LEM LA 205S o nominalnym zakresie pomiarowym wynoszącym 200 A, do pomiaru prądu łuku. Moduły wejściowe współpracowały z systemem akwizycji danych NI CompactDAQ, wyposażonym w czterokanałowy moduł wejść analogowych NI 9215, o jednoczesnym próbkowaniu i częstotliwości akwizycji danych wynoszącej 100 kHz na kanał. Moduł ten był podłączony poprzez port USB do komputera przenośnego typu PC. Na komputerze zainstalowano oprogramowanie stworzone w języku Python, służące do rejestrowania i archiwizacji danych na dysku. Do obsługi modułu pomiarowego wykorzystano bibliotekę pyDAQmx służącą do obsługi przyrządów pomiarowych firmy National

Instruments i współpracującą z biblioteką sterowników NI-DAQmx.

Przykładowy kod prezentujący obsługę modułu pomiarowego przedstawiony jest na listingu

```
from PyDAQmx import *; import numpy

dev="cDAQ1Mod1"; acqtime=60; chan=2;
freq=100000.0

numsamples=int(freq*acqtime); timeout=acqtime+10

taskHandle = TaskHandle(); read = int32()
data = numpy.zeros((numsamples*chan),
dtype=numpy.float64)

# Konfiguracja zadania, kanałów i próbkowania
DAQmxCreateTask("",byref(taskHandle))
DAQmxCreateAIVoltageChan(taskHandle,dev+"/ai0","",
,DAQmx_Val_Cfg_Default,-10.0, 10.0,
DAQmx_Val_Volts, None)
DAQmxCreateAIVoltageChan(taskHandle,dev+"/ai1","",
,DAQmx_Val_Cfg_Default,-10.0, 10.0,
DAQmx_Val_Volts, None)
DAQmxCfgSampClkTiming(taskHandle,"",freq,
DAQmx_Val_Rising, DAQmx_Val_FiniteSamps,
numsamples)
```

```
# uruchomienie zadania akwizycji
DAQmxStartTask(taskHandle)

# odczyt danych
DAQmxReadAnalogF64(taskHandle,numsamples,timeout,
DAQmx_Val_GroupByScanNumber,data,numsamples*chan,
byref(read),None)
```

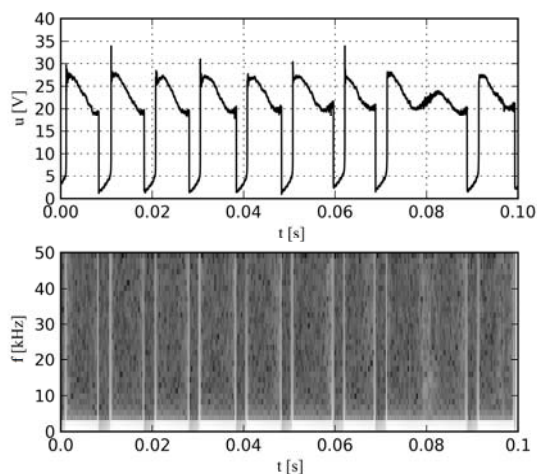
```
# zatrzymanie zadania akwizycji
DAQmxStopTask(taskHandle)
DAQmxClearTask(taskHandle)
```

```
# zapis danych do pliku
np.save('d:/badania/proba_AC_jlt_80_no_C_test1.np
y',data)
```

Pomiary rejestrowano dla różnych metod spawania i różnych nastaw urządzeń spawalniczych. Zebrane dane przetwarzano następnie w trybie offline z wykorzystaniem środowiska obliczeniowego *Pythonxy* i aplikacji *Spyder*. Charakterystyki czasowo-częstotliwościowe wyznaczano z wykorzystaniem biblioteki *matplotlib.mlab* zawierającej funkcję *specgram*, pozwalającą na wyznaczenie dyskretnej transformaty STFT z wykorzystaniem różnych wersji okien służących do ograniczenia przecieku w wyznaczonej charakterystyce częstotliwościowej. W ramach badań wykorzystywano okno Hanninga, zapewniające dobrą rozdzielczość punktową charakterystyki. Przebiegi przedstawione w pracy wykonano dla szerokości okna wynoszącej 64 punkty, co odpowiada czasowi 0,64 ms, w ramach badań wyznaczano także charakterystyki dla innych długości okien.

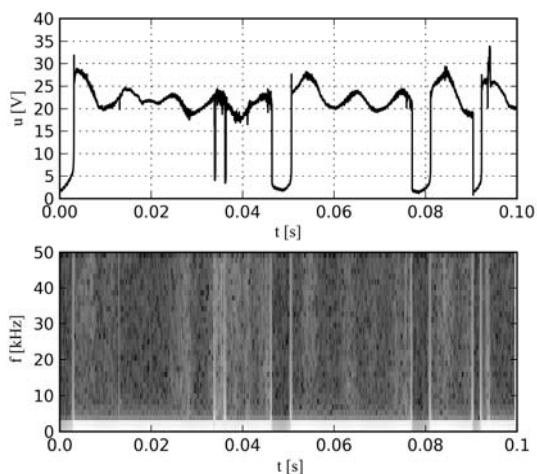
Charakterystyki czasowo-częstotliwościowe dla sygnałów spawalniczych

Celem badań było określenie możliwości diagnostyki procesu spawalniczego na podstawie charakterystyk czasowo-częstotliwościowych. W tym celu zarejestrowano i przeanalizowano dane obejmujące różne typy procesów spawalniczych. W pierwszej kolejności wyznaczone zostały charakterystyki przy wykorzystaniu metody spawania elektrodą topliwą w osłonie gazu zwaną MAG. W stosunku do tej metody analizowano przebiegi czasowe i czasowo-częstotliwościowe dla całego przebiegu procesu spawania oraz w charakterystycznych punktach procesu. Przykładowe przebiegi uzyskane z wykorzystaniem tej metody w stabilnych stanach pracy pokazano na rysunku 3.



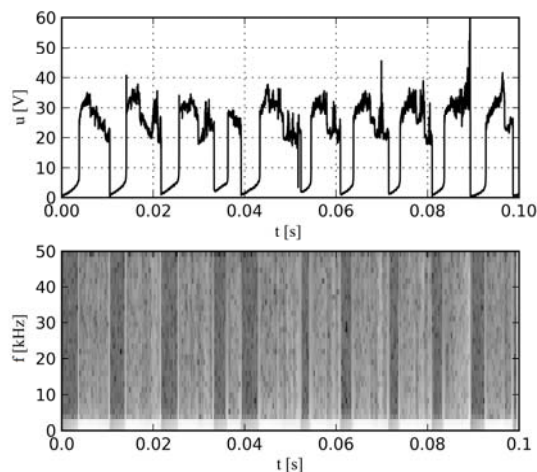
Rys. 3. Charakterystyki dla metody MAG - spawanie zwarciove.

Przedstawia on spawanie zwarciove z chwilowym przejściem do spawania natryskowego. Na kolejnym rysunku pokazano spawanie natryskowe z chwilowymi przejściami do spawania zwarciovego. Na charakterystykach czasowych pokazane są zmiany kształtu napięcia łuku. Widoczne są także zakłócenia o wysokiej częstotliwości pojawiające się w momentach palenia się łuku. Zjawiska występujące na charakterystykach czasowych, widoczne są także na charakterystykach czasowo-częstotliwościowych. Pionowe jasne linie wynikają ze skokowych zmian napięcia, w których charakterystyka częstotliwościowa zawiera dużą ilość harmonicznych. Jaśniejsze pionowe pola na wykresach powiązane są z zakłóceniami w trakcie palenia się łuków. Wyraźnie widać, że charakter tych zakłóceń jest szerokopasmowy i obejmują one pełny zakres częstotliwości.



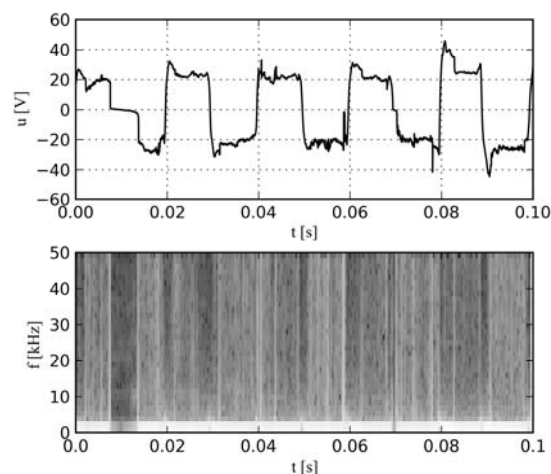
Rys. 4. Charakterystyki dla metody MAG - spawanie natryskowe.

Kolejne wykresy przedstawione na rysunku 5 przedstawiają przebiegi napięć w przypadku braku gazu osłonowego łuku. Na przebiegach czasowych widoczna jest dużo większa ilość zakłóceń. Widoczne są one na charakterystykach czasowo-częstotliwościowych w postaci jasnych pól obejmujących cały zakres częstotliwości.

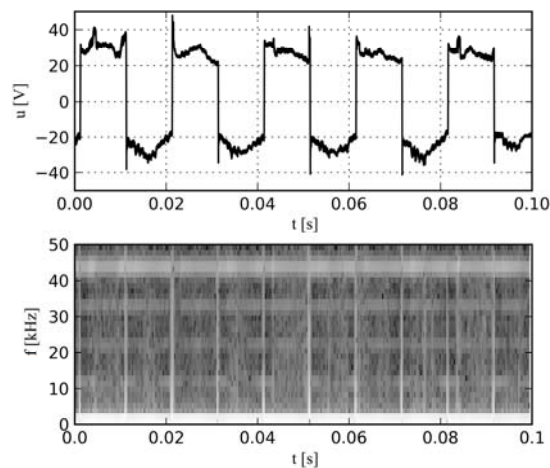


Rys. 5. Charakterystyki dla metody MAG - brak gazu osłonowego.

W kolejnym etapie badań analizowano przebiegi uzyskane z wykorzystaniem metody MMA, polegającej na spawaniu elektrodami otulonymi. Przebiegi zarejestrowano z dwóch urządzeń spawalniczych, spawarki transformatorowej i spawarki inwerterowej. Przykładowe przebiegi uzyskane z badania tych urządzeń przedstawiono na rysunku 6 i 7.



Rys. 6. Charakterystyki dla metody MMA - spawarka transformatorowa.



Rys. 7. Charakterystyki dla metody MMA - spawarka inwerterowa.

Przebiegi uzyskane ze spawarki transformatorowej mają podobny charakter jak w metodzie MAG, gdyż w obydwu badanych urządzeniach nie ma układów przekształtnikowych. Na charakterystykach czasowych widoczne są momenty zapłonów łuku oraz zakłócenia. Na charakterystykach odpowiadają im jasne linie i pola. Na przebiegach widać, że zakłócenia mają charakter szerokopasmowy i obejmują pełny zakres harmonicznym. W przypadku spawarki inwerterowej charakterystyka czasowo-częstotliwościowa jest bardziej złożona. Występują wyraźne jasne pionowe linie związane z bardzo stromym opadaniem napięcia. Pojawiają się także poziome linie związane z harmonicznymi wnoszonymi przez układ przekształtnika spawarki.

Podsumowanie

Analiza przebiegów napięcia w łuku spawalniczym możliwa jest do przeprowadzenia w dziedzinie czasu poprzez analizę przebiegów i określania chwil występowania zdarzeń. Ocena tych zdarzeń i ich klasyfikacja może być przeprowadzana na podstawie wartości chwilowych lub wartości skutecznych bądź średnich. Użyteczność wartości średnich i skutecznych wyznaczanych w dłuższych okresach czasu jest stosunkowo niewielka, gdyż w zasadzie pozwala tylko na ocenę prawidłowości nastaw i ich utrzymywania w trakcie trwania procesu. Nie zapewnia wystarczającej dokładności w zakresie lokalizacji zakłóceń w przebiegu procesu technologicznego. Tego typu zakłócenia można próbować lokalizować w oparciu o charakterystyki chwilowe.

Problemem jest jednak bardzo duża ilość danych, które trzeba wyświetlić i przeanalizować, co w praktyce uniemożliwia wykorzystanie tych danych do oceny przebiegu procesu. Ograniczenia ilości danych podlegających analizie można dokonać wykorzystując charakterystyki czasowo-częstotliwościowe, które

wyznaczają częstotliwościową reprezentację przebiegów procesu spawania w przyjętych odcinkach czasu. Zastosowanie tego typu opisu pozwala przedstawić przebieg procesu w postaci dwuwymiarowego obrazu, na którym widoczne są wszelkie zmiany w przebiegu procesu.

Pozwala to na łatwą lokalizację momentów czasu, w których występowały zmiany w procesie lub zakłócenia. Zapewniając powiązanie zmian na charakterystyce z informacją o położeniu elektrody w przestrzeni, możliwe jest dokładne określenie miejsc w spoinie, w których wystąpiły zakłócenia. Wykorzystanie charakterystyk czasowo-częstotliwościowych pozwala także na łatwe porównywanie w produkcji seryjnej przebiegów procesu spawania dla różnych spawów, z przebiegiem zarejestrowanym dla spawu wzorcowego.

LITERATURA

- [1] Dobaj E.: Maszyny i urządzenia spawalnicze. *WNT*, Warszawa (2005)
- [2] Czuchryj J.: Kontrola jakości prac spawalniczych. *KaBe*, Krosno (2002)
- [3] Luksa K.: Przydatność sygnałów emitowanych przez elektryczny łuk spawalniczy do diagnozowania procesu spawania MAG. *Wyd. Politechniki Śląskiej*, Gliwice (2012)
- [4] Kazala R.: System do analizy charakterystyk wyładowania łukowego w spawaniu metodą MMA, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2b, (2013).
- [5] Kazala R.: Ocena przebiegu procesu spawania metodą MAG na podstawie charakterystyk wyładowania łukowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 7, (2011).

Autor: dr inż. Robert Kazala, Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń i Systemów Automatyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: rkazala@tu.kielce.pl.