

SYSTEM AUTOMATYCZNEJ REGULACJI PARAMETRÓW EKSPOZYCJI WAGOSUSZARKI MIKROFALOWEJ

Streszczenie

Prawidłowy dobór gęstości mocy mikrofal i czasu ekspozycji decyduje o osiągnięciu zamierzonych parametrów próbki poddawanej procesowi suszenia mikrofalowego. Precyzyjna regulacja mocy mikrofal została osiągnięta dzięki zasilaniu magnetronu za pomocą zasilacza impulsowego o charakterystyce regulowanego źródła prądowego.

Słowa kluczowe: mikrofałe, zasilacz impulsowy, mikrokontroler

Wykaz oznaczeń

P_{max}	– moc maksymalna
U_a	– napięcie anodowe
I_a	– prąd anodowy
I_o	– prąd wyjściowy zasilacza
PWM	– modulacja szerokości impulsu
A/D	– analogowo – cyfrowy
D/A	– cyfrowo – analogowy

Wprowadzenie

Wyznaczanie wilgotności materiałów biologicznych wiąże się z licznymi problemami. Podstawowy problem spowodowany jest faktem, że w istocie swojej materiał taki nie jest tylko sumą suchej masy i wody, lecz jest to mieszanina różnych cieczy i masy suchej których głównym składnikiem jest woda. W związku z powyższym proces suszenia próbki w celu wyznaczenia jej wilgotności musi odbywać się według odpowiednich krzywych suszenia. Zastosowanie mikrofal do procesu suszenia próbek w celu wyznaczenia ich wilgotności umożliwia znaczne skrócenie całej procedury dzięki temu, że możliwe jest ogrzewanie próbki w całej objętości i uniknięciu konwekcyjnego przekazywania ciepła z powierzchni do wewnątrz próbki. Ogrzewanie mikrofalowe pozwala również uniknąć zamykania kapilar, którymi ewakuuje się para wodna z suszonego materiału, co sprzyja przyspieszeniu procesu suszenia i uniknięcia błędów wywołanych zamknięciem resztek wody w materiale. Jednak ogrzewanie

mikrofalowe wiąże się również z dużym ryzykiem uszkodzenia próbki związanym z tym, że cała moc promiennika koncentruje się na niej i łatwo może dojść do sytuacji przegrzania próbki i jej termicznego zniszczenia. Decydującym zatem czynnikiem warunkującym osiągnięcie zamierzonej wilgotności końcowej próbki, w optymalnym czasie, bez jej termicznego i mechanicznego uszkodzenia, podczas suszenia mikrofalowego, jest prawidłowy dobór gęstości mocy promieniowania i czasu ekspozycji.

Problem ten jest rozwiązywany w różny sposób. Najbardziej popularnym jest chwilowe włączenie i wyłączenie magnetronu. Jednak ta metoda powoduje bardzo duże błędy w przypadku małych objętościowo próbek, gdyż nieuniknione jest wtedy lokalne przegrzanie próbki. Innym sposobem jest włączanie kaskadowo w tor falowodowy regulowanego tłumika mikrofalowego. Ze względu na dużą moc wyjściową magnetronu (ok. 1kW), regulacja mocy promieniowania w ten sposób staje się mało użyteczna [Dobrowolski 2001; Galwas 1985].

Względnie duża moc tracona w tłumiku nastręcza problemy natury konstrukcyjnej i skutecznego odprowadzania ciepła [Thomas 1978]. Również inne sposoby stosowane do tłumienia mocy, takie jak: zmienna rezystancja realizowana na bazie diod PIN lub tranzystorów FET, dla takiego zakresu mocy nie może być zrealizowana. Jedynie odpowiednio skonstruowany tłumik, z falowodem pracującym poniżej częstotliwości granicznej lub tłumik z klinem stratnym, jest w stanie pracować z tak dużą mocą. Jednak za pomocą tłumików regulację mocy ustawia się mechanicznie, zmieniając położenie odpowiednich elementów. W praktyce uniemożliwia to automatyczne przeprowadzenie procesu.

Analizując wady i zalety aktualnie stosowanych metod, autorzy doszli do wniosku, że sterowanie mocą wiązki promieniowania mikrofalowego należy przeprowadzić przy ciągłej regulacji mocy wyjściowej magnetronu. W tym celu opracowano specjalny system automatycznego sterowania mocą magnetronu, którego pracę nadzoruje szybki mikroprocesor. Dzięki temu uzyskano możliwość nastawienia w sposób płynny dowolnej mocy wyjściowej w zakresie $0 - P_{max}$.

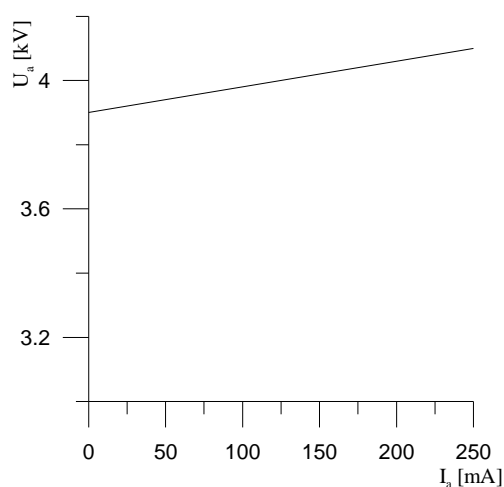
Celem pracy była ocena przydatności systemu płynnej regulacji mocy magnetronu do zmian parametrów ekspozycji promieniowania mikrofalowego. System taki został opracowany przez autorów w Zakładzie Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych Akademii Rolniczej w Lublinie i zainstalowany w wagosuszarce mikrofalowej.

Badania dotyczyły zarówno funkcjonalnej i technicznej oceny pracy systemu, jak i jego przydatności do suszenia materiałów biologicznych. W zakres pracy wchodziło także przebadanie możliwości kształtowania

krzywej suszenia przez badanie zmian masy próbki przez wbudowaną wagę tensometryczną.

Metodyka

Rozwiązanie problemu płynnej regulacji mocy magnetronu jest zadaniem trudnym z powodu specyficznej charakterystyki prądowo-napięciowej tego przyrządu. Szczególną cechą magnetronu jest silna nieliniowość charakterystyki napięciowo prądowej, przypominająca charakterystykę diody Zenera w zakresie przebicia (rys.1). Wykazuje ona gwałtowny wzrost prądu, poczynając od pewnej wartości progowej napięcia (ok. 4 kV). Utrudnia to w sposób zasadniczy regulację mocy, zwłaszcza dla niskich zakresów, gdyż prowadzi to w konsekwencji do „zerwania” pracy magnetronu. Dokonać tego można zmieniając wartość prądu anodowego magnetronu, stosując do jego zasilania regulowane źródło o dużej rezystancji wyjściowej.



Rys. 1 Charakterystyka prądowo napięciowa magnetronu
Fig. 1. Current – voltage characteristics of the magnetron

Jednak realizacja takiego układu zasilania jest trudna ze względu na konieczność regulacji prądu w zakresie setek mA, przy napięciu na poziomie kilku tysięcy voltów. Obecnie w zastosowaniach laboratoryjnych i przemysłowych spotyka się najczęściej dwa rodzaje układów zasilania magnetronu. Pierwszy, najprostszy, składa się z transformatora sieciowego o dużym rozproszeniu lub z szeregowo włączoną impedancją (w celu uzyskania stromo opadającej charakterystyki prądowo napięciowej

zasilacza) i układu prostowniczego wysokiego napięcia (często w układzie podwajacza napięcia) [Hauser 1996]. W układzie tym nie ma możliwości płynnej regulacji prądu zasilającego magnetron. Drugi układ składa się również z transformatora sieciowego oraz sterowanego prostownika wysokiego napięcia, w oparciu o układy szeregowo połączonych tyrystorów.

Obydwa układy mają szereg wad. Zarówno w jednym jak i w drugim duży i ciężki transformator sieciowy uniemożliwia miniaturyzację sprzętu. Ponadto w pierwszym układzie mamy jedynie możliwość regulacji mocy średniej magnetronu przez kluczkowanie napięcia zasilania w obwodzie pierwotnym transformatora. Ponieważ czas włączenia i przerwy są na poziomie kilku do kilkunastu sekund, taki sposób regulacji mocy ma zastosowanie jedynie przy nagrzewaniu próbek o dużej pojemności cieplnej i niewrażliwych na chwilowe przegrzania. Drugi układ pozwala w zadowalający sposób regulować średni prąd anodowy, lecz tak jak w poprzednim przypadku zrealizowany wg tej zasady zasilacz jest duży i ciężki.

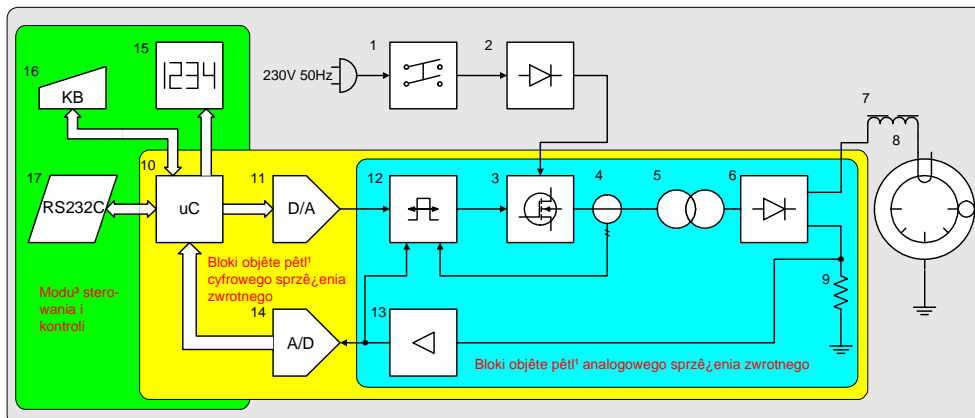
W rozwiązaniu zaproponowanym przez autorów, problem ten rozwiązano przez opracowanie oryginalnego układu zasilającego, który umożliwia płynną regulację mocy magnetronu w zakresie 1-1000W. Zasilacz oparty jest na impulsowej modulacji PWM (Pulse Width Modulation - modulacja mocy przez zmianę szerokości impulsu). Transformator napięcia anodowego kluczkowany jest z częstotliwością 25 kHz, dzięki czemu ma kilkanaście razy mniejszą objętość i masę niż transformator o tej samej mocy w zasilaczach tradycyjnych wymienionych powyżej.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy układu zasilacza magnetronu. Nastawiona wartość prądu anodowego za pomocą przetwornika D/A jest przetwarzana na sygnał analogowy, sterujący pracą modulatora PWM. Natomiast na wyjściu przetwornika A/D pojawia się informacja o wartości prądu anodowego. Jeżeli ta wartość różni się od nastawionej, to mikrokontroler tak steruje sygnałem na wyjściu przetwornika D/A, aby te dwie wartości się zrównały.

Dzięki temu o dokładności nastawionego prądu anodowego decyduje jedynie rozdzielczość i błędy analogowe przetworników D/A i A/D oraz stałość rezystancji bocznika 9 i stałość wzmocnienia wzmacniacza 13. Natomiast nieliniowość i dryfty charakterystyki przejściowej układu modulator – układ kluczkowania – transformator – powielacz napięcia, nie mają wpływu na wartość prądu zasilającego magnetron.

W celu uzyskania charakteru źródła prądowego, objęto układ pętlą prądowego ujemnego sprzężenia zwrotnego. Całość pracy modulatora PWM jest nadzorowana przez mikrokontroler. Układ wyposażony jest

również w przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo analogowe, które wpięte są drugą pętlę cyfrowego sprzężenia zwrotnego. Tak skonstruowany układ nadzoru i sterowania pozwala precyzyjnie regulować moc wyjściową magnetronu i wykorzystywać do jej sterowania komputer, który może nadzorować całość procesu suszenia komunikując się przez interfejs RS232C (rys. 2).



Rys.2 Schemat blokowy układu zasilacza magnetronu: 1. zespół wyłączników bezpieczeństwa, 2. prostownik napięcia sieciowego, 3. zespół kluczy tranzystorowych, 4. przekładnik zabezpieczenia przeciążeniowego, 5. transformator napięcia anodowego, 6. prostownik napięcia anodowego, 7. dławik, 8. magnetron synchroniczny, 9. bocznik układu pomiaru prądu anodowego, 10. mikrokontroler, 11. przetwornik cyfrowo analogowy, 12. modulator szerokości impulsu, 13. wzmacniacz pomiarowy, 14. przetwornik analogowo cyfrowy, 15. wyświetlacz, 16. klawiatura, 17. interfejs RS232C

Fig. 2. Block diagram of magnetron feeder system: 1- set of safety cut-out switches, 2 - power network voltage rectifier, 3 - set of transistors keys, 4 - over-load protection transformer, 5 - anode voltage transformer, 6 - anode voltage rectifier, 7 - reactor, 8 - synchronous magnetron, 9 - shunt of anode current measuring system, 10 - microcontroller, 11 - analog/digital converter, 12 - pulse-duration modulator, 13 - instrumentation amplifier, 14 - analog/digital converter, 15 - display, 16 - keyboard, 17 - RS232C interface

Wyniki badań

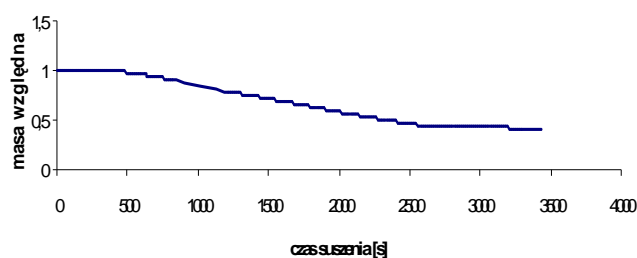
Zadaniem przeprowadzonych badań była ocena poprawności pracy zasilacza i określenie, czy spełnia on oczekiwania. W tym celu zestawiono stanowisko składające się z wykonanego zasilacza, nagrzewnicy mikrofalowej z wbudowaną wagą tensometryczną. Badania laboratoryjne opracowanego systemu, rozpoczęto od zbadania funkcjonowania systemu jako urządzenia przetwarzającego energię elektryczną na energię mikrofal pracującego w układzie automatycznego sterowania i regulacji.

Pierwszą cechą, którą badano w ramach analizy funkcjonowania urządzenia była dokładność regulacji mocy. Aczkolwiek dokładność 12-bitowych przetworników pracujących w pętli cyfrowego sprzężenia zwrotnego umożliwia regulowanie mocy z krokiem co 0.25W, to jednak część analogowa systemu regulacji wprowadza dodatkowy błąd, który został pomierzony w trakcie badań eksperymentalnych i jego wartość wynosiła 1W w całym zakresie. W trakcie pomiarów stwierdzono dodatkowy błąd multiplikatywny na poziomie 2% mocy ustawionej. Błędy analogowe można zmniejszyć stosując oporniki o wysokiej precyzji oraz wysokostabilne wzmacniacze operacyjne. Na obecnym etapie wydaje się to jednak niecelowe, gdyż realnie stosowana moc promieniowania nie spada poniżej kilkudziesięciu watów, co daje błąd względny w zakresie kilku procent.

Kolejną cechą którą zbadano była odporność wykonanego układu na wahanie napięcia sieci. Badania przeprowadzono w zakresie 195-250 V, a więc większym niż dopuszczalne przez normy zmiany napięcia w sieci NN (207-242V). Opracowany system wykazał odporność na zmiany napięcia w wymienionym zakresie, a opracowane systemy cyfrowych sprzężeń zwrotnych wykazały pełną wydolność utrzymania mocy magnetronu na niezmiennym poziomie.

Następny etap badań stanowiło wyznaczenie charakterystyki regulacji w pełnym zakresie. Badania wykazały stabilną pracę układu od mocy 1W do 1000W przy zachowaniu w całym zakresie liniowej charakterystyki regulacji. Przeprowadzono również badanie sprawności energetycznej opracowanego zasilacza, oraz pełnego układu zasilacz-magnetron. Sprawność zasilacza dochodziła do 89%, a układu zasilacz-magnetron do 65%. Aczkolwiek w przypadku przyrządów pomiarowych sprawność nie odgrywa większej roli, to jednak opracowany system jest na tyle uniwersalny, że może być stosowany do innych zadań, np. ekspansji niskociśnieniowej, gdzie sprawność przetwarzania energii jest istotnym czynnikiem oceny pracy systemu.

Następnym etapem badań była ocena pracy systemu podczas suszenia próbek materiału biologicznego. Jako kryterium wyboru zastosowano wrażliwość próbek na błędy suszenia a zwłaszcza niszczenia materiałów przy zbyt intensywnym suszeniu. Test suszenia na opracowanym stanowisku przeprowadzono na mielonym mięsie wieprzowym. Wyniki pomiarów przebiegu suszenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Przebieg suszenia mielonego mięsa wieprzowego mocą 300 W masa początkowa próbki 200 g

Fig. 3. Drying course of minced pork meat at 300 W power, initial sample weight 200 g

Próbki były umieszczane wewnątrz komory grzewczej i nagrzewane promieniowaniem mikrofalowym, którego moc była kontrolowana przez opisany powyżej układ. Próbki w czasie suszenia znajdowały się na precyzyjnej wadze tensometrycznej, która mierzyła ich masę w sposób ciągły. Podczas suszenia ubytek masy próbek był na bieżąco mierzony i zapisywany do pamięci rejestratora w 15-sekundowych odstępach czasu. Następnie dane te transmitowane były do komputera PC, gdzie otrzymane wyniki były opracowywane przez specjalnie opracowany program. Z pomiarów wynika, że system wykrywa niewielkie ubytki masy i jest w stanie przez regulację mocy promiennika dostosować przebieg suszenia do wymaganej krzywej. Na wykresie widać też wyraźnie zakończenie procesu suszenia, po przekroczeniu tego progu dalsze suszenie próbek metodami tradycyjnymi nie wykazywało już ubytków masy.

Wnioski

W przypadku suszenia obiektów biologicznych, prawidłowa jakość suszenia zależy w dużym stopniu od objętościowej gęstości mocy absorbowanej przez obiekt. Zbyt mała gęstość powoduje niepełne odparowanie wody, zaś zbyt duża skutkuje rozkładem i odparowaniem innych składników. Przedstawiony układ pozwala uniknąć tych błędów oceny wilgotności wywołanych nieprawidłowym procesem suszenia. Umożliwia jednocześnie optymalny dobór mocy do badanego obiektu. W wyniku przeprowadzonych badań można uwydatnić następujące zalety automatycznego systemu regulacji parametrów ekspozycji wagosuszarki mikrofalowej.

- Opracowany system wykazał przydatność do zastosowania go w wagosuszarce mikrofalowej. Krzywa suszenia uzyskana w wyniku

zastosowania tego systemu wykazuje wyraźny punkt przegięcia określający koniec suszenia.

- Ważną zaletą opracowanego systemu jest bardzo szeroki zakres regulacji mocy w zakresie 1 – 1000W. W praktyce oznacza to możliwość pracy wagosuszarki z dowolną wielkością próbki.
- Wysoka dokładność regulacji mocy magnetronu wynosząca $\pm 1W$ zabezpiecza przed przegrzaniem nawet bardzo małych próbek.
- Przedstawiony układ zapewnia pełną automatyzację procesu zarówno w aspekcie doboru mocy promiennika, jak i czasu nagrzewania.
- Wysoka odporność systemu na wahania napięcia sieci, większa niż przewidują dopuszczalne normy eliminuje niebezpieczeństwo zakłócenia pomiaru spowodowane zakłóceniami napięcia zasilającego.

Bibliografia

Dobrowolski J. 2001. Technika wielkich częstotliwości. Oficyna Wydawnicza PW – 1 wyd., ss. 170 – 172

Galwas B. 1985. Miernictwo mikrofalowe. WKiŁ – 1 wyd., ss. 87 – 92

Hauser J. 1996. Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii. Zakład Wydawniczy K. Domke – 2 wyd. popr., ss. 334 – 335

Thomas H. E. 1978. Techniki i urządzenia mikrofalowe. WNT – 1 wyd., ss. 143 – 150, 192

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF EXPOSURE PARAMETERS IN A MICROWAVE BALANCE - DRIER

Summary

Correct selection of microwave power density and exposure time decide on achieving intended parameters of the sample subjected to microwave drying process. Precise regulation of the microwave power was achieved owing to magnetron supply by means of the pulse feeder of controlled current generator characteristics.

Key words: microwaves, pulse feeder, microcontroller

Recenzent – Jerzy Weres