

Adaptacyjny algorytm regulacji strumienia powietrza

Mariusz R. Rząsa

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Katedra Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole

Streszczenie: W pracy przedstawiono adaptacyjny algorytm sterowania strumieniem powietrza do zastosowania w bioreaktorze do kompostowania odpadów. Układ steruje strumieniami powietrza dostarczanego do sześciu kanałów bioreaktora. Bioreaktory tego typu charakteryzują się tym, że porowatość wsadu jest bardzo niejednorodna w całej objętości. Ponadto podczas trwania procesu następuje zagęszczanie się wsadu i niejednokrotnie powstają zatory dla przepływu gazu. Algorytm sterowania powinien uwzględniać powstawanie zatorów i podejmować próbę ich udrożnienia. W sytuacjach, w których udrożnienie jest niemożliwe, powinien zapewniać prawidłowy rozkład przepływu powietrza w pozostałych kanałach mimo występowania zatorów. Nadrzędnym celem algorytmu jest zapewnienie równych strumieni przepływu powietrza we wszystkich kanałach bez względu na różnice w oporach przepływu. Ponieważ w bioreaktorach obieg powietrza jest wymuszony za pomocą wentylatorów o stałej wydajności, algorytm powinien w sposób adaptacyjny określić maksymalną średnią wartość strumieni powietrza jaka jest możliwa do uzyskania w danych warunkach i tak dopasować układ regulacji, aby ją osiągnąć. W pracy zaproponowano rozwiązanie umożliwiające spełnienie tych wymagań.

Słowa kluczowe: sterowanie przepływem, złoża porowate, algorytm adaptacyjny kompostowanie odpadów, regulator krokowy

1. Wprowadzenie

Znaczna ilość odpadów w krajach rozwiniętych stanowią odpady organiczne z gospodarstw domowych. Są one bardzo zróżnicowane pod względem rodzaju oraz składu frakcyjnego oraz składu fizyko-chemicznego. Dużą część stanowią odpady biodegradowalne. Chcąc zredukować ilość składowanych odpadów sortuje się je na kilku poziomach za pomocą selektywnej zbiórki odpadów, z których znaczna część jest poddawana recyklingowi. Mimo to odpady biodegradowalne stanowią znaczącą objętość w całości odpadów z gospodarstw domowych. Składowanie tego rodzaju odpadów wymaga posiadania składowisk o znacznych objętościach, z tego względu celowe jest poszukiwanie metod umożliwiających zmniejszenie objętości składowanych odpadów biodegradowalnych.

Kompostowanie odpadów jest metodą mającą na celu rozkład substancji organicznych poprzez zastosowanie procesów

tlenowych. Powoduje to zmniejszenie objętości cząstek biodegradowalnych oraz redukcję zawartości wody, potencjału górotwórczego i aktywności oddechowej odpadów. Kompostowanie odbywa się przy udziale licznych grup mikroorganizmów [1], którym należy zapewnić odpowiednie warunki takie jak ilość tlenu, wilgotność i temperaturę.

Proces kompostowania odbywa się w specjalnie zaprojektowanych bioreaktorach (rys. 1) z kontrolowanym systemem napowietrzania nawilżania i sterowania temperaturą [2]. Bioreaktor składa się z komory, w której dnie znajdują się kanały doprowadzające powietrze. Powietrze to natlenia wsad znajdujący się w komorze. W górnej części komory znajdują się kanały odprowadzające powietrze, które jest zawracane w obiegu zamkniętym. Jednocześnie na bieżąco jest kontrolowana zawartość tlenu w powietrzu obiegowym. Gdy zawartość tlenu maleje poniżej zadanej wartości, następuje częściowa wymiana powietrza. W przypadku nadmiernego wzrostu temperatury uruchamiany jest układ chłodzenia. Podobnie w przypadku obniżenia się wilgotności, wsad jest zraszany wodą.

Aby proces przebiegał prawidłowo w całej objętości bardzo istotne jest utrzymanie równomiernego przepływu powietrza we wszystkich kanałach zasilających umieszczonych w dnie komory. Ponieważ porowatość wsadu umieszczonego w komorze nie jest jednorodna co wymaga sterowania strumieniem powietrza dostarczanego do poszczególnych kanałów. Ponadto podczas trwania procesu następuje sukcesywne zagęszczanie wsadu. Powoduje to, że nie jest możliwe utrzymanie przepływu powietrza na stałym poziomie, lecz algorytm regulacji musi określić maksymalną średnią wartość strumieni powie-

Autor korespondujący:

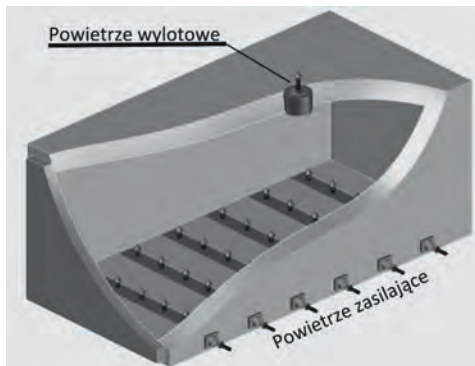
Mariusz R. Rząsa m.rzas@po.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 19.06.2022 r., przyjęty do druku 09.03.2023 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



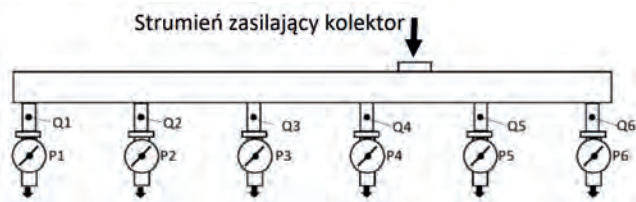
Rys. 1. Bioreaktor do kompostowania odpadów
Fig. 1. Waste composting bioreactor

trza, jaka jest możliwa do uzyskania w danych warunkach i tak dopasować układ regulacji, aby ją osiągnąć.

Wydażność wentylatora wymuszającego cyrkulację powietrza w bioreaktorze jest stała, zatem w celu zapewnienia równomiernego strumienia przepływu gazu we wszystkich kanałach doprowadzających powietrze, konieczne jest uwzględnienie zróżnicowanych oporów przepływu oraz możliwość powstania miejscowych zatorów. W przypadku wykrycia zatorów układ regulacji powinien podjąć próbę udroźnienia takiego zatoru, a gdy okaże się to nieskuteczne to pominąć ten kanał w procesie wyznaczania maksymalnej średniej wartości strumienia powietrza, jaka jest do uzyskania w danych warunkach dla drożnych kanałów. Aby spełnić powyższe założenia opracowano adaptacyjny algorytm sterowania [3]. Zaproponowany algorytm, który opisano w tej pracy.

2. Obiekt regulacji

Kluczowym elementem mającym wpływ na równomierne napowietrzenie wsadu bioreaktora jest kolektor rozdzielczy doprowadzający powietrze do kanałów w dnie bioreaktora (rys. 2). W modelowym rozwiązaniu założono, że bioreaktor jest zasilany powietrzem za pomocą sześciu kanałów. Liczba kanałów jest uzależniona od konstrukcji komory bioreaktora, zwykle wynosi od 4 do 8. Przyjęta liczba kanałów jest wartością często stosowaną w praktyce [4]. Każdy z kanałów wyposażono w niezależną przepustnicę sterowaną siłownikiem elektrycznym P_1-P_6 . Przed przepustnicą zamontowano kalorymetryczny czujniki przepływu gazu Q_1-Q_6 , które służą do pomiaru wartości mierzonego strumienia w poszczególnych kanałach.



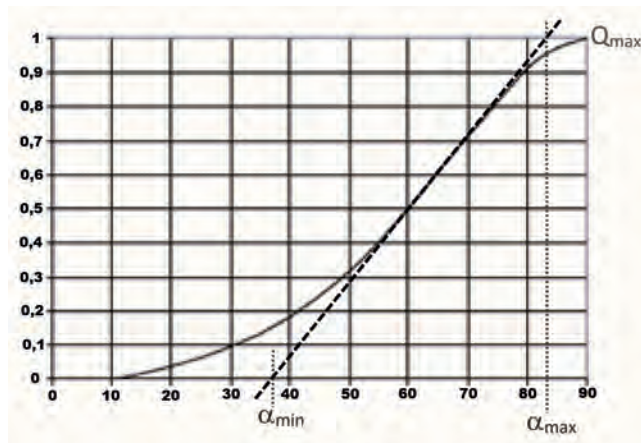
Rys. 2. Kolektor rozdzielający strumień powietrza
Fig. 2. Collector separating the air stream

Przepustnice są sterowane za pomocą siłownika obrotowego o kącie obrotu 0–90°. Sterowanie siłownikiem odbywa się za pomocą sygnału elektrycznego umożliwiającego zamykanie/otwieranie lub zatrzymanie w obecnej pozycji. Kąt obrotu siłownika jest opisany liniową funkcją czasu:

$$\alpha = \frac{90^\circ}{T_m} \cdot t \cdot \mathbf{1}(t) \tag{1}$$

gdzie: T_m – czas potrzebny do obrotu siłownika o 90°.

Strumień powietrza jest zależny od kąta obrotu przepustnicy. Charakterystyka przepływu typowej przepustnicy jest nieliniowa (rys. 3) [5]. Stosunek Q/Q_m oznacza proporcje aktualnego strumienia, jaki przepływa przez przepustnicę do maksymalnego strumienia, jaki jest możliwy do uzyskania. Na potrzeby układu regulacji po uwzględnieniu zależności (1), układ przepustnica wraz z siłownikiem może być opisany funkcją czasu dla obiektu inercyjnego wyższego rzędu.



Rys. 3. Charakterystyka przepływu przepustnicy
Fig. 3. Characteristics of the throttle flow

Siłownik obrotowy stanowi obiekt całkujący, dla którego kąt obrotu opisuje liniowa funkcja zależna od czasu i prędkości obrotowej siłownika ω .

$$\alpha = \omega t \tag{2}$$

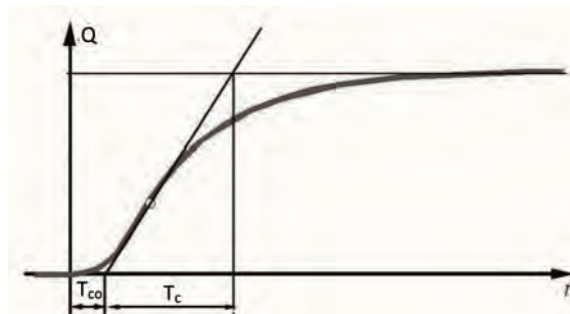
Odczytując zmiany wartości kąta α , jaki odpowiada α_{\min} i α_{\max} oraz uwzględniając zależność (2) określa się wartości czasu inercji T_i i opóźnienia T_o .

$$T_o = \frac{\omega}{\alpha_{\min}} \tag{3}$$

$$T_i = \frac{\omega}{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} \tag{4}$$

Kalorymetryczne czujniki przepływu powietrza również wprowadzają inercję i opóźnienie do układu regulacji. Poszczególne czasy oznaczono symbolami T_{co} i T_c .

Każda przepustnica pracuje w układzie zamkniętym z regulatorem krokowym i odpowiednim czujnikiem przepływu. Na podstawie wartości czasów opóźnień oraz czasów inercji przepustnicy z siłownikiem oraz czujnika przepływu określa się czas pojedynczego kroku dla regulatora krokowego. Połączenie czujnika przepływu i przepustnicy w przybliżeniu można traktować



Rys. 4. Charakterystyka dynamiczna kalorymetrycznego czujnika przepływu
Fig. 4. Dynamic characteristics of the calorimetric flow sensor

jako połączenie szeregowo dwóch obiektów inercyjnych z opóźnieniem o transmitancjach opisanych funkcjami:

$$G_p(s) = \frac{k_p}{1 + sT_i} e^{-sT_o} \quad (5)$$

$$G_c(s) = \frac{k_c}{1 + sT_c} e^{-sT_{co}} \quad (6)$$

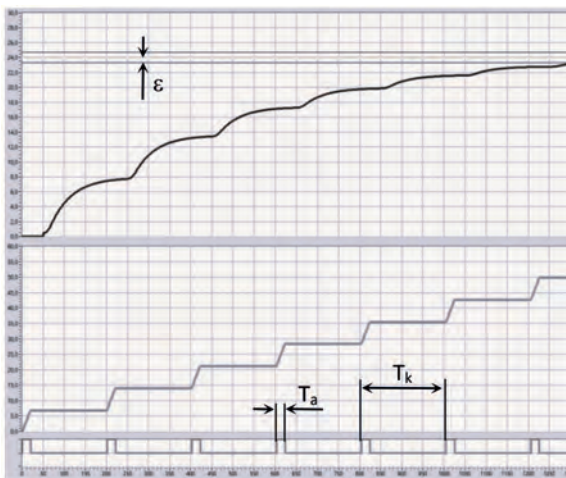
gdzie: $G_p(s)$ – transmitancja przepustnicy, $G_c(s)$ – transmitancja czujnika przepływu.

Operatorowa funkcja przejścia dla obiektu regulacji po uwzględnieniu równań (5) i (6) przyjmuje postać:

$$G(s) = G_p(s) \cdot G_c(s) = \frac{k_p}{1 + sT_i} \frac{k_c}{1 + sT_c} e^{-s(T_o + T_{co})} \quad (7)$$

Funkcja przejścia stanowi podstawę do określenia parametrów regulatora krokowego zastosowanego w każdym z kanałów dostarczających powietrze do bioreaktora [6]. Minimalny czas pojedynczego kroku regulacji T_k (rys. 5), powinien być większy od sumy czasów inercji i opóźnienia.

$$T_k > T_i + T_c + T_o + T_{co} \quad (8)$$



Rys. 5. Charakterystyka regulacji
Fig. 5. Regulation characteristics

Czas działania przepustnicy T_a powinien być krótszy od czasu opóźnienia przepustnicy T_{co} jednak ma on bezpośredni wpływ na wartość odchyłki regulacji ε . Odchyłka ta zależy od prędkości obrotowej silownika ω oraz maksymalnego strumienia powietrza, jaki jest możliwy do uzyskania w danych warunkach. Zatem czas działania przepustnicy należy dobrać w taki sposób, aby uzyskać zadaną odchyłkę regulacji ε .

$$\varepsilon = \frac{Q_{\max}}{(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})} T_a \quad (9)$$

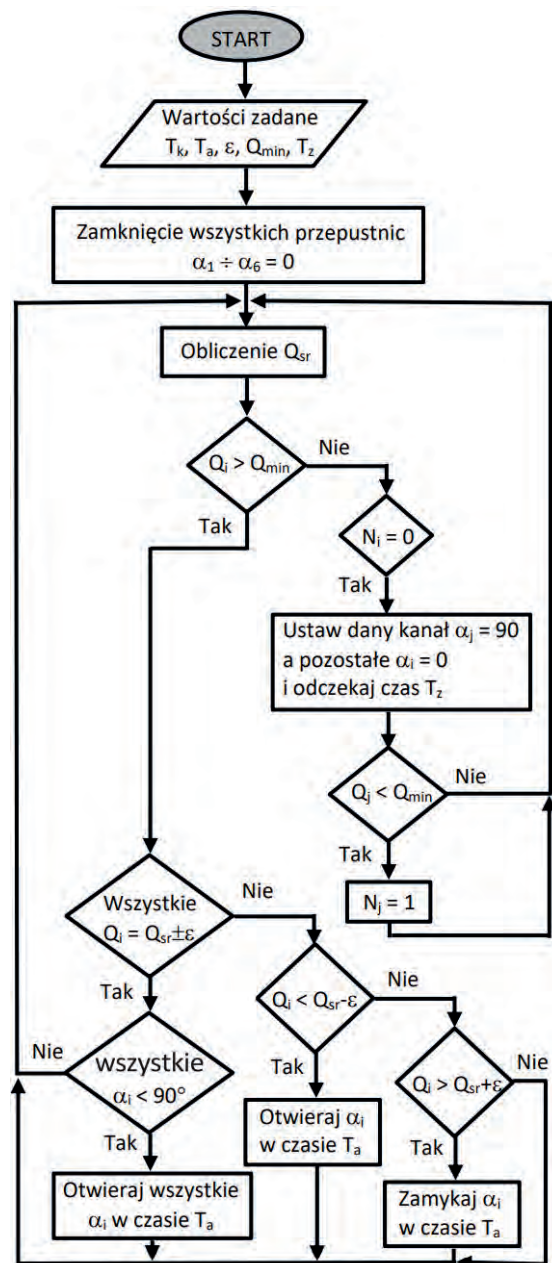
3. Adaptacyjny algorytm regulacji

Adaptacyjny algorytm przedstawiono na rysunku 6. Proces regulacji po uruchomieniu bioreaktora rozpoczyna się od ustawienia wszystkich przepustnic na całkowicie zamknięte. Następnie algorytm wylicza średnią wartość strumienia powie-

trza na podstawie wskazań z czujników przepływu. Wartość ta stanowi podstawę do podjęcia jakichkolwiek działań związanych z regulacją strumienia powietrza. Celem regulatora adaptacyjnego jest takie ustawienie przepustnic, aby uzyskać równomierny przepływ powietrza we wszystkich kanałach przy maksymalnej możliwej wartości średniej strumienia Q_{sr} .

$$Q_{sr} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 Q_i \quad (10)$$

Regulacja nastaw przepustnic odbywa się dla wszystkich kanałów ze stałym zadaniem krokiem czasowym T_k i zadaniem czasem działania przepustnic T_a . Jeśli dla któregoś z kanałów wartość strumienia powietrza jest różna od średniej Q_{sr} , to włącza się sygnał otwierania lub zamykania tych kanałów, w których odchyłka jest większa od wartości średniej. Gdy we wszystkich kanałach wartość strumienia mieści się w granicach odchyłki regulacji i żadna z przepustnic nie jest maksymalnie otwarta, regulator adaptacyjny w kolejnym kroku rozpoczyna się otwieranie wszystkich przepustnic celem zwiększenia średniego strumienia przepływu powietrza we wszystkich kanałach. W ten sposób dąży do uzyskania maksymalnej wartości średniej strumienia we wszystkich kanałach.



Rys. 6. Adaptacyjny algorytm regulacji
Fig. 6. Adaptive control algorithm

W sytuacji, gdy w którymś z kanałów powstaje zator i wartość strumienia powietrza jest poniżej zadanego minimum algorytm podejmuje próbę udrożnienia kanału. Polega to na całkowitym zamknięciu wszystkich pozostałych kanałów i odczekania zadanego czasu T_z . Gdy po czasie T_z w dalszym ciągu nie nastąpił wzrost strumienia powietrza w wybranym kanale powyżej Q_{min} pozostaje on całkowicie otwarty oraz oznaczony jako niedrożny $N_i = 1$. Wprowadzenie tabeli niedrożnych kanałów N ma na celu wyłączenie niedrożnych kanałów z dalszego procesu sterowania, aż do czasu jego udrożnienia. Ustawienie wartości $N_i = 1$ powoduje, że odczyt strumienia powietrza z tego kanału jest pomijany w obliczaniu kolejnych średnich wartości strumienia powietrza Q_{sr} . Jeśli po pewnym czasie nastąpi udrożnienie kanału ponownie jest on włączony do układu regulacji.

4. Podsumowanie

Przedstawiony algorytm został zaimplementowany w bioreaktorze do kompostowania odpadów i w zakresie 5 % odchyłki regulacji strumienia powietrza umożliwiał utrzymanie równomiernego przepływu w sześciokanałowej instalacji przez

cały czas trwania procesu kompostowania, który wynosił do 400 godzin. Czas stabilizowania się strumieni powietrza wynosił około 1 godziny, co w przypadku tak długich procesów jest czasem zadowalającym.

Bibliografia

1. Manczarski P., *Kompostowanie odpadów komunalnych*, Referat na Forum Technologii Ochrony Środowiska, POLEKO 2007, Poznań, 21.11.2007.
2. Anders D., Rząsa M.R., *The possibility of composting animal waste products*, "Environment Protection Engineering", Vol. 33. No. 2, 2007, 7–15.
3. Dębowski A., *Automatyka. Podstawy Teorii*; PWN, Warszawa 2012.
4. Bidlingmaier W., *Biological Waste Treatment Unit 5 Composting Techniques*; A manuscript for students, Weimar 2016.
5. Łudzień R., Wnęk M., Gil S., *Problemy pomiarowe charakterystyki przepływowej przepustnicy motylkowe*; „Instal”, Nr 9, 2022, 33–36, DOI: 10.36119/15.2022.9.3.
6. Dębowski A., *Automatyka. Technika regulacji*; PWN, Warszawa 2022.

Adaptive Air Stream Control Algorithm

Abstract: The paper presents an adaptive air stream control algorithm for use in a bioreactor for waste composting. The system controls the streams of air supplied to the six ducts of the bioreactor. Bioreactors of this type are characterized by the fact that the porosity of the charge is very heterogeneous throughout the volume. In addition, during the process, the charge is compacted and blockages for the gas flow often occur. The control algorithm should take into account the formation of blockages and attempt to clear them. In situations where unblocking is impossible, it should ensure proper distribution of air flow in other ducts despite the presence of blockages. The overriding goal of this algorithm is to ensure equal air flow streams in all channels, regardless of differences in flow resistance. Since the air circulation in bioreactors is forced by fans with constant capacity, the algorithm should adaptively determine the maximum average value of air streams that is possible to obtain under given conditions and adjust the control system to achieve it. The paper proposes a solution to meet these requirements.

Keywords: sewage flow control porous bed, adaptive algorithm, waste composting, step controller

dr hab. inż. Mariusz R. Rząsa, prof. PO

m.rzasa@po.edu.pl

ORCID: 0000-0002-3461-2131



Jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Opolskiej o specjalności Automatyka i Metrologia Elektryczna. Po studiach pracował w Katedrze Techniki Ciepłej i Aparatury Przemysłowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej, gdzie uzyskał stopień doktora nauk technicznych. Stopień doktora habilitowanego uzyskał na Politechnice Częstochowskiej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki. Obecnie pracuje na stanowisku profesora uczelnianego Politechniki Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Zajmuje się komputerowymi metodami pomiarowymi i diagnostyką komputerową. Współpracuje z wieloma zakładami przemysłowymi i jest autorem szeregu prac naukowych.