

Modulacja szerokości impulsu PWM w sterowaniu automatycznym

Streszczenie. W pracy przedstawiono problematykę modelowania i stosowania modulacji szerokości impulsów PWM dla automatycznego sterowania procesami. W programie Matlab-Simulink opracowano model układu sterowania z zastosowaniem tej metody dla pieca indukcyjnego, następnie przeprowadzono symulację komputerową, która pozwoliła wstępnie ocenić jakość sterowania dla metody PWM i regulatora PID. Ponadto przedstawiono również możliwości stosowania PWM w sterowaniu procesami z zastosowaniem programowalnych sterowników logicznych PLC.

Abstract. The paper presents the problem of modeling and application of pulse width modulation PWM for automatic process control. In the program Matlab-Simulink model was developed control system using this method for an induction furnace followed by computer simulation that allowed pre-judge the quality control method for a PWM, and the PID controller. In addition, the possibility of using PWM in process control using PLC programmable logic controllers is also presented. **The problem of modeling and application of pulse width modulation PWM for automatic process control**

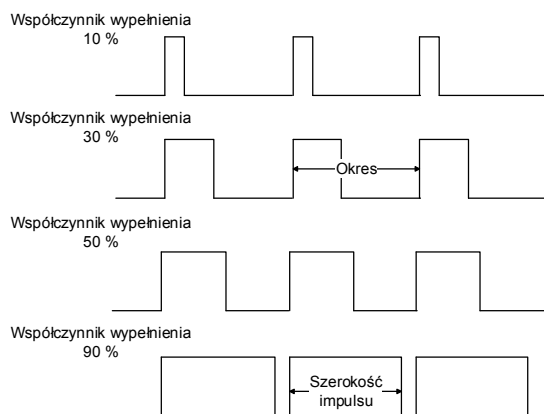
Słowa kluczowe: modulacja szerokości impulsu, sterownik PLC, układ regulacji.

Keywords: pulse width modulation, PLC controller, control system.

Wstęp

Metoda sterowania polegająca na ustalaniu wartości wypełnienia impulsów o charakterystyce prostokątnej przy stałej częstotliwości jest znana już kilkadziesiąt lat. Nazwa PWM jest skrótem od angielskiego zwrotu „Pulse Width Modulation”, oznaczającego modulację szerokości impulsu, np. prądowego lub napięciowego. Podstawą działania modulacji PWM jest generacja impulsowych sygnałów logicznych załączających klucze tranzystorowe na podstawie porównania sinusoidalnego przebiegu referencyjnego z trójkątnym sygnałem nośnym. Jest to metoda umożliwiająca realizację sterowania analogowego (proporcjonalnego) w programowalnych sterownikach logicznych PLC, wyposażonych z wyjścia cyfrowe w wykonaniu tranzystorowym. Wybrane wyjścia cyfrowe dostępne są jako wyjścia impulsowe, o czym informują producenci urządzeń w dokumentacji technicznej PLC (teoretycznie dopuszczalne są przekładnikowe jednak są dużo wolniejsze) [3, 6].

Sterowanie PWM można spotkać w najprostszych sterownikach tj. Siemens Logo 8 oraz w zaawansowanych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Różnica najczęściej polega na tym, że w tych pierwszych częstotliwość przełączania jest niska – do kilkudziesięciu Hz (Siemens Logo 8 – 10 Hz), a w drugich nie rzadko 10 – 120kHz.



Rys. 1. Zmiana współczynnika wypełnienia w sygnale PWM

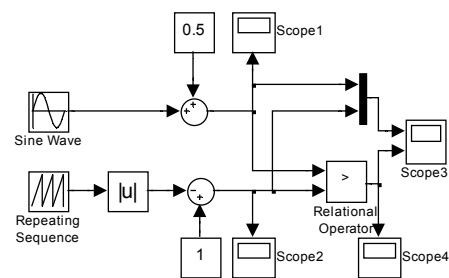
Modulacja wypełnienia polega na zmianie długości sygnału z logiką 1, przy niezmienionym okresie

(częstotliwości) (rys.1). W zależności od stosunku czasu włączenia do czasu wyłączenia uzyskujemy różne średnie wartości prądu lub napięcia.

Celem pracy jest przedstawienie problematyki stosowania sygnału PWM w układach regulacji automatycznej na przykładzie sterowania indukcyjnym piecem służącym do oznaczania topliwości popiołu z biopaliw stałych w wysokiej temperaturze metodą rurową. Ponadto omówiono problematykę realizacji tej metody w sterownikach PLC.

Modelowanie i symulacja regulatora PWM

Obiekt sterowania stanowił indukcyjny piec rurowy, przedstawiony w postaci modelu transmitancyjnego. Szczegółowo został opisany w innej pracy autorów [2,4], stąd ograniczono się do przedstawienia modelu regulatora PWM oraz efektów jego działania. W badaniach symulacyjnych wykorzystano program Matlab-Simulink. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumentacji [9] zbudowano model regulatora przedstawiony na rysunku 2.

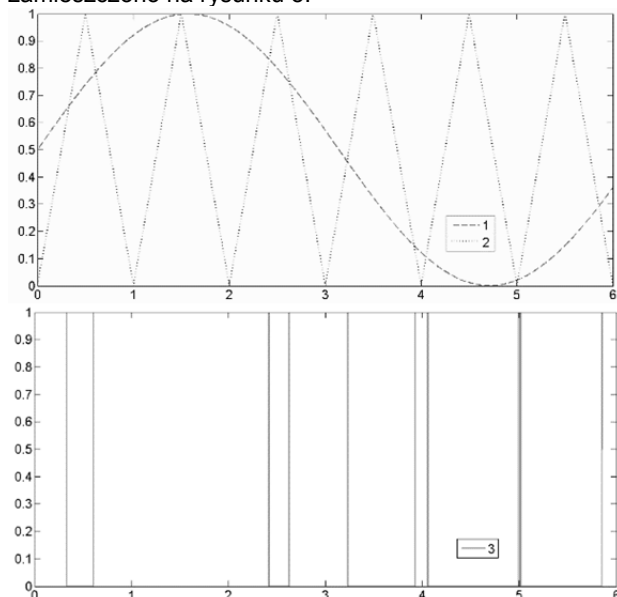


Rys.2. Blok generatora PWM

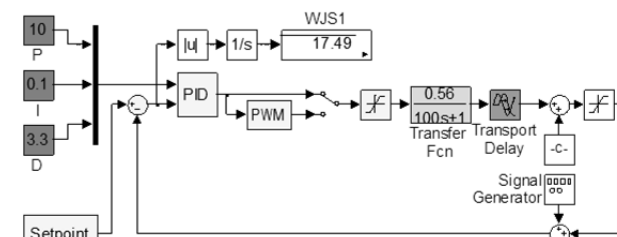
Działanie tego regulatora zilustrowano na rysunku 3. Na wykresie widoczne są dwa sygnały: sinusoidalny jak referencyjny (1) do układu oraz sygnał piłokształtny (2) – tzw. nośnik. Sygnał (3) na wykresie stanowi impulsy prostokątne o długości czasu trwania wyznaczonej przez przecinające się sygnały (1) i (2). Standardowo tam, gdzie sinusoida odcina wierzchołek trójkąta – ustawiany jest sygnał 1 (sygnał nr 3), pozostałe pola to 0 logiczne. Oczywiście istnieje możliwość odwrócenia tej logiki. Jest to najczęściej stosowana metoda formowania sygnału PWM.

Do modelu transmitancyjnego indukcyjnego pieca dołączono regulator PWM. Odpowiada on za regulację

temperatury procesu spalania próbek z biomasa, całość przedstawia rysunek 4. Najistotniejszym elementem tego schematu jest blok generatora PWM, którego zawartość zamieszczono na rysunku 5.

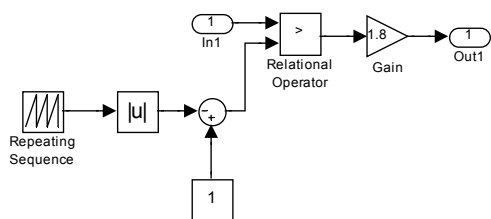


Rys.3. Generator PWM – sygnały: 1 – referencyjny (sinusoida), 2 – trójkątny nośnik, 3 – PWM



Rys.4. Schemat blokowy modelu symulacyjnego układu sterowania z regulatorem PID – sygnał ciągły i PWM

Do In1 (rys.5) doprowadzony jest sygnał referencyjny z klasycznego regulatora PID (rys.4). Repeating Sequence i inne współpracujące z nim bloki generują trójkątny nośnik. Na Out1 pojawia się sygnał PWM wprowadzany na wejście modelu transmitancyjnego obiektu.



Rys.5. Blok generatora PWM

Ocena jakości działania regulatora PWM

Celem oceny jakości funkcjonowania regulatora PWM porównano go z najczęściej stosowanym – klasycznym regulatorem PID. PID generuje sygnał ciągły a PWM dyskretny, co już na wstępie jest korzyścią dla pierwszego. Jako kryterium oceny jakości sterowania przyjęto wskaźnik całkowity $WJS1$ (całka z wartości bezwzględnej uchybu (1)).

$$(1) \quad WJS1 = \int_{t_p}^{t_f} |e| dt$$

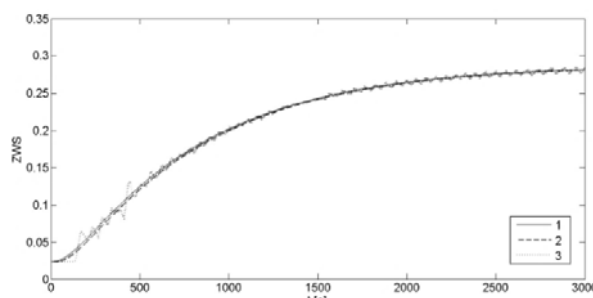
gdzie: e – uchyb w układzie sterowania, t – czas, t_p – początek interwału czasowego sterowania, t_f – koniec interwału czasowego sterowania.

Wartość wskaźnik $WJS1$ informuje o jakości regulacji, im wartość jego jest niższa tym jakość regulacji jest lepsza [5].

W ramach badań symulacyjnych analizowano przebiegi *znormalizowanych wartości sygnału* (ZWS) regulatora (PWM lub PID) dla procesu sterowania piecem indukcyjnym przy zadanej wartości temperatury.

Symulacja komputerowa układu sterowania bez sygnałów zakłócających

Na rysunkach 6–12 zilustrowano następujące przebiegi ZWS: 1 – wartość zadaną temperatury, 2 – sygnał wyjściowy układu sterowania przy sygnale sterującym ciągłym, 3 – sygnał wyjściowy układu sterowania przy sygnale sterującym PWM. Wykresy rejestrowano dla skokowej zmiany temperatury. Wstępnie analizie poddano działanie układu w warunkach idealnych tj. bez obecności zakłóceń. Uzyskane przebiegi ZWS zilustrowano na rysunku 6. Wartości wskaźników całkowitych zestawiono w tabeli 1.



Rys.6. Wyniki symulacji dla układów sterowania – brak zakłóceń

Tabela 1. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania – brak zakłóceń

Wskaźnik \ Syg. ster.	Ciągły	PWM
WJS1	17,49	21,60

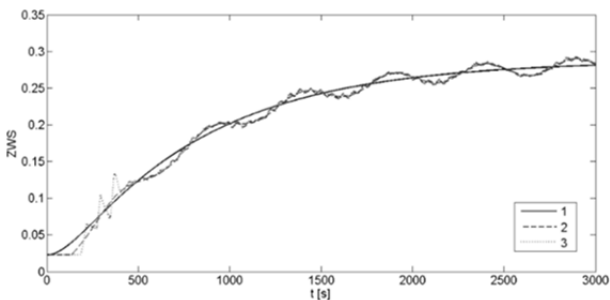
Analizując przebieg symulacji komputerowej oraz wartości wskaźnika $WJS1$ można stwierdzić, że jakość sterowania dla obu sygnałów sterujących jest zbliżona. Zauważono, że dla sygnału PWM, sygnał wyjściowy modelu obiektu podlega niewielkim oscylacjom.

Symulacja komputerowa w obecności sygnału zakłócającego

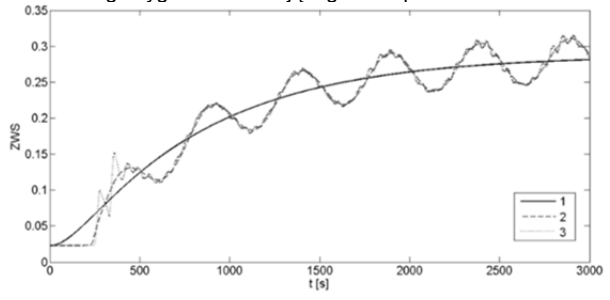
Istotniejsze z punktu widzenia użytkownika jest, jak regulator będzie pracował w obecności zakłóceń, stąd przeprowadzono symulację sterowania z uwzględnieniem, wprowadzonego do pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, sygnału zakłócającego o przebiegach: sinusoidalnym i prostokątnym. Częstotliwości zmian wynosiła 0,002 Hz a amplituda odpowiednio: 1%, 3% i 5% maksymalnej amplitudy sygnału zadanego [5]. Znormalizowane wyniki symulacji (ZWS) dla sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego zilustrowano na rysunkach 7-9, natomiast wartości wskaźników $WJS1$ przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości wskaźnika (WJS1) dla sinusoidalnego sygnału zakłócającego

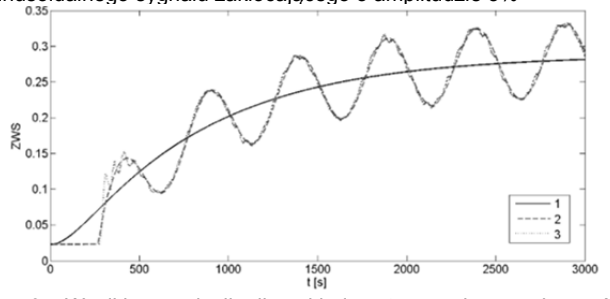
Syg. ster. \ Amplituda	Ciągły	PWM
1%	21,71	20,52
3%	40,12	34,40
5%	61,05	46,19



Rys.7. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1%



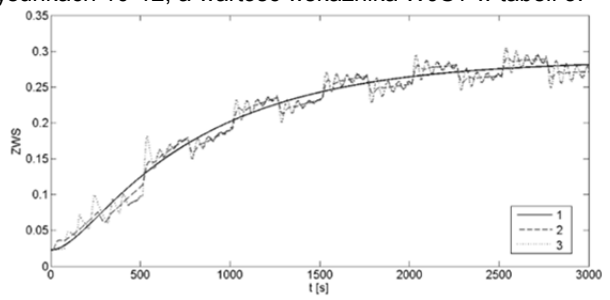
Rys.8. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3%



Rys.9. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności sinusoidalnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

Analizując powyższe wyniki symulacji należy zauważyć, że wartości wskaźnika WJS1 dla obu sygnałów sterujących są zbliżone z nieznacznym wskazaniem na układ z sygnałem PWM. Zastanawiające jest to, że mimo widocznych na wykresach (niewielkich) oscylacji w układzie z sygnałem PWM, wskaźnik ten układ typuje jako lepszy.

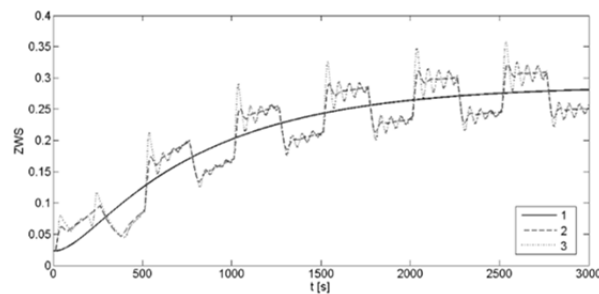
Wyniki symulacji (ZWS) układu sterowania z prostokątnym sygnałem zakłócającym zamieszczono na rysunkach 10-12, a wartość wskaźnika WJS1 w tabeli 3.



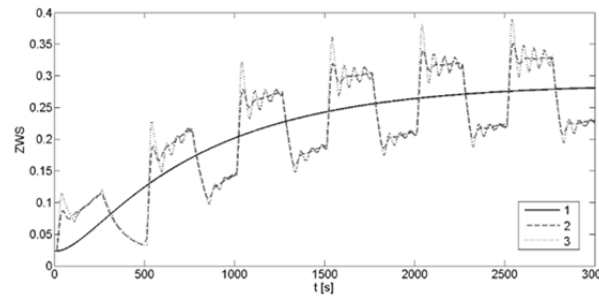
Rys.10. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 1%

Tabela 3. Wartości całkowitych wskaźników jakości sterowania (WJS1) dla prostokątnego sygnału zakłócającego

Syg.ster. Amplituda	Ciągły	PWM
1%	29,10	48,58
3%	69,05	101,40
5%	124,10	151,20



Rys.11. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 3%



Rys.12. Wyniki symulacji dla układu sterowania w obecności prostokątnego sygnału zakłócającego o amplitudzie 5%

Analizując wyniki symulacji należy zauważyć, iż sygnał zakłócający o przebiegu prostokątnym wpływa znacznie silniej na spadek jakości sterowania niż sygnał o przebiegu sinusoidalnym. Ponadto lepszą jakość sterowania zapewnia układ z ciągłym sygnałem sterującym.

Podsumowując wyniki symulacji dla układu sterowania działającego w obecności sygnału zakłócającego o przebiegach, sinusoidalnym i prostokątnym należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem amplitudy sygnału zakłócającego, maleje jakość sterowania.

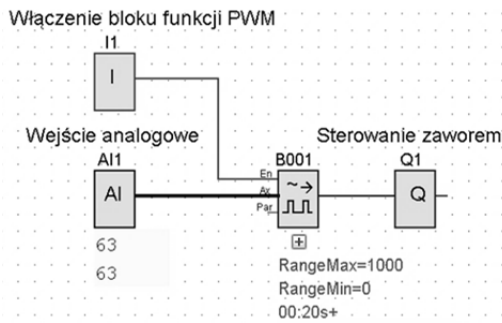
PWM w sterownikach PLC

Funkcję proporcjonalnej regulacji stopnia otwarcia zaworu elektromagnetycznego można uzyskać wykorzystując blok funkcyjnych dostępny w bibliotece sterownika PLC. Sterowanie PWM w sterownikach PLC pozwala sterować w sposób ciągły za pomocą wartości dyskretnych (0, 1). Dzięki temu za pomocą wyjścia cyfrowego można sterować np. stopniem otwarcia zaworu proporcjonalnego. Częstotliwość sygnału PWM jest stała i musi być na tyle wysoka, by element wykonawczy nie oscylował z tą częstotliwością, czyli okres musi być krótszy niż czas bezwładności elementu wykonawczego.

Tranzystor zastosowany w wyjściach cyfrowych sterowników PLC podczas pracy z modulacją PWM albo przewodzi całkowicie (ON-1) albo wcale (OFF-0). Dzięki temu temperatura pracy jest zdecydowanie niższa niż przy częściowym przewodzeniu, jak to ma miejsce w tradycyjnych regulatorach. Taki sposób pracy posiada dwie ważne zalety: dużą sprawność czyli bardzo małe straty energii, oraz urządzenie sterujące może obsłużyć znacznie większe moce bez nadmiernego nagrzewania się lub stosowania dużych radiatorów [6, 7].

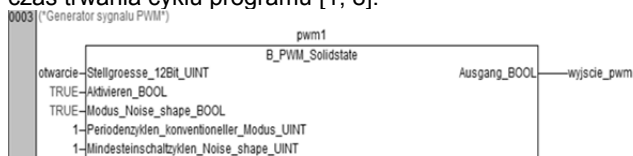
W sterowniku Siemens Logo 8 blok ten poprawnie funkcjonuje tylko przy małych częstotliwościach [1]. Jego parametryzacja i realizacja w programie jest bardzo prosta (rys. 13). Niezbędny jest przycisk uruchamiający blok PWM – jego rolę pełni wejście I1. W prezentowanym bloku B001 ustawiono okres na 20 mS (Period_T), co odpowiada częstotliwości 5 Hz. Do wejścia tego bloku podłączono czujnik analogowy (AI1), sygnał z tego czujnika steruje wartością współczynnika wypełnienia sygnału

wystawianego na wyjście Q1. Analogowy sygnał wejściowy ma zakres 0-10 VDC, co przekładało się na cyfrowy zakres 0-1000 (dla przetwornika analogowo-cyfrowego 10 bitów).



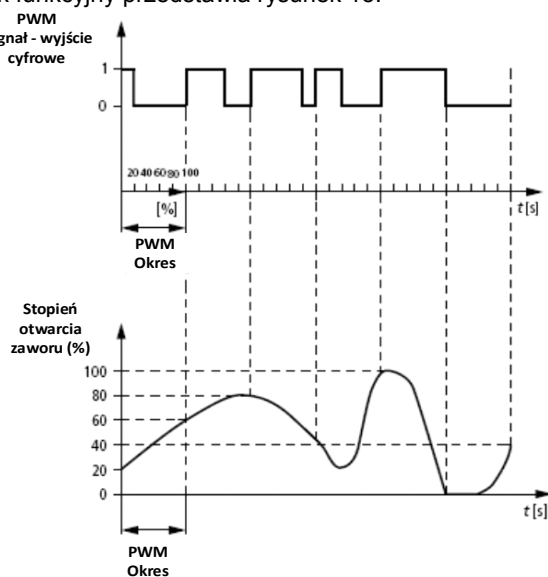
Rys.13. Blok realizacji regulacji PWM w sterowniku Siemens Logo 8

Jedną z najpopularniejszych aplikacji do programowania sterowników PLC jest CoDeSys. Oprogramowanie pozwala na programowanie urządzeń różnych producentów PLC, zgodne z normą IEC 61131-3 [8]. W programie tym sygnał PWM uzyskuje się za pomocą bloku funkcyjnego B_PWM_Solidstate (rys. 14) należącego do biblioteki Closed-Loop Control Toolbox. Niestety zastosowanie tego sygnału w sterownikach wiąże się z pewnymi ograniczeniami. Okres sygnału nie może być krótszy, niż czas trwania cyklu programu [1, 8].



Rys.14. Blok funkcyjny generujący sygnał PWM w programie CoDeSys

W badaniach doświadczalnych ustalono, że maksymalna uzyskiwana częstotliwość przy rozbudowanym programie sterującym (zawierał skomplikowane instrukcje arytmetyczne na zmiennych typu REAL – liczby rzeczywiste) spada do około 160 Hz. Jest to wartość zbyt niska do płynnego sterowania zaworem proporcjonalnym. W przypadku programu zawierającego tylko instrukcje binarne, nie odnotowano problemów z sterowaniem w/w zaworem. Sterowanie PWM realizowane przez powyższy blok funkcyjny przedstawia rysunek 15.



Rys.15. Przebieg sygnału PWM w regulacji proporcjonalnej

Przedstawiona alternatywna metoda regulacji proporcjonalnej realizowanej na zaworach elektromagnetycznych jest godna zainteresowania z uwagi na czynnik ekonomiczny. Dedykowane sterowniki proporcjonalne do zaworów elektromagnetycznych potrafią kosztować tyle co sterownik PLC z modułem funkcyjnym PWM, a ponadto zyskuje się możliwość wykorzystania sterownika do innych zadań polegających na sterowaniu np. pozostałymi maszynami czy urządzeniami linii produkcyjnej. Taki system sterowania będzie kompleksowy. Należy tylko pamiętać o tym, aby nie rozbudowywać nadmiernie programu, ponieważ może dojść do takiej sytuacji, że długość cyklu pracy sterownika będzie większa niż okres w regulatorze PWM. Taki stan spowoduje błędy w funkcjonowaniu regulacji PWM.

Wnioski

Z analizy przeprowadzonych badań symulacyjnych odpowiedzi układu sterowania oraz wartości odpowiednich wskaźników jakości sterowania i jakości sygnałów sterujących wynikają następujące wnioski:

1. Jakość regulacji PWM jest porównywalna z klasycznym regulatorem PID, tylko przy zakłóceniach o charakterze prostokątnym i dużej amplitudzie pojawiła zdecydowana różnica na niekorzyść PWM.
2. W miarę wzrostu amplitudy sygnału zakłócającego rosną wartości poszczególnych wskaźników, przy czym największy wzrost można zaobserwować w przypadku prostokątnego kształtu zakłóceń.
3. Niestety potwierdziła się jedna z wad regulacji PWM o wprowadzaniu dodatkowych zakłóceń, które widoczne były na wykresach jako dodatkowe oscylacje.

Autorzy: dr inż. Marcin Tomasik, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Marcin.Tomasik@urk.edu.pl; dr inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: Stanislaw.Lis@urk.edu.pl; doc. ing. Maroš Korenko, PhD. Slovak University of Agriculture in Nitra Department of Quality and Engineering Technologies Department of Quality and Engineering Technologies, e-mail: korenko@mech.uniaq.sk

LITERATURA

- [1] Bogusz J. Programowanie sterownika Siemens Logo! (1), *Elektronika Praktyczna*, (2011), nr 4, 124-127
- [2] Gąsiorowski A., Posytek Z., Drózd T., Prototypowe stanowisko laboratoryjne do badania topliwości popiołu metodą rurową, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 1, s.144-148
- [3] Gruk W., Habecki S., Piotrowski R., Implementacja niekonwencjonalnych regulatorów PID w sterowniku programowalnym, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 21 (2017), nr 1, 31-39
- [4] Lis S., Tomasik M., Nęcka K., Drożdż T., Nawara P., Wrona P., Oziębłowski M., Konstrukcja i analiza modelu symulacyjnego układu sterowania piecem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 12, 147-150
- [5] Śmierciak P., Ziółkowski E., Wpływ wybranych parametrów zakłóceń na jakość klasycznego i rozmytego sterowania piecem oporowym, *Archives of foundry engineering*, (2014), vol. 14, 123-126
- [6] Tariqa M., Bhattacharyab T.K., Varshneya N., Rajapana D., Fast response Antiwindup PI speed controller of Brushless DC motor drive: Modeling, simulation and implementation on DSP, *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, (2016), nr 1(5), 1-13
- [7] Tomasik M., Lis S., Nęcka K., Oziębłowski M., Kielbasa P., Drózd T., Nawara P., Ostafin M., Sterowanie piecem indukcyjnym do laboratoryjnego spalania biomasy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 12, 173-176
- [8] IEC 61131-3 – PN-EN 61131-3:2013-10. Sterowniki programowalne - Część 3: Języki programowania
- [9] https://uk.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pwmgenerator.html?s_tid=gn_loc_drop