



mgr inż. Michał Awtoniuk

Modelowanie procesu klimatyzacji w technologii produkcji pieczarek

*Promotor:
prof. dr hab. inż. Andrzej Chochowski*

ROZPRAWA DOKTORSKA

Podziękowania

Realizując pracę doktorską spotkałem wielu niezwykle życzliwych ludzi. Nie sposób jest wymienić wszystkich, nie pomijając przy tym ani jednej osoby.

Do rozpoczęcia badań nad mikroklimatem pieczarkarni zainspirował mnie Pan Wojciech Szkolnikowski, reprezentujący firmę LAB-EL. Dziękuję za gotowość do dzielenia się informacjami całemu zespołowi firmy, z Panem Andrzejem Łobzowskim na czele.

Chciałbym także podziękować właścicielom pieczarkarni, Panu Krzysztofowi Szewczukowi, Panu Cezaremu Szewczukowi oraz Panu Zbigniewowi Marczakowi, z którymi współpraca była czystą przyjemnością. Dziękuję za otwartość i udostępnienie mi swoich obiektów do celów naukowych.

Niezwykle pomocne w dogłębnym zrozumieniu całego procesu produkcji pieczarek były konsultacje z głównymi technologami prowadzącymi uprawę. Z tego powodu słowa uznania, ze względu na posiadaną praktyczną wiedzę, oraz podziękowania za poświęcony czas kieruję do Panów Pawła Gmitruka oraz Leszka Kowalczyka.

W końcowym etapie przygotowania rozprawy ważnych konsultacji udzielili mi również Panowie prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski oraz prof. dr hab. inż. Stanisław Płaska. Za tę możliwość Panom Profesorom jestem bardzo wdzięczny. Dzięki wielu celnym i krytycznym uwagom udało mi się spojrzeć na wiele aspektów z innej perspektywy, a to z pewnością podwyższyło wypadkową jakość mojej pracy.

Podziękować także chciałbym dr. hab. inż. Robertowi Sałatowi za wprowadzenie w fascynujący świat nauki oraz przekazanie tajników warsztatu pracy badawczej.

Najszersze wyrazy szacunku oraz słowa podziękowania kieruję do mojego Promotora, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Chochowskiego. Wśród wielu powodów do wdzięczności chciałbym wymienić przede wszystkim umożliwienie i pomoc przy realizacji ambitnego celu - przygotowania rozprawy doktorskiej z dziedziny nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria produkcji.

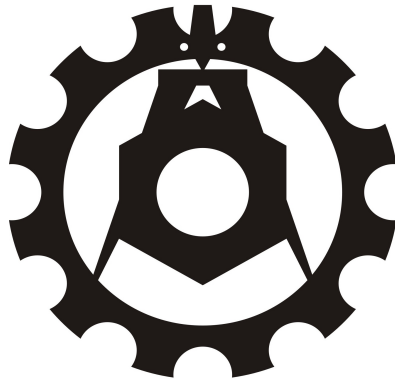
Mówi się, że doktorat to długoterminowa inwestycja czasu i pieniędzy. W moim przypadku sponsorem tej inwestycji była rodzina. Najbliższym mi osobom dziękuję za wsparcie i poświęcenie. Moją rozprawę doktorską pragnę zadedykować wspaniałej żonie Annie i cudownym synom, Maksymowi i Mikołajowi.

Michał Awtoniuk

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

ROZPRAWA DOKTORSKA



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 Lublin

mgr inż. Michał Awtoniuk

Modelowanie procesu klimatyzacji w technologii produkcji pieczarek

Promotor:
prof. dr hab. inż. Andrzej Chochowski



Politechnika Lubelska
Lublin 2016

Recenzenci:

dr hab. inż. Ewa Wachowicz, prof. nadzw. PK

Politechnika Koszalińska

Wydział Mechaniczny

prof. n. techn. i n. ekon. dr hab. inż. Joanicjusz Nazarko

Politechnika Białostocka

Wydział Zarządzania

prof. dr Vitalii Lysenko

*National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Education and Research Institute of Energetics, Automation and Energy Efficiency*

Spis treści

Streszczenie	7
1. Przegląd literatury	9
1.1. Systemy klimatyzacji w produkcji biologicznej	9
1.1.1. Podsystem środowiska wewnętrznego.....	9
1.1.2. Podsystemy przygotowania i transportu powietrza.....	13
1.1.3. Podsystem sterowania.....	15
1.2. Pieczarkarstwo – opis sektora.....	20
1.3. Technologia uprawy pieczarek	23
1.3.1. Organizacja produkcji pieczarek.....	23
1.3.2. Charakterystyka cyklu produkcyjnego.....	26
1.3.3. Znaczenie mikroklimatu w produkcji	34
1.4. Modelowanie mikroklimatu.....	37
1.5. Podsumowanie przeglądu literatury.....	42
2. Problem naukowy, cel i zakres pracy.....	44
3. Badania własne	46
3.1. Charakterystyka obiektów badań.....	46
3.2. Metodyka badań.....	50
3.3. Analiza modelu mikroklimatu pieczarkarni.....	59
3.3.1. Model dla temperatury podłoża	59
3.3.2. Model dla temperatury powietrza	66
3.3.3. Model dla wilgotności względnej powietrza.....	74
3.3.4. Model dla stężenia dwutlenku węgla w powietrzu	81
3.4. Dyskusja wyników.....	86
4. Podsumowanie badań własnych.....	96
5. Załącznik.....	99
6. Bibliografia	134
7. Wykaz tabel	140
8. Wykaz rysunków	143

Streszczenie

Proces produkcji pieczarek odbywa się w zamkniętych halach z kontrolowanym mikroklimatem. Uprawa ma cykliczny charakter i składa się z kilku następujących po sobie fazach. Dla każdej fazy produkcji stawiane są inne wymagania mikroklimatyczne. Z tego względu proces kształtowania środowiska wewnętrznego musi podlegać regulacji. W procesie projektowania układów automatycznej regulacji kluczowy jest dobór algorytmu oraz struktury układu regulacji. Wyboru zarówno algorytmu jak i struktury układu należy dokonać ze względu na właściwości regulowanego obiektu. W technologii produkcji pieczarek obiektem regulacji jest mikroklimat hali uprawowej i to jego właściwości powinny determinować cały proces projektowania układu automatycznej regulacji. Opracowanie modelu opisującego właściwości mikroklimatu hali jako obiektu regulacji jest głównym celem pracy.

Zakres pracy obejmował analizę danych pomiarowych systemu klimatyzacji opisujących mikroklimat z kilku różnych pieczarkarni. Kluczowymi parametrami mikroklimatu są: temperatura powietrza, temperatura podłoża, wilgotność względna powietrza oraz stężenie dwutlenku węgla. Wielkości te są silnie współzależne. Modelowanie wykonano z wykorzystaniem identyfikacji parametrycznej. Zaproponowano model parametryczny dynamiki mikroklimatu o strukturze ARX typu MIMO (o wielu sygnałach wejściowych i wyjściowych). Następnie przekształcono go do postaci macierzy ciągłych transmitancji operatorowych. Każdą z transmitancji macierzy zredukowano do członu oscylacyjnego II rzędu. Jednym z celów cząstkowych jest określenie zależności między parametrami charakterystycznymi uprawy (kubatura hali i powierzchnia uprawy) a współczynnikami odpowiadającymi za dynamikę modelu (wzmocnienie, stała czasowa oraz współczynnik tłumienia). W realizacji tego celu wykorzystano regresję liniową, której współczynniki obliczono w oparciu o M-estymator (funkcję Hubera).

Uzyskane wyniki pozwoliły na potwierdzenie hipotezy o niestacjonarności obiektu regulacji – mikroklimatu hali produkcyjnej. Efekt pracy, czyli parametryczny model środowiska wewnętrznego pieczarkarni, ma potencjał aplikacyjny. Może stanowić element predykcyjnych układów regulacji. Dzięki nieskomplikowanej obliczeniowo strukturze jego implementacja w przemysłowych urządzeniach mikroprocesorowych będzie prostsza niż modelu fizykalnego.

Abstract

Mushrooms are produced in a growing room with a heating, ventilation and air conditioning system. Cultivation is cyclical and consists of several successive phases. Every production phase has different environmental requirements. This is the reason why automatic control system of microclimate condition must be employed. Process of designing automatic control systems is generally divided into two major stages: the selection of algorithm and control structure. The selection of both the algorithm and the control structure has to correspond to static and dynamic properties of controlled object. In mushrooms production, the microclimate of a growing room is a control object. The main goal of this dissertation is to model the dynamic behavior of microclimate of a mushroom growing room.

The scope of work included analysis of measurement data describing microclimate conditioning system. The data came from several different mushroom growing houses. There are four key microclimate parameters: air temperature, substrate temperature, air relative humidity and carbon dioxide concentration. These values are strongly interdependent. Modeling was performed using a parametric identification. A multiple-input multiple-output (MIMO) ARX model was proposed. Then, model was converted into a matrix of continuous transfer functions. Each transfer function was reduced to the second-order oscillatory system. One of the partial objective is to determine the relationship between cultivation characteristic parameters (i.e. cubic volume of growing room and surface of growing area) and the model coefficients (i.e. static gain, time constant and damping factor). This relation was described by linear regression. Coefficients of regression function were calculated by means of the M-estimator (Huber function).

The results confirm the hypothesis of non-stationary characteristic of the microclimate of growing room. The effect of the work, which is a parametric model of the internal environment mushroom growing house, has application potential. It may be an element of predictive control systems. The implementation in industrial microprocessor devices will be easier than the physical model because of simple and uncomplicated computational structure.

1. Przegląd literatury

1.1. Systemy klimatyzacji w produkcji biologicznej

Klimatyzacja jest definiowana jako proces uzdatniania powietrza polegający na utrzymywaniu na odpowiednim poziomie warunków klimatycznych [59]. Przez warunki klimatyczne najczęściej rozumie się odpowiedni zakres temperatury i wilgotności powietrza, jego wymiany i czystości [55]. Można wyróżnić dwa główne cele stosowania klimatyzacji, są to:

- zapewnienie dogodnych warunków do pracy i funkcjonowania człowieka (tzw. warunki komfortu),
- zapewnienie optymalnych warunków dla określonego procesu produkcyjnego (tzw. klimatyzacja technologiczna).

O ile temperatura i wilgotność powietrza jest najistotniejsza z punktu widzenia pomieszczeń przeznaczonych dla ludzi, o tyle pomieszczenia produkcyjne wymagają rozszerzenia podanej definicji i objęcia nią innych parametrów klimatycznych. Dobrymi przykładami są przemysł farmaceutyczny lub przetwórstwo i przechowywanie produktów rolno-spożywczych, gdzie produkcja często odbywa się w kontrolowanej atmosferze. Jednak niezależnie od zastosowania układ klimatyzacji powinien być traktowany jako system dynamiczny [98]. Zgodnie z definicją, system to zbiór wyodrębnionych z otoczenia elementów wraz z ich wzajemnymi oddziaływaniami [30]. Każdy system zbudowany jest z podsystemów [26]. W przypadku systemu klimatyzacji możemy wyróżnić podsystemy:

- przygotowania powietrza,
- transportu powietrza,
- sterowania,
- środowiska wewnętrznego.

1.1.1. Podsystem środowiska wewnętrznego

Tym co różni systemy klimatyzacji w wyraźny sposób jest podsystem środowiska wewnętrznego. O ile w każdym systemie występują podobne urządzenia odpowiedzialne za sterowanie, modyfikowanie parametrów powietrza lub jego transport, o tyle opis w jaki sposób zmieniają się i wzajemnie oddziałują poszczególne parametry mikroklimatu będzie właściwy tylko dla konkretnego typu pomieszczenia. Inne zależności będzie można wyszczególnić w serwerowni, inne w biurze, kinie, teatrze, na basenie, hali sportowej, szklarni czy w pieczarkarni.

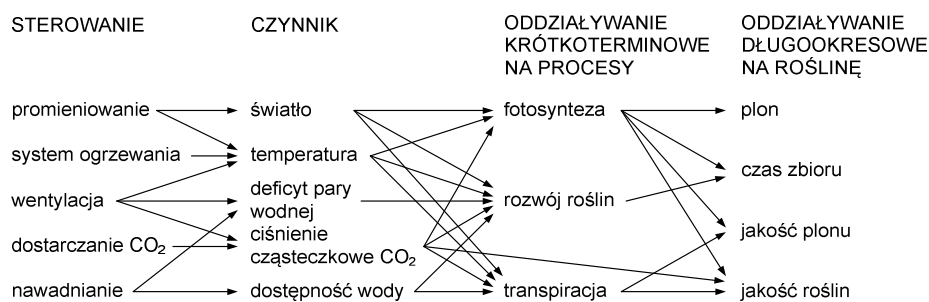
Produkcja to przekształcanie zasobów w dobra oraz rezultat tego procesu. Ekonomisci dzielą zasoby na trzy główne kategorie: kapitałowe, naturalne

i ludzkie. W przypadku produkcji biologicznej to właśnie zasoby naturalne stanowią o sukcesie przedsięwzięcia. Kapitał oraz zasoby ludzkie można w relatywnie prosty sposób sprowadzić do miejsca, w którym planuje się uruchomienie produkcji. Jednak wytworzenie warunków imitujących te naturalne już takie proste nie jest. Najpopularniejszym przykładem prowadzenia produkcji w sztucznie wykreowanym środowisku jest produkcja roślin w szklarniach.

Kontrolowanie warunków uprawy roślin nie jest osiągnięciem współczesnej myśli technicznej. Już w czasach starożytnych stosowano środki mające na celu zabezpieczenie uprawy przed zimą, wiatrem lub zbyt intensywnym promieniowaniem słonecznym. W rezultacie uzyskiwano sztuczny mikroklimat, w którym rozwijały się rośliny. Umiejętność zapewnienia roślinom optymalnych warunków do wzrostu i rozwoju zyskała szczególnie na znaczeniu w okresie wielkich odkryć geograficznych. Odkrycia nowych krajów, kultur ale przede wszystkim nowych gatunków roślin oraz chęć uprawiania ich w nienaturalnych miejscach występowania były silnymi bodźcami stymulującymi rozwój upraw pod osłonami. Rozwój tej branży trwa nieprzerwanie do czasów współczesnych. Obecnie prace badawcze dotyczą sterowania podstawowymi czynnikami wzrostu roślin [91]. Wśród nich można wymienić:

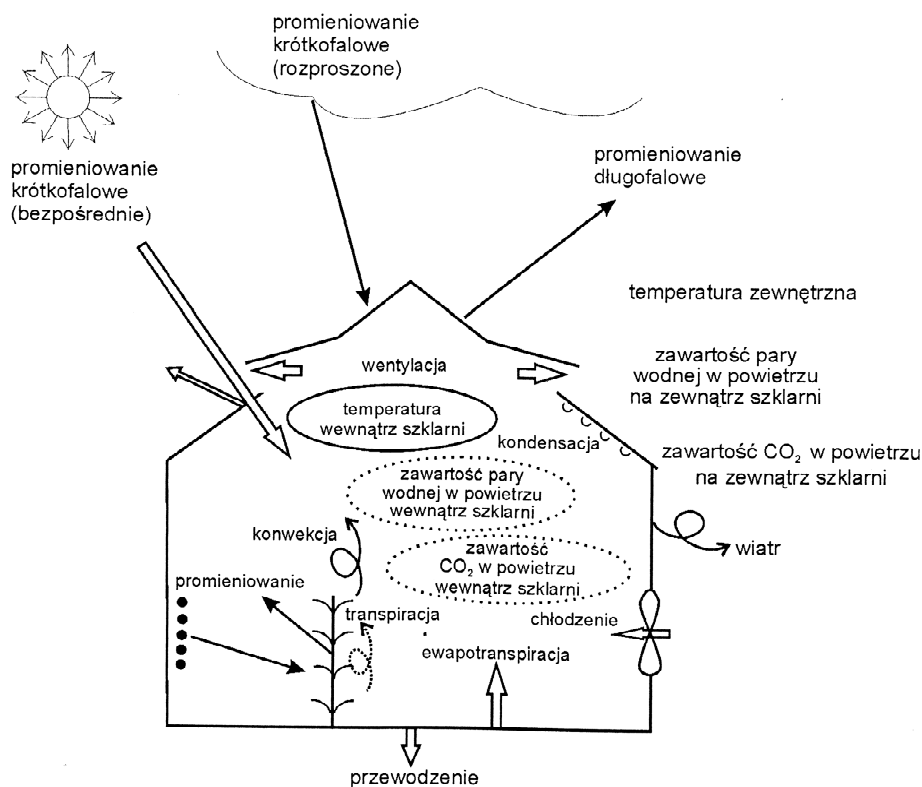
- promieniowanie słoneczne,
- zawartość CO₂,
- temperatura powietrza i gleby,
- ciśnienie pary wodnej w powietrzu.

Wymienione czynniki są nazywane czynnikami plonotwórczymi. Są one połączone wzajemnymi relacjami, wpływają także na jakość i wielkość plonu (rys. 1.1) [40].



Rys. 1.1 Współoddziaływanie pomiędzy czynnikami plonotwórczymi [40]

Złożoność procesów zachodzących wewnątrz szklarni jest spowodowana zarówno przez procesy rozwojowe roślin jak również oddziaływanie środowiska zewnętrznego (rys. 1.2). Mowa tutaj o wielu zjawiskach termodynamicznych jak przewodzenie, adwekcja, konwekcja, przenikanie, wymiana masy oraz promieniowanie



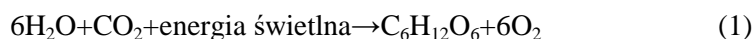
Rys. 1.2 Procesy zachodzące w szklarni [40]

Szczególnym przypadkiem uprawy w kontrolowanych warunkach mikroklimatycznych jest produkcja pieczarek. Dawniej uprawa miała charakter wyłącznie sezonowy. Cały proces był silnie zależny od aktualnych warunków atmosferycznych oraz pory roku. Obecnie produkcja odbywa się przez cały rok. Produkcja towarowa wymaga wyposażenia każdej z hal produkcyjnych w osobny system klimatyzacji. Dzięki temu można zapewnić różny mikroklimat w poszczególnych halach. Przez przesunięcia faz uprawy w halach możliwe jest harmonogramowanie procesu produkcji. W przypadku największych pieczarkarni poważnym problemem ze względu na dostępność siły roboczej na lokalnym rynku pracy jest nakładanie się okresów zbiorów z kilku hal. Pokazuje to jak ważnym narzędziem dla technologa prowadzącego uprawę jest regulacja mikroklimatu.

Istotnymi parametrami środowiska wewnętrznego w produkcji pieczarek są:

- temperatura powietrza,
- temperatura podłoża,
- wilgotność względna powietrza,
- stężenie dwutlenku węgla w powietrzu.

Różnice między pieczarkarniami a szklarniami dotyczą głównie budowy oraz wyposażenia obiektu. Przyczyną tych różnic jest odmienna bioenergetyka roślin. Rośliny autotroficzne zawierają chlorofil, dzięki któremu wytwarzają związki organiczne z dwutlenku węgla i wody przy współudziale energii świetlnej. Jest to proces fotosyntezy (1):



Otrzymane w ten sposób węglowodany są paliwem w reakcji spalania. Nazywamy ten proces oddychaniem komórkowym lub utlenianiem glukozy (2). Celem procesu jest zamiana energii chemicznej zawartej w glukozie na energię biologicznie użyteczną, skoncentrowaną w postaci wysokoenergetycznego związku ATP.



Grzyby, jako organizmy heterotroficzne, nie tworzą samodzielnie węglowodanów ze związków nieorganicznych. Aby móc się rozwijać muszą w swoim otoczeniu znaleźć dla siebie ich źródło zewnętrzne. Pieczarka należy do grupy saprofitów, a to oznacza, że źródłem jej pożywienia są martwe szczątki organiczne [87]. Skoro nie zachodzi fotosynteza to nie ma również potrzeby wykorzystywania w pieczarkarni promieni słonecznych, ani tym bardziej systemów doświetlania uprawy. Z tego powodu hale produkcyjne są pozbawione okien, a sztuczne oświetlenie służy wyłącznie ułatwieniu prowadzenia zabiegów technologicznych przez ludzi.

Innym ciekawym przykładem różnicującym szklarnie od pieczarkarni jest kwestia dwutlenku węgla. Dla większości roślin szklarniowych optymalnym stężeniem tego gazu w powietrzu jest przedział 800–1000 ppm. W wyniku asymilacji węgla przez rośliny stężenie CO_2 może obniżyć się nawet do 200 ppm. Z racji tego, że powietrze świeże zawiera ok. 400 ppm konieczne jest dokarmianie roślin dwutlenkiem węgla [3,32]. W przypadku uprawy grzybów sytuacja jest odwrotna. W wyniku przemian biologicznych zachodzących w grzybni dwutlenku węgla jest więcej niż potrzeba, więc jego nadmiar musi być usuwany z hali przez wentylację. Inne są też zalecenia odnośnie optymalnego stężenia. Jednocześnie zawartość CO_2 w powietrzu ma bezpośredni wpływ na przebieg uprawy, wielkość i kształt owocników oraz w konsekwencji na wielkość plonu.

Jak widać z przytoczonych przykładów, podsystem środowiska wewnętrznego dla pieczarkarni zasadniczo różni się od środowiska obecnego w uprawie

szklarniowej. Szczegółową analizę współzależności parametrów występujących w tym podsystemie oraz opis jak parametry te wpływają na proces produkcyjny przedstawiono w kolejnych rozdziałach pracy.

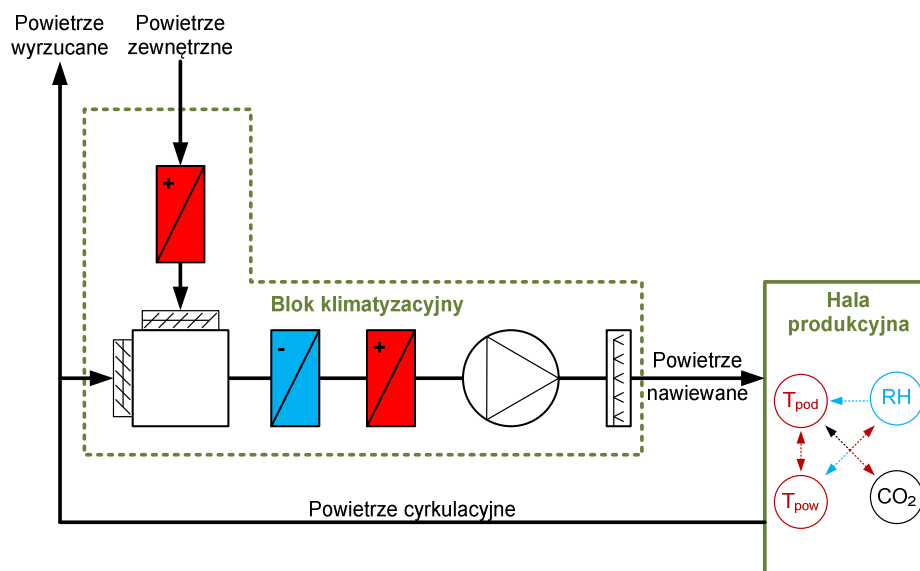
1.1.2. Podsystemy przygotowania i transportu powietrza

Podsystem przygotowania powietrza składa się najczęściej z centrali klimatyzacyjnej. Każda z hal produkcyjnych powinna być wyposażona we własny blok klimatyzacyjny (rys. 1.3). Typowe wyposażenie bloku obejmuje: przepustnice, filtry powietrza, nagrzewnice wstępną i wtórną, chłodnice, komorę zraszania oraz komorę mieszania. Schemat standardowego podsystemu przygotowania powietrza przedstawia rys. 1.4.

Moc i wydajność urządzeń klimatyzacyjnych musi odpowiadać powierzchni uprawy prowadzonej w hali. Zalecenia wskazują, aby na każdy 1 m² uprawy moc nagrzewnicy wynosiła 0,18 kW, moc chłodnicy 0,25 kW, natomiast wydajność wentylatora nie była niższa niż 22,5 m³·h⁻¹ [24,60].



Rys. 1.3 Bloki klimatyzacyjne przygotowujące powietrze do czterech osobnych hal uprawowych



Rys. 1.4 Schemat standardowego bloku klimatyzacyjnego

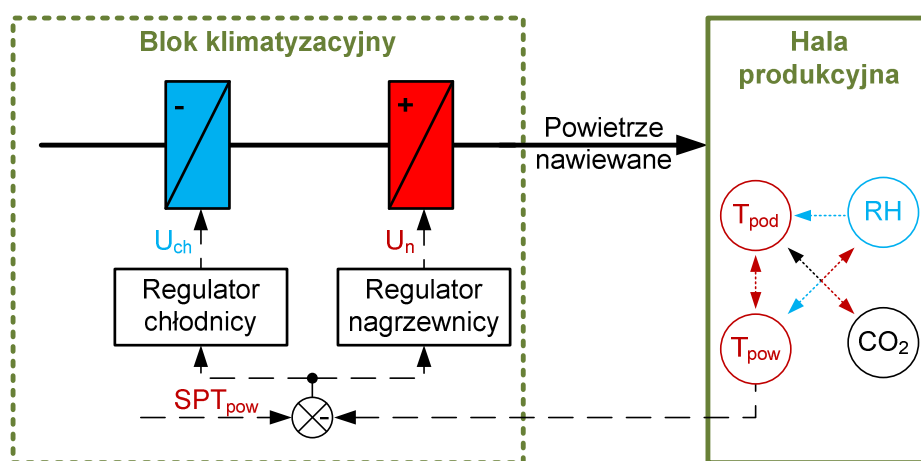
Głównym elementem podsystemu transportu powietrza jest rękaw nawiewowy (rys. 1.5). Znajduje się on w górnej części hali produkcyjnej, na całej jej długości. Wykonywany jest z tworzywa sztucznego, najczęściej z polipropylenu. W zależności od parametrów technologicznych hali może występować jeden lub, dla lepszego rozprowadzenia powietrza, dwa rękawy. W ściankach rękawów są umieszczone kubki nawiewowe. Od ich kształtu, ilości, wymiarów oraz umiejscowienia zależy ruch powietrza. Przepływ powietrza bezpośrednio nad powierzchnią uprawy powinien wynosić ok. $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Niewłaściwie zaprojektowany rękaw nawiewowy może powodować spadek lub całkowite zatrzymanie ruchu powietrza w pewnych obszarach hali [23,27,89]. Nieodpowiedni ruch powietrza może sprzyjać rozwojowi chorób bakteryjnych pieczarek np.: plamistość bakteryjna, rozwojowi chorób grzybowych występujących w podłożu np. daktylium, jak również występowaniu plam wodnych oraz powstawaniu łuski [68].



Rys. 1.5 Rękaw nawiewowy zawieszony pod sufitem hali uprawowej

1.1.3. Podsystem sterowania

Bardzo ważną rolę w całym systemie klimatyzacji odgrywa podsystem sterowania. Cięży na nim odpowiedzialność za określenie wymaganego w danej chwili strumienia powietrza nawiewanego o właściwie ukształtowanych parametrach. Każde z urządzeń podsystemu przygotowania powietrza wymaga wypracowania sygnału sterującego. Przykładowo, układ regulacji temperatury powietrza zawiera dwa sygnały sterujące, jeden steruje pracą chłodnicy a drugi nagrzewnicy (rys. 1.6). Podobnie jest z pozostałymi parametrami mikroklimatu. Patrząc na system klimatyzacji w sposób kompleksowy widać, że jest to układ wielowymiarowy, składający się z wielu obwodów sterowania, a co się z tym wiąże również wielu regulatorów.



Rys. 1.6 Koncepcja układu regulacji temperatury powietrza w hali produkcyjnej: T_{pod} – temperatura podłoża, T_{pow} – temperatura powietrza, SPT_{pow} – wartość zadana T_{pow} , RH – wilgotność względna powietrza, CO_2 – stężenie dwutlenku węgla w powietrzu, $U_{ch/n}$ – sygnał nastawczy siłownika sterującego pracą chłodnicy / nagrzewnicy

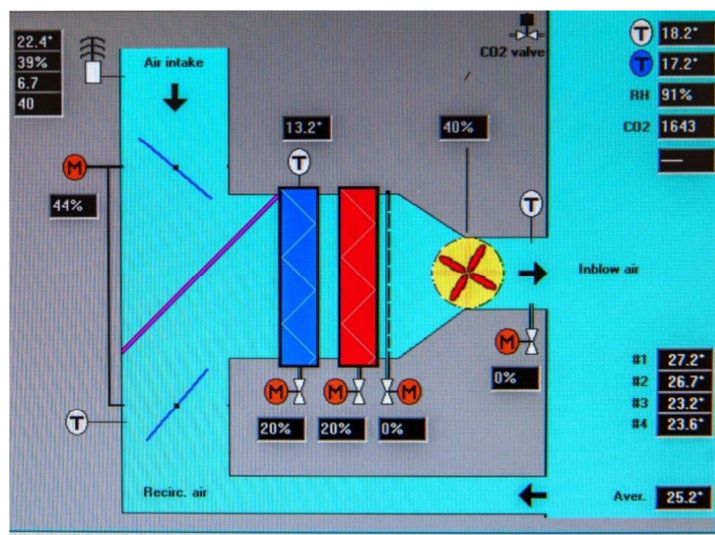
Utrzymanie na zadanym poziomie parametrów mikroklimatu jest zadaniem trudnym z tego względu, że są to wielkości współzależne. Przykładowo, zmiana temperatury powietrza o $1^\circ C$ spowoduje zmianę wilgotności względnej powietrza o ok. 6% [32]. Niektórzy autorzy opisują tę relację jako jeszcze silniejszą, tj. skok temperatury o $0,1^\circ C$ zmienia wilgotność o 1% [83]. Obniżenie wilgotności względnej powietrza spowoduje zwiększenie odparowania wody z podłoża, a to z kolei pociągnie za sobą obniżenie jego temperatury. W obecnych rozwiązaniach jedynym sposobem na obniżenie stężenia dwutlenku węgla w powietrzu jest wprowadzenie do hali większej ilości świeżego powietrza. Taki zabieg wymaga korekcję zarówno temperatury, jak i wilgotności.

Nadzór nad prawidłowym przebiegiem regulacji parametrów mikroklimatu sprawują zazwyczaj dedykowane regulatory do pieczarkarni (rys. 1.7). W mniejszych obiektach czasami właściciele decydują się na zastosowanie sterowników PLC z napisanym według ich zaleceń programem. Jednak takie rozwiązanie nie należy do najpopularniejszych.



Rys. 1.7 Przykładowe regulatory mikroklimatu dedykowane do pieczarkarni

Zazwyczaj regulatory są oferowane razem z rozbudowaną bazą danych oraz systemem SCADA (rys. 1.8). Baza danych jest potrzebna do analizy historycznych przebiegów regulacji nawet do kilkunastu miesięcy wstecz. Daje to technologom szansę na przeanalizowanie całego procesu technologicznego i wyjaśnienie przyczyn niepowodzenia w uprawie. Takich przyczyn może być wiele, na przykład nieodpowiednie ustawienie wartości zadanych parametrów mikroklimatu na pewnym etapie cyklu produkcyjnego.



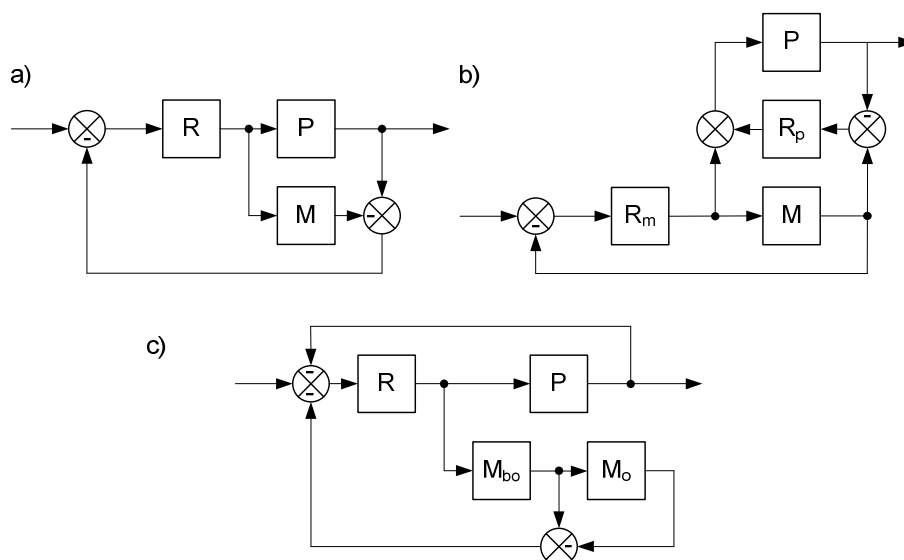
Rys. 1.8 Ekran systemu SCADA procesu klimatyzacji współpracujący z regulatorem firmy AEM

System SCADA umożliwia podgląd bieżących wartości punktów pomiarowych i sygnałów sterujących. Na polskim rynku działa wiele firm oferujących regulatory mikroklimatu wyprodukowane przez zagraniczne koncerny, głównie holenderskie. Najczęściej spotykanymi markami są Fancom oraz AEM. Na uwagę zasługują również rozwiązania wypracowane przez polskie firmy. Najlepszym przykładem jest firma LAB-EL, która od kilkunastu lat ma w swojej ofercie regulatory klimatu do pieczarki. Obecnie są to jedne z najpopularniejszych regulatorów w Polsce. Warty podkreślenia jest to, że oferta produktowa firmy jest regularnie wzbogacana. Starsze modele są zastępowane nowszymi, np.: model LB-762 firmy LAB-EL jest następcą LB-760. Modyfikacjom podlegają również zaimplementowane algorytmy i struktury regulacji. Wskazuje to na realną potrzebę opracowania modeli symulacyjnych pieczarki, umożliwiających prowadzenie dalszych prac badawczo-rozwojowych.

Badania wskazują, że wśród różnych algorytmów regulacji najpopularniejszym jest algorytm PID [41,63]. Podobna tendencja obowiązuje w technice regulacji wykorzystywanej w pieczarkarstwie [97]. Obowiązkową czynnością przy uruchamianiu układu z regulatorem PID jest dobór trzech wartości nastaw: wzmocnienia proporcjonalnego, czasu całkowania i różniczkowania. Czynność ta nazywana jest parametryzacją lub tuningiem regulatora [4,74]. Wszelkie błędy popełnione na tym etapie będą skutkowały niezadowalającą jakością regulacji na etapie późniejszym. Szacuje się, że zaledwie 32% pętli regulacji jest sparametryzowana w sposób zapewniający zadowalającą jakość regulacji [77]. Algorytm PID jest przez wielu automatyków uznawany za prosty, ponieważ składa się z zaledwie trzech członów: proporcjonalnego, całkującego oraz różniczkującego. Jednak w rzeczywistości istnieje wiele modyfikacji jego podstawowej struktury. O'Dwyer wymienia 46 różnych wariantów regulatora PID [50]. Przed przystąpieniem do uruchamiania układu z regulatorem PID konieczne jest poznanie dokładnie jaki algorytm został zaimplementowany w urządzeniu. Praktyka pokazuje, że nie zawsze producenci udostępniają wyczerpujące informacje na ten temat. Oznacza to, że struktura algorytmu regulacji nie jest w pełni jawna, co powoduje problemy z właściwym doбором nastaw. Powstaje zatem pytanie w jaki sposób testować regulatory, których producenci nie udostępniają pełnej informacji o zastosowanej strukturze algorytmu PID?

Wykorzystując tylko informacje dostarczone przez producenta w dokumentacji technicznej, najczęściej w formie wzorów matematycznych lub schematów blokowych, można opracować przybliżony model teoretyczny regulatora. Nie zawsze jednak dokumentacja jest wystarczająco bogata. Zdarzają się również rozbieżności między charakterystyką dynamiczną regulatora a charakterystyką jego modelu. Rozwiązaniem problemu może być przeprowadzenie procesu identyfikacji regulatora. Badania wykazują, że otrzymany w ten sposób model regulatora jest dokładniejszy od modeli teoretycznych [71,72].

Oprócz wyboru algorytmu regulacji należy także dobrać strukturę układu regulacji. Są to dwa osobne pojęcia i należy je wyraźnie rozgraniczyć. Algorytmy regulacji, jak np. PID, mogą funkcjonować w ramach różnych struktur układów regulacji [14]. Oprócz klasycznej struktury ze sprzężeniem zwrotnym (z ang. *feedback*) w układzie może się znaleźć kompensator zakłóceń, tworząc strukturę zwaną *feedforward*. Dostępny jest również bogaty zasób struktur o właściwościach predykcyjnych, jak np.: IMC (z ang. *Internal Model Control*), MFC (z ang. *Model Following Control*) lub struktura z predyktorem Smitha [8,76]. Struktury te przedstawia rys. 1.9. Wspólnym mianownikiem wymienionych struktur jest obecność modelu regulowanego procesu. Od dokładności z jaką model odwzorowuje rzeczywistość zależy przebieg całego procesu regulacji. Struktury te są najczęściej wykorzystywane do regulacji procesów z dużymi opóźnieniami.

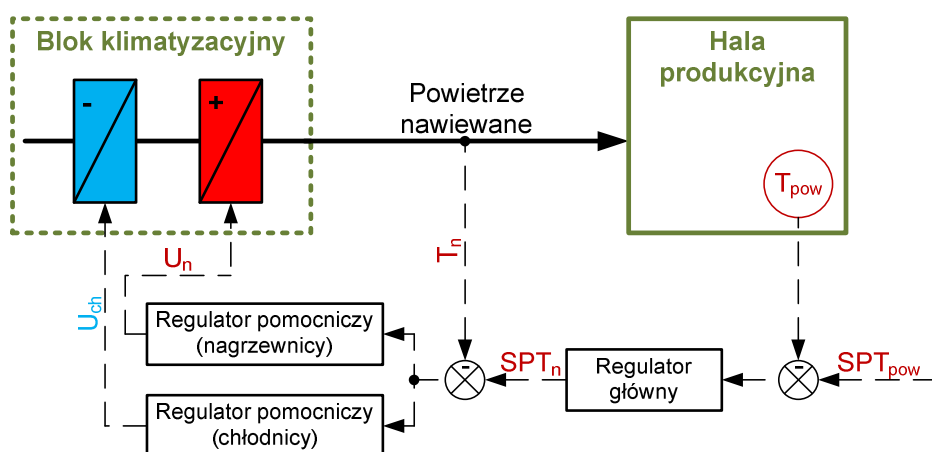


Rys. 1.9 Struktury układów regulacji: a – IMC, b – MFC, c – z predyktorem Smitha. Użyte na schematach oznaczenia: R – regulator, R_m – regulator modelu, R_p – regulator procesu, M – model procesu, M_{bo} – model procesu bez opóźnienia, M_o – model opóźnienia procesu, P – proces [100]

W sytuacji, gdy wielkość regulowana nie jest kształtowana bezpośrednio przez sygnał nastawczy ale pośrednio przez inną mierzoną wielkość, można zastosować strukturę kaskadową. W tej strukturze występują dwa regulatory, główny i pomocniczy, oraz w konsekwencji dwie wielkości regulowane. Takiego typu rozwiązania można znaleźć np.: w reaktorach chemicznych, homogenizatorach lub skrobakowych wymiennikach ciepła [77].

Niektóre z dedykowanych do pieczarkarni regulatorów również działają w oparciu o strukturę kaskadową. Przykładem jest regulator LB-762 firmy

LAB-EL. Strukturę kaskadową wykorzystuje się w regulacji temperatury powietrza wewnątrz hali produkcyjnej (rys. 1.10).



Rys. 1.10 Koncepcja układu regulacji temperatury powietrza wewnątrz hali produkcyjnej o strukturze kaskadowej: T_n – temperatura powietrza nawiewanego, SPT_n – wartość zadana T_n

W przytoczonym przykładzie można mówić o szeregowej strukturze obiektu, ponieważ temperaturę powietrza wewnątrz hali kształtuje się poprzez temperaturę powietrza nawiewanego do hali. Sygnał wyjściowy regulatora głównego jest jednocześnie wartością zadaną dla regulatora pomocniczego. Elektrozaorem siłownika nagrzewniczy lub chłodniczy steruje w rezultacie regulator pomocniczy. Zaletą tej struktury jest lepsze tłumienie zakłóceń oddziaływujących na urządzenia wykonawcze.

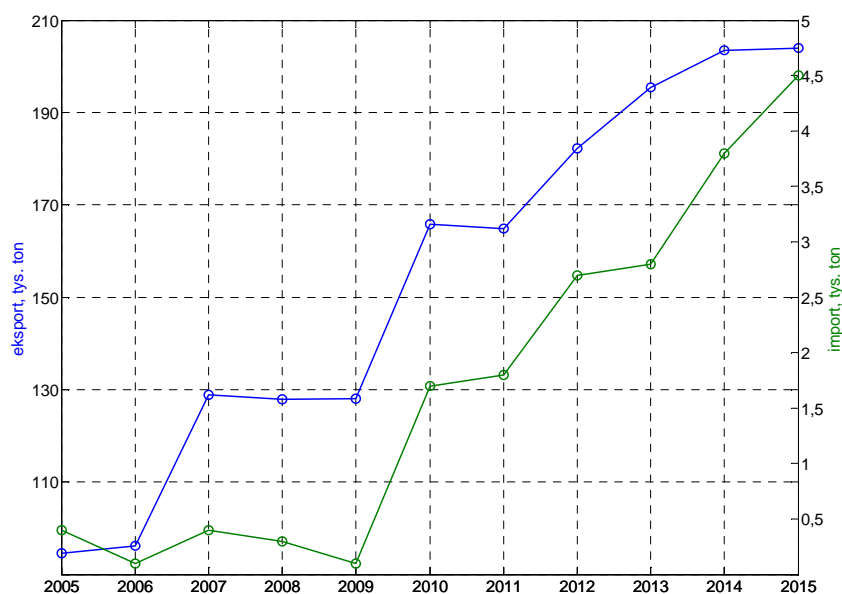
1.2. Pieczarkarstwo – opis sektora

Światowa produkcja grzybów jest zdominowana przez Chiny. Prawie 75% produkcji globalnej pochodzi z Azji, a 95% produkcji azjatyckiej generują Chiny¹. Tamtejszy rynek jest bardzo różnorodny a uprawiane gatunki grzybów dla przeciętnego Europejczyka bardzo egzotyczne. W samych Chinach w 2002 roku uprawianych było 92 gatunki grzybów, a połowa z nich była produkowana na dużą skalę przemysłową [52].

Kolejnymi regionami ze znaczącym udziałem w wielkości produkcji są Europa i obie Ameryki. Ich udział w produkcji wynosi odpowiednio 20 i 5%. W przypadku obu Ameryk głównym producentem są Stany Zjednoczone. Zarówno w Europie jak i Stanach Zjednoczonych rynek grzybów jest prawie w 100% ukierunkowany na produkcję pieczarek [22].

¹ Według danych FAOSTAT z 2013 roku.

Produkcja pieczarek w Europie w 2014 r. wyniosła 1,2 mln ton. W tym okresie Polska, z produkcją na poziomie 275 tys. ton, miała 21% udziału w rynku europejskim. Taki wynik zagwarantował nam pozycję lidera w wielkości produkcji pieczarki białej w Europie. Krajowa produkcja jest głównie nastawiona na eksport. Według szacunków Instytutu Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej wielkość eksportu w 2015 roku wyniesie 204 tys. ton i będzie 45-krotnie wyższa od importu (rys. 1.11).



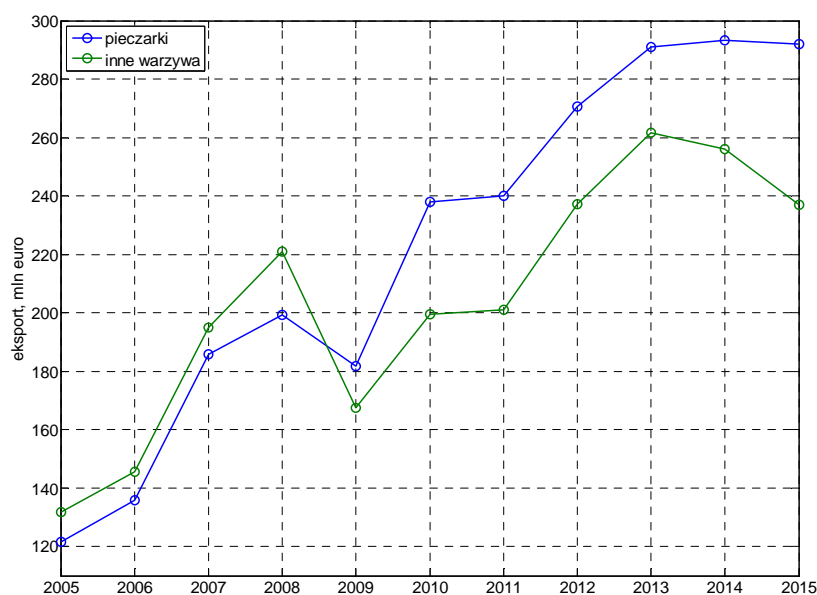
Rys. 1.11 Wielkość eksportu i importu pieczarek w Polsce w latach 2005–2015 [49]

Polscy producenci mają bardzo silną pozycję na zagranicznych rynkach. Świadczy o tym miano największego eksportera pieczarek na świecie. Szacuje się, że 35% światowego importu tych grzybów pochodzi z Polski.

Od kilku lat wartość eksportu tylko pieczarek przewyższa zsumowaną wartość eksportu warzyw: cebuli, kapusty, ogórków, marchwi, pomidorów, buraków i papryki (rys. 1.12). Wartość eksportu pieczarek stanowi ok. 60% wpływów z eksportu wszystkich warzyw i ich przetworów.

Poważnym wyzwaniem dla krajowych producentów było rosyjskie embargo. Jego skutki można zauważyć na rys. 1.12. Od 2013 roku widoczny jest spadek wartości eksportu świeżych warzyw. W przypadku pieczarek embargo spowodowało wyraźne zahamowanie utrzymującego się od kilku lat trendu wzrostowego. Rosja była jednym z popularniejszych kierunków eksportowych, szczególnie dla producentów zlokalizowanych we wschodniej Polsce. Należy pamiętać, że obszar Mazowsza i Podlasia uważany jest za polskie zagłębie pieczarkarskie. Przed wprowadzeniem embarga 18% eksportu grzybów było kierowane do

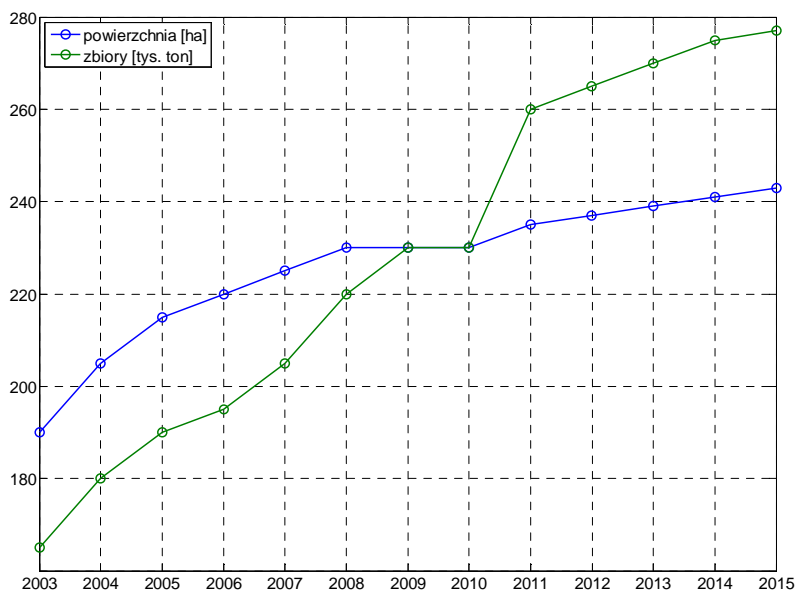
Rosji. Producenci rozwiązali ten problem znajdując nowe rynki zbytu (np.: Serbia, Albania, Turcja, Maroko) lub zwiększając swój udział na rynkach dotychczasowych (np.: Białoruś, Czechy, Łotwa, Niemcy). W największym stopniu, bo aż o 242% (z 6,6 tys. ton w 2013 r. do 16 tys. ton w 2014 r.) wzrósł eksport na Białoruś. Prawdopodobnie przetransferowanie eksportu w tym kierunku ma na celu nieformalne ominięcie rosyjskiego embarga [39].



Rys. 1.12 Wartość eksportu pieczarek w porównaniu z innymi warzywami świeżymi² [49]

Z rysunku 1.13 można wnioskować o dynamice rozwoju tej gałęzi produkcji rolniczej. Na przestrzeni 12 lat zbiory pieczarek w Polsce wzrosły o blisko 68% (ze 165 tys. ton w 2003 r. do 277 tys. ton w 2015 r.) przy jednoczesnym powiększeniu powierzchni upraw tylko o 28% (z powierzchni 190 ha w 2003 r. do 242,9 ha w 2015 r.) [49]. Niewątpliwie świadczy to o postępie technologicznym produkcji oraz o coraz większym doświadczeniu producentów. Sukcesywny wzrost powierzchni i zbiorów jest również związany z rosnącym zapotrzebowaniem na zagranicznych, głównie europejskich, rynkach zbytu. Wszystkie te informacje pokazują jak ważny dla polskiego rolnictwa jest przemysł pieczarkarski.

² Warzywa ujęte na wykresie to cebula, kapusta biała i czerwona, ogórek, marchew, kalafior, pomidor, burak oraz papryka.



Rys. 1.13 Powierzchnia upraw oraz wielkość zbioru pieczarek w latach 2003–2015 [49]

O mocnej światowej pozycji polskiego pieczarkarstwa świadczą również wysokie oceny wystawiane przez zagranicznych ekspertów. Przykładem tego jest raport opracowany przez Amerykańską Komisję ds. Handlu Zagranicznego w 2010 roku. W raporcie zatytułowanym *Mushrooms Industry & Trade Summary* specjaliści scharakteryzowali najważniejsze światowe rynki pieczarkarskie. W przypadku rynku polskiego amerykańscy analitycy podkreślili wysoką jakość polskich pieczarek i zaawansowanie technologiczne zakładów produkcyjnych [46].

1.3. Technologia uprawy pieczarek

1.3.1. Organizacja produkcji pieczarek

Uprawa pieczarek w Polsce była i jest w dalszym ciągu zasilana holenderską wiedzą technologiczną. Eksperci odczytują to jako jedno z zagrożeń polskiego pieczarkarstwa, ponieważ w tym modelu przewaga konkurencyjna jest wypracowywana jedynie ceną i skalą produkcji. Podkreślają również potrzebę przejścia z etapu naśladowców do etapu kreatorów innowacji [67]. Z racji importowania rozwiązań technologicznych, np.: budowa pieczarkarni lub organizacja systemu uprawowego, pieczarkarnia polska i holenderska są do siebie podobne. W latach 70. XX wieku wszystkie nowobudowane obiekty w Holandii były zgodne z zaleceniami Instytutu Techniki Ogrodniczej w Wageningen [87]. Tak daleko posunięta standaryzacja spowodowała obniżenie kosztów budowy obiekt-

tów, ułatwiła mechanizację części zabiegów technologicznych oraz umożliwiła prowadzenie skutecznego doradztwa agrotechnicznego.

W klasycznym podziale systemów uprawowych pieczarek można wyróżnić typy: jedno i wielostrefowy. W systemie jednostrefowym kolejne etapy uprawy, tj. pasteryzacja podłoża, szczepienie grzybni i jej rozrastanie, prowadzone są w jednym pomieszczeniu. Pomieszczenia są zatem uniwersalnego przeznaczenia. Stwarza to możliwość rozpoczęcia produkcji posiadając zaledwie jedną halę uprawową. Istotną wadą jest to, że wszystkie pomieszczenia muszą być bardzo dobrze izolowane termicznie ze względu na konieczność utrzymywania wysokiej temperatury na wybranych etapach uprawy np. pasteryzacji podłoża.

Intensywność wykorzystania dostępnych hal jest też mniejsza w porównaniu z systemem wielostrefowym. System wielostrefowy zakłada rozdzielenie pomieszczeń do pasteryzacji, inkubacji i plonowania. Dzięki temu można osiągnąć bardziej intensywne zagospodarowanie pomieszczeń. Wymagania termoizolacyjne są zróżnicowane w zależności od przeznaczenia danego pomieszczenia, dzięki czemu można zoptymalizować koszty budowy. Pieczarkarnia funkcjonująca w systemie wielostrefowym, aby była efektywna ekonomicznie, wymaga od samego początku dużej powierzchni uprawy. Możliwości stopniowego rozwijania obiektu są w tym przypadku ograniczone. Uprawa jest transportowana pomiędzy pomieszczeniami co zwiększa ryzyko wystąpienia chorób.

Przywołany, klasyczny podział nie jest już aktualny. Konkurencyjność na rynku pieczarkarskim wymusiła ścisłą specjalizację. Komisja Europejska w 2004 r. ustanowiła normy jakościowe dla pieczarek hodowlanych [15]. Pieczarki spełniające standardy europejskie są w stanie wyprodukować jedynie zakłady nowoczesne, najlepiej wyposażone technicznie. Dawniej popularnym podejściem było przekształcanie na pieczarkarnie budynków po wygasłej produkcji, np. zwierzęcej. W takich budynkach nie jest jednak możliwa produkcja spełniająca najwyższe normy jakościowe. Ciągłe dążenie do intensyfikacji produkcji wymusiło powstanie trzeciego systemu uprawowego – systemu pośredniego. W jego definicji jest wyraźne rozdzielenie działalności produkcyjnej na przedsiębiorstwa odpowiadające za przygotowanie podłoża oraz przedsiębiorstwa hodujące na tymże podłożu grzyby. Pieczarkarnia w systemie pośrednim ma cechy systemu jednostrefowego, z tego względu, że uprawa pozostaje w hali produkcyjnej od jej założenia do zakończenia.

Wewnątrz hali produkcyjnej ustawione są kilkupoziomowe regały (rys. 1.14), wykonane z ocynkowanej blachy i rozmieszczone w kilku rzędach. Szerokość regałów jest standardowa i wynosi 1,34 m. Liczba regałów, w zależności od wielkości pieczarkarni, waha się od 2 do 4. Na jednym regale znajduje się od 4 do 6 półek. Większa liczba półek jest niekorzystna ze względu na trudności z utrzymaniem równomiernego ruchu powietrza w hali. Boczne krawędzie regałów powinny być przystosowane do zamontowania podnośników dla zbieraczek ułatwiających prace na wyższych kondygnacjach regałów.



Rys. 1.14 Hala uprawowa z czterema regałami po sześć półek

Uprawę można prowadzić nie tylko na regałach. Popularne, choć nie w Polsce, są uprawy w skrzyniach. Ze względu na możliwość łatwego transportu skrzyń takie rozwiązanie znajduje zastosowanie w pieczarkarniach prowadzonych w systemie wielostrefowym. Można wówczas jedno z pomieszczeń przeznaczyć wyłącznie na zbiór. Stwarza to dogodne warunki do usprawnienia zbioru ręcznego lub nawet jego automatyzacji. Przykładem może być rozwiązanie zaproponowane przez firmę Advanced Mushroom Research. Skrzynie są ustawiane w jednym poziomie, tak aby nad uprawą mógł przesuwać się układ akwizycji obrazu połączony z projektorem. Na podstawie analizy obrazu prowadzonej w czasie rzeczywistym system dokonuje selekcji owocników gotowych do zbioru. Przy pomocy projektora podświetla konkretne grzyby, kierując w ten sposób pracą personelu odpowiedzialnego za zbiór. Według informacji producenta do analizy obrazu wykorzystano algorytm Active Shape Model [1,67].

1.3.2. Charakterystyka cyklu produkcyjnego

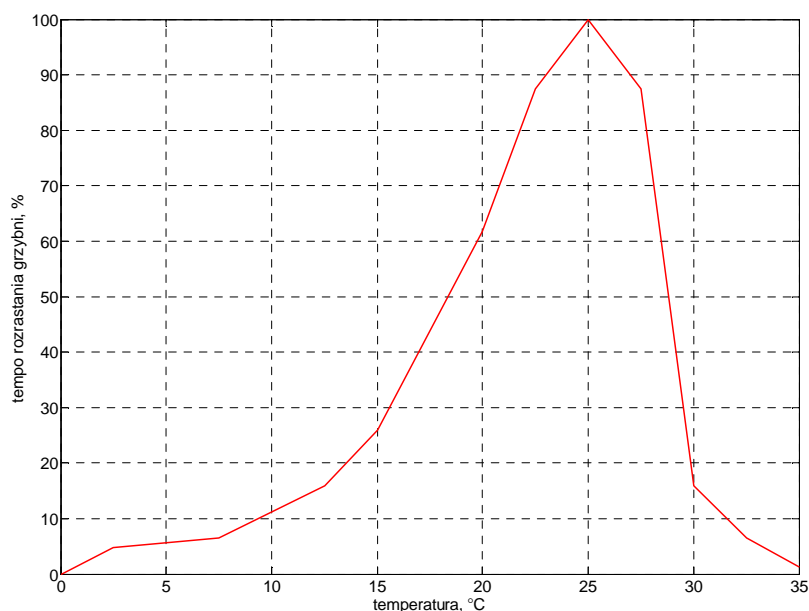
Rozwój grzybni jest możliwy dzięki obecności odpowiedniego habitatu. Jest to bezpośrednio otoczenie grzybni, które dostarcza niezbędne do rozwoju składniki odżywcze [25]. W uprawie pieczarek habitatem jest specjalnie przygotowane podłoże, nazywane również kompostem lub substratem.

Podłoże pieczarkarskie produkuje się między innymi ze słomy, pomiotu kurzego, gipsu oraz wody. Dawniej surowcem był również obornik koński, jednak ze względu na ograniczoną dostępność jego rola w produkcji jest już marginalna. Słoma pochodząca z upraw pszenicy, żyta lub pszenżyta jest źródłem celulozy. Pomiot kurzy dostarcza azot i węglowodany. Dodatek gipsu obniża odczyn i zapewnia właściwą strukturę podłoża. Według zaleceń na tonę suchej słomy dodaje się 0,8–1,2 tony pomiotu kurzego, 85 kg gipsu oraz 5000 litrów wody [68]. Warto dodać, że woda musi spełniać standardy wody pitnej.

Produkcją podłoża zajmują się wyspecjalizowane zakłady – kompostownie. Proces produkcji jest podzielony na kilka faz. Pierwszy etap to fermentacja biologiczna i ma na celu homogenizację surowców. Umożliwia to rozkład substancji organicznych do składników łatwo przyswajalnych przez grzybnię. W wyniku aktywności drobnoustrojów temperatura podłoża stopniowo podwyższa się. Początkowo, gdy temperatura wynosi ok. 37°C, najszybciej rozwijają się mikroorganizmy mezofilne. Wzrost temperatury do 50–60°C powoduje powstanie sprzyjających warunków dla drobnoustrojów termo-tolerancyjnych. W końcowym etapie w wyniku namnażania termofilnych bakterii i promieniowców temperatura przekracza 80°C. Powoduje to karmelizację węglowodanów, które w takiej formie nie mogą być wykorzystane przez inne grzyby [83]. Wysoka temperatura eliminuje również dorosłe i przetrwalnikowe formy chorób i szkodników pieczarek. Tak przygotowane podłoże jest umownie nazywane podłożem fazy I. Stanowi ono jednocześnie podstawowy surowiec do produkcji podłoża fazy II. Ten etap produkcji prowadzony jest w specjalnych

tunelach z kontrolowaną temperaturą, stężeniem tlenu i amoniaku. Początkowo temperaturę kompostu w całej objętości należy wyrównać do ok. 48°C. Następnie poprzez ograniczenie dostępu świeżego powietrza podnosi się temperaturę do 56–60°C. Takie warunki utrzymuje się przez 6–8 godzin. Jest to etap pasteryzacji, który ma na celu zniszczenie organizmów patogennych pieczarki. Ostatnim etapem w tej fazie produkcji jest kondycjonowanie. Kondycjonowanie, inaczej też dojrzewanie, to okres, w którym temperatura jest stopniowo obniżana do ok. 48°C, a następnie utrzymywana na tym poziomie przez kilka dni. Zwykle sygnałem do zakończenia dojrzewania jest spadek stężenia amoniaku poniżej 10 ppm. Po tej fazie produkcji właściwości fizyczne i skład chemiczny substratu stwarzają warunki do wzrostu i rozwoju jedynie grzybni pieczarki. Oznacza to, że podłoże staje się selektywne [35].

Na tym etapie zaczyna się III faza produkcji. Po schłodzeniu podłoże trafia do tunelu przerostowego. Zarówno konstrukcyjnie, jak i pod względem wyposażenia, tunele przerostowe nie różnią się od tych, w których przeprowadza się pasteryzację. Do przygotowanego podłoża wsiewa się grzybnie handlową, po czym następuje kilkunastodniowy etap przerastania, czyli inkubacji. Jest to proces, w którym strzępki grzybni mają opanować całą objętość substratu. Również na tym etapie na tempo procesu w istotny sposób wpływają czynniki mikroklimatyczne. Zależność szybkości rozrastania się grzybni od temperatury podłoża jest pokazana na rys. 1.15.

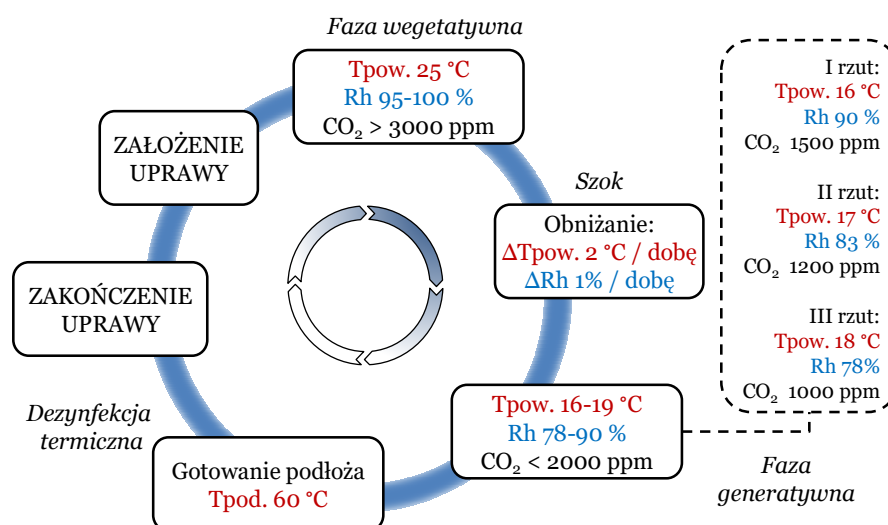


Rys. 1.15 Wpływ temperatury podłoża na rozrastanie się grzybni [83]

Kompostownie sprzedają najczęściej podłoża fazy III, jednak niektóre pieczarkarnie w dalszym ciągu decydują się na zakup fazy II i dokonanie inkubacji we własnych obiektach. Obie wersje podłoża są sprzedawane w postaci albo uformowanych kostek owiniętych folią termokurczliwą, albo luzem. Kostka ma wymiary ok. 50x40x17 cm, a jej masa nie przekracza 19 kg. Zaletą podłoża sprzedawanego luzem jest możliwość zmechanizowania jego ułożenia w hali uprawowej. Jednak zakup specjalistycznej maszyny, kombajnu do kompostu, jest opłacalny tylko w przypadku większych pieczarkarni [70].

Na polskim rynku dostępne jest również, oferowane zaledwie przez kilka kompostowni, podłoże fazy IV. Z technologicznego punktu widzenia samo podłoże nie jest poddawane żadnym dodatkowym zabiegom wpływającym na jego właściwości. Przerośnięte podłoże fazy III pozostaje w kompostowni do momentu wytworzenia zawiązków owocników i dopiero w takiej formie jest sprzedawane. Oznacza to, że rola pieczarkarza w produkcji sprowadza się do przeprowadzenia zbioru i pielęgnacji uprawy w tym czasie. Z punktu widzenia pieczarkarza skraca to cykl produkcyjny, jednak decydując się na kompost fazy IV radykalnie minimalizuje się możliwość wpływu na uprawę.

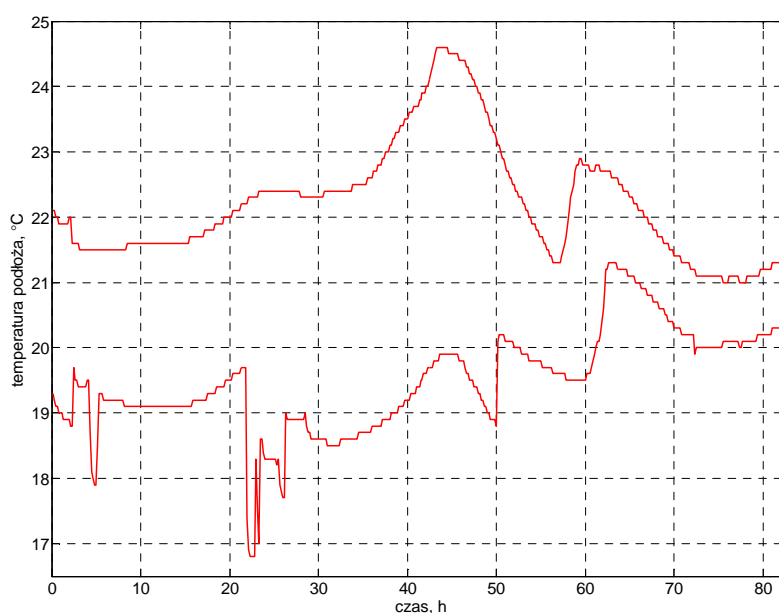
Uprawa pieczarek ma charakter cykliczny. Przy korzystaniu z podłoża fazy III jeden cykl produkcyjny trwa ok. 6 tygodni. Na każdym etapie produkcji wymagany jest mikroklimat o odmiennych parametrach (rys. 1.16).



Rys. 1.16 Zalecane wartości parametrów mikroklimatu na przestrzeni całego cyklu produkcyjnego

Uprawa rozpoczyna się z chwilą nałożenia podłoża na półki. Od tej pory należy dokładnie śledzić jego temperaturę. Błędy na tak wczesnym etapie produkcji mogą skutkować niepowodzeniem całego cyklu produkcyjnego. Wszelkie

działania powinny koncentrować się na wyrównaniu i ustabilizowaniu temperatury. W wyniku transportu podłoże może być zimą przechłodzone natomiast latem przegrzane, a jego temperatura może wówczas przekraczać 30°C. Pomiar temperatury podłoża w hali produkcyjnej jest wielopunktowy. Standardem jest prowadzenie pomiaru w 4–6 punktach. Zróżnicowanie temperatur może wynosić nawet 5°C (rys. 1.17). Do sterowania najczęściej wykorzystuje się uśrednioną wartość tych pomiarów. Dąży się do osiągnięcia temperatury podłoża na poziomie 23°C.



Rys. 1.17 Przykładowy przebieg zmierzonych wartości maksymalnej i minimalnej temperatury podłoża po założeniu uprawy

Po ustabilizowaniu temperatury podłoża przykrywa się je 4–5 cm warstwą okrywy. Musi być ona wykonana z materiału, który:

- gromadzi duże ilości wody,
- umożliwia przenikanie substancji lotnych wydzielanych przez grzybnię,
- jest aktywny biologicznie.

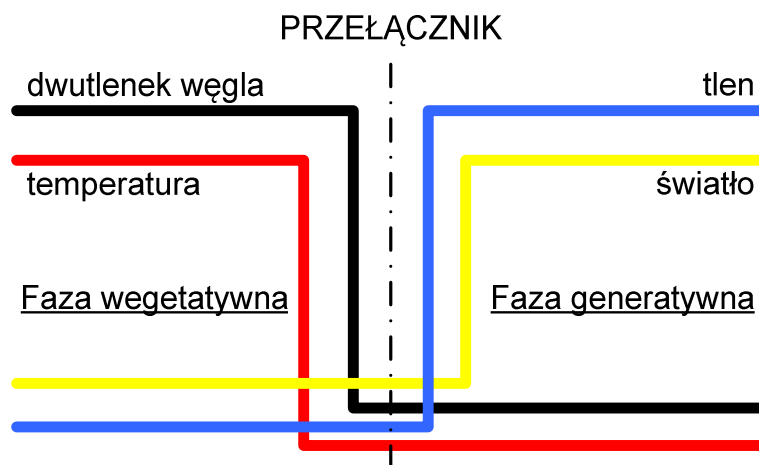
W praktyce okrywę produkuje się z torfu wysokiego. Ze względu na kwaśny odczyn materiału konieczne jest dodanie węgla wapnia. Zabieg ten stabilizuje pH okrywy w przedziale 7,2–7,5 [34]. Kolejnym etapem jest przerost okrywy. Strzępki grzybni powinny opanować całą warstwę okrywy (rys. 1.18). Warunki mikroklimatyczne w trakcie przerastania okrywy są zbliżone tych panujących

w trakcie przerastania podłoża. Stężenie dwutlenku węgla powinno być wysokie, ponad 3000 ppm, podłoże mieć temperaturę zbliżoną do 25°C a wilgotność powietrza może przekraczać nawet 95%. Temperatura powietrza powinna umożliwić osiągnięcie zakładanej temperatury podłoża. W praktyce oznacza to utrzymywanie temperatury powietrza w przedziale 16–23°C.



Rys. 1.18 Podłoże z widoczną warstwą okrywy (górne zdjęcie) oraz całkowicie przerośnięte (dolne zdjęcie)

W rozwoju fizjologicznym grzybów można wyróżnić dwa podstawowe etapy. Pierwszy jest nazywany fazą wegetatywną, a drugi generatywną. Faza wegetatywna kończy się opanowaniem przez grzybnięć całej warstwy podłoża wraz z okrywą. Kolejna faza, generatywna, ma na celu zmobilizowanie organizmu grzyba do formowania zawiązków owocników. Symboliczną funkcję przełącznika pomiędzy fazami pełni mikroklimat. Moment przejścia z jednej fazy w drugą nazywany jest szokiem (rys. 1.19).



Rys. 1.19 Mikroklimat jako symboliczny przełącznik fazy wegetatywnej i generatywnej [9]

Poziome linie w fazie wegetatywnej i generatywnej mogą sugerować konieczność stosowania regulacji stałowartościowej parametrów mikroklimatu. Tak w rzeczywistości nie jest. Rysunek ma charakter poglądowy i ma jedynie podkreślić, że czynnikiem wywołującym zmianę fazy rozwojowej jest właśnie mikroklimat. Zarówno w fazie wegetatywnej, jak i generatywnej, występują pewne zmienne wymagania co do wartości wielkości fizycznych opisujących środowisko wewnętrzne. Zatem w obu przypadkach regulacja powinna mieć charakter programowy.

W trakcie szoku następuje stopniowe zmniejszenie stężenia dwutlenku węgla, zwiększenie dostępności tlenu, obniżenie temperatury i wilgotności powietrza oraz zwiększenie natężenia oświetlenia. Jest to ogólny szablon postępowania pasujący do wielu gatunków grzybów. Dla każdego gatunku należy go odpowiednio dostosować. Jednak parametry wzrostu różnych gatunków znacząco od siebie odbiegają. Przykładowo, zyskujący w Polsce na popularności, bocznik ostrygowaty wymaga przy formowaniu zawiązków dużego natężenia oświetlenia w przedziale 1000–2000 lx oraz 1500–2000 lx przy plonowaniu. Z kolei rola światła w uprawie pieczarki dwuzarodnikowej przez większość naukowców uznawana jest za pomijalną, a nawet wskazywana jako inhibitor tworzenia zawiązków oraz formowania trzonka i kapelusza grzyba [9]. Jednak z drugiej strony w literaturze można również znaleźć sugestie związane z utrzymywaniem natężenia oświetlenia w przedziale 100–200 lx [34]. Różnice pomiędzy gatunkami są także łatwo zauważalne w przypadku innych parametrów, np. temperatury powietrza (tabela 1.1). Mogą one sięgać nawet 17°C w fazie wegetatywnej oraz 24°C w fazie generatywnej.

Tabela 1.1 Wymagania związane z temperaturą powietrza w hali produkcyjnej wybranych gatunków grzybów [5]

Gatunek	Zalecana temperatura powietrza [°C]	
	Faza wegetatywna	Faza generatywna
<i>Agaricus bisporus</i> Pieczarka dwuzarodnikowa	22–25	15–17
<i>Agaricus bitorquis</i> Pieczarka szlachetna	28–30	22–24
<i>Flammulina velutipes</i> Zimówka aksamitna	18–25	8–12
<i>Lentinula edodes</i> Twardziak shii-take	24	15
<i>Pleurotus ostreatus</i> Bocznik ostrygowaty	26–28	16–22
<i>Volvariella volvacea</i> Pochwiak	32–35	28–32

Po zakończonym szoku na powierzchni okrywy powinny pojawić się zawiązki owocników wielkości główki od szpilki. Istotną kwestią jest uzyskanie kilku zróżnicowanych generacji zawiązków. Będzie to gwarantem rozciągnięcia okresu owocowania w czasie. Kolejnym etapem jest dorastanie zawiązków. Stopniowe obniżanie wilgotności stymuluje zawiązki do powiększania swojej masy. Po pewnym czasie uzyskują wielkość ziarna grochu i następuje wyraźne oddzielenie trzonka od kapelusza. W przeciągu kolejnych kilku dni owocniki uzyskują wielkość handlową. Okres zbioru pieczarek trwa ok. 20 dni i jest podzielony na trzy rzuty. Wielkość plonu zależy przede wszystkim od rzutu I i II. Istnieje możliwość wydłużenia uprawy o kolejny IV rzut jednak w produkcji towarowej jest to posunięcie nieopłacalne. Wraz z kolejnymi rzutami spada również aktywność podłoża. Należy ją rozumieć jako różnicę temperatury podłoża i powietrza. Im aktywność jest mniejsza, tym podłoże staje się bardziej podatne na choroby.

W Polsce dominuje selektywny zbiór ręczny. Taki sposób zbioru jest zarówno pracochłonny jak i kosztochłonny. Vedder szacuje, że nakład prac związanych ze zbiorem wynosi 340 godzin, podczas gdy na całą produkcję potrzeba 455 roboczogodzin [87]. Udział kosztów pracy w kosztach produkcji jest znaczny i wynosi według różnych opracowań 36–47% [52,64]. Niskie koszty pracy, w porównaniu z krajami Europy Zachodniej, dają polskim producentom olbrzymią przewagę konkurencyjną. W Holandii godzina pracy zbieraczki kosztuje 16 euro [54]. Wydajność zbioru ręcznego zależy od wielu czynników i bywa bardzo zróżnicowana. Może wynosić od 20 do 70 kg·h⁻¹ [37,68,69]. Mazowiecki Ośrodek Doradztwa Rolniczego szacuje koszt zbioru 1 kg grzybów na 0,55 zł

(0,13 euro³). Zakładając najwyższą wydajność można obliczyć, że godzina pracy zbieraczki w Polsce kosztuje 9 euro. Obecnie ta duża różnica działa na korzyść polskich producentów, jednak jak ta sytuacja będzie wyglądała w przyszłości? Aby znaleźć odpowiedź warto prześledzić dynamikę zmian kosztów pracy w ostatnich kilku latach. W Polsce głównym regionem produkującym pieczarki na eksport jest województwo mazowieckie, w szczególności powiaty siedlecki i łosicki. Średnie miesięczne wynagrodzenie brutto w powiecie łosickim w latach 2004–2014 wzrosło o 67% (z 1964 zł w 2004 r. do 3280 zł w 2014 r.). Należy oczekiwać, że tendencja wzrostu wynagrodzeń zostanie utrzymana zwiększając tym samym koszt zbioru pieczarek.

Decyzja o rozpoczęciu zbioru owocników ma kluczowe znaczenie z ekonomicznego punktu widzenia. Zbyt wczesny zbiór owocników wiąże się z utratą masy, a zbyt późny z utratą jakości. Oba przypadki obniżają zysk producenta. Szacuje się, że w okresie I rzutu w przeciągu zaledwie 4 godzin pieczarki potrafią osiągnąć 15–20% przyrost masy [37,54]. Z tego powodu tak istotny jest proces szkolenia nowych pracowników.

Po zakończeniu zbiorów podłoże należy poddać dezynfekcji termicznej. W literaturze branżowej etap ten nazywany jest gotowaniem podłoża. Podłoże podgrzewa się do 70–80°C i utrzymuje taką temperaturę przez 10 godzin. Dopiero po tym zabiegu może być usunięte z hali. Podłoże poprodukcyjne często wykorzystuje się jako nawóz. Dezynfekcja dezaktywuje wirusy, eliminuje nicienie, roztocza, larwy muchówek i konkurencyjne grzyby – zatem podłoże staje się nawozem bezpiecznym i nie stwarza zagrożenia infekcji. Dodatkowo ma zdolności odkwaszające i nie zawiera kiełkujących nasion chwastów. Tabela 1.2 zawiera listę składników nawozowych obecnych w odpadowym podłożu pieczarkarskim.

Tabela 1.2 Zawartość składników nawozowych w podłożu pieczarkarskim z okrywą [21]

Charakterystyka podłoża pieczarkarskiego z okrywą	
Substancja organiczna	22–34% suchej masy
Składniki mineralne	66–78% suchej masy
pH	5,8–6,2
Azot	1,3–1,8% suchej masy
Fosfor	0,1–0,4% suchej masy
Potas	0,5–1,8% suchej masy
Wapń	6–15% suchej masy
Magnez	0,2–0,4% suchej masy
Sód	0,05–0,2% suchej masy

³ Przyjęto średni kurs EUR równy 4,2684 PLN wg NBP z dnia 31.03.2016.

W ostatnich latach rośnie zainteresowanie wykorzystaniem zużytego podłoża pieczarkarskiego na cele energetyczne. Wilgotność podłoża po produkcji jest mocno zróżnicowana i wynosi 60–77%, natomiast kaloryczność określono w przedziale 3,2–4,6 MJ·kg⁻¹. Po osuszeniu materiału kaloryczność wzrasta do 12,1–13,7 MJ·kg⁻¹ [24,96]. Podłoże po osuszeniu można poddać peletyzacji [65,66]. W trakcie procesu peletyzacji możliwe jest wymieszanie podłoża z innymi odpadami przemysłowymi, np. odpadami węglowymi [16,17].

1.3.3. Znaczenie mikroklimatu w produkcji

Mikroklimat jest jednym z najważniejszych czynników w produkcji pieczarek, od początku aż do zakończenia uprawy. Odgrywa kluczową rolę także na etapie przygotowania podłoża. Rozwój mikroorganizmów biorących udział w produkcji jest możliwy tylko przy stworzeniu dla nich optymalnych warunków otoczenia.

Faza wegetatywna uprawy, którą tworzą etapy przerastania podłoża i okrywy, jest w dużej mierze zależna od warunków termicznych. Grzybnia przestaje wraść w okrywę jeśli temperatura podłoża przekroczy 28°C. Im większa ilość grzybni w okrywie tym więcej zawiązków w późniejszym etapie.

To właśnie mikroklimat jest pewnego rodzaju programatorem, który musi przełączyć organizm grzyba na tryb rozwoju generatywnego. Skutki decyzji podjętych na etapie szoku będą zauważalne przy owocowaniu. Na proces wiązania wpływa kombinacja kilku czynników:

- stopień przerośnięcia podłoża i okrywy, czyli ilość i umiejscowienie grzybni,
- tempo obniżania temperatury powietrza,
- cyrkulacja powietrza,
- stężenie dwutlenku węgla.

Łagodniejsze obniżanie temperatury powietrza spowoduje powstanie mniejszej ilości zawiązków w dłuższym czasie, natomiast szybsze zmiany będą skutkowały mocniejszym wiązaniem zawiązków w krótszym czasie. Zbyt dużo zawiązków powstałych w jednej generacji spowoduje bardzo duże zagęszczenie grzybów na powierzchni uprawy. To z kolei spowoduje trudności z odparowaniem wody, usuwaniem zgromadzonych nad powierzchnią okrywy gazów oraz brak miejsca na dalszy wzrost owocników, przez co plon będzie niższy. Zbyt obfite owocowanie zintensyfikuje produkcję ciepła, dwutlenku węgla oraz pary wodnej, co dla układu regulacji mikroklimatu będzie źródłem dodatkowych zakłóceń, które należy skompensować. Chcąc uzyskać owocniki drobne temperatura powietrza po szoku powinna wynosić 16°C, natomiast dla większych grzybów przyjmuje się 18°C. Wraz ze wzrostem stężenia CO₂ osłabia się wiązanie. Jeśli uprawa prowadzona jest pod kątem przetwórstwa wiązanie musi być bardzo intensywne. Oznacza to obniżenie stężenia CO₂ w czasie szoku

do wartości 800 ppm. Ukierunkowanie produkcji na rynek świeży będzie wymagało utrzymywania stężenia tego gazu na wyższym poziomie. Oprócz regulacji liczby zawiązanych owocników na jednostce powierzchni przy pomocy dwutlenku węgla reguluje się również kształt grzybów. Jest to możliwe już na etapie zawiązków, po wyraźnym rozgraniczeniu kapelusza od trzonka. Przyjmuje się, że stosunek wielkości kapelusza do trzonka powinien wynosić 1:3. Przy zbyt wysokim stężeniu CO₂ powstają owocniki o wydłużonych trzonkach (rys. 1.20). W pieczarkarniach mniejszych, niewyposażonych w mierniki CO₂ technolodzy oceniają jego stężenie właśnie na podstawie kształtu zawiązków.

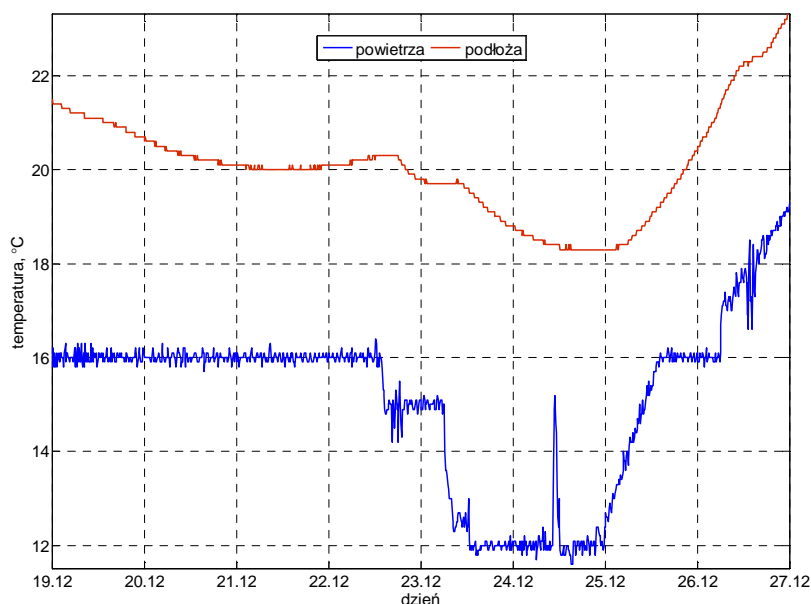


Rys. 1.20 Wpływ stężenia dwutlenku węgla na cechy morfologiczne owocników pieczarki: stężenie optymalne – owocnik prawy, stężenie zbyt wysokie – owocnik lewy i środkowy [75]

W trakcie owocowania należy utrzymywać stałe odparowanie wody z powierzchni owocników oraz zapas wody w okrywie. Parowanie umożliwia transport substancji odżywczych z podłoża, poprzez grzybnię do owocników. Na odparowanie wpływa między innymi ruch powietrza nad powierzchnią uprawy. Zbyt intensywny przepływ powietrza obniży aktywność podłoża, natomiast za mały ruch powietrza zahamuje proces odparowania. Przyjęto zasadę, że na każdy kilogram rosnących grzybów powinien przypadać 1 m³ świeżego powietrza, a każde podniesienie temperatury powietrza o 1°C powyżej 16°C zwiększa zapotrzebowanie o 20%. Utrzymanie właściwej różnicy między temperaturą podłoża a powietrza jest warunkiem koniecznym umożliwiającym wzrost grzybów. Wysokość temperatur decyduje z kolei o tempie wzrostu, wyższe temperatury zapewniają szybszy wzrost. Maksymalna tolerowana wilgotność względna powietrza jest skorelowana z aktywnością podłoża (jest to różnica między temperaturą podłoża a powietrza). Im jest ona większa, tym większa może być wilgotność, jednak graniczną wartością jest 90–92%. Należy jednak pamiętać, że większa wilgotność oznacza słabsze odparowanie wody. Z drugiej strony,

utrzymywanie niskiego poziomu wilgotności, poniżej 80–85%, może spowodować spękanie powierzchni kapelusza i obniżenie plonu o $2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$.

Technolog prowadzący może planować uprawę w taki sposób aby spełnić warunki dyktowane przez rynek pracy. Większość pracowników niechętnie podejmuje pracę na przykład w dni świąteczne. Cykl uprawy pieczarek jest relatywnie krótki w porównaniu z uprawami polowymi. Można zatem zaplanować taki moment rozpoczęcia uprawy, aby uniknąć prowadzenia najbardziej pracochłonnych czynności w weekend, np. zbioru. Sterowanie mikroklimatem daje duże możliwości wpływania nie tylko na jakość pieczarek, ale także pozwala opóźnić lub przyspieszyć zbiór o kilka dni. Za przykład może posłużyć przypadek z rys. 1.21.



Rys. 1.21 Próba przesunięcia terminu zbioru w czasie poprzez zmianę warunków mikroklimatycznych

Jest to przebieg temperatur powietrza i podłoża w końcowym etapie szoku oraz początkowym okresie owocowania. W tym przypadku działaniem nietypowym było obniżenie temperatury powietrza z 16°C do 12°C na przełomie 22–26 grudnia. Spowodowało to również obniżenie temperatury podłoża o 2°C . Celem zabiegu było opóźnienie rozpoczęcia zbioru ze względu na święto Bożego Narodzenia. Obniżając temperaturę do wyjątkowo niskiego poziomu, niespotykanego w uprawie szablonowej, udało się spowolnić wzrost owocników dzięki czemu pracownicy mogli wykonać zbiór dopiero po świątach.

1.4. Modelowanie mikroklimatu

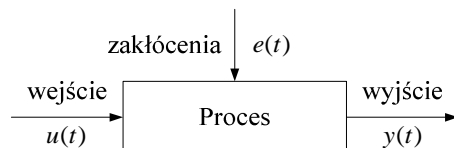
Proces klimatyzacji jest złożonym systemem zbudowanym z kilku podsystemów. Jednym z ważniejszych podsystemów jest środowisko wewnętrzne – mikroklimat, który w sposób istotny różnicuje wzajemnie systemy klimatyzacji. Do analizy interakcji między podsystemami, np. środowiska wewnętrznego i sterowania, niezbędne jest opracowanie modeli tych podsystemów. Ich znajomość pozwoli na scharakteryzowanie mikroklimatu w produkcji pieczarek jako obiektu regulacji.

Patrząc przez pryzmat sposobu w jaki model jest konstruowany można wyróżnić dwa główne podejścia w modelowaniu. Są to modele fizykalne oraz modele powstałe w wyniku identyfikacji. Podobną klasyfikację modeli przedstawia Janiszowski wyróżniając grupę modeli symulacyjnych (opartych na równaniach różniczkowych opisujących zjawiska fizyczne) oraz grupę modeli parametrycznych [29].

Pierwsze podejście to opis zjawisk z wykorzystaniem praw fizyki. Uwzględnia się tutaj bilans energetyczny, przepływy ciepła, gazów i wody oraz wzajemne interakcje pomiędzy nimi. Bierze się również pod uwagę procesy biologiczne zachodzące w roślinach lub podłożu, na którym rosną [45,61,90]. Przykładem modelu opracowanego w ten sposób jest Gembloux Dynamic Greenhouse Climate Model (GDGCM). Jest to uniwersalny model wykorzystywany w uprawie wielu roślin. Mikroklimat szklarni w modelu GDGCM jest odwzorowany przy pomocy 7 warstw wewnętrznych (reprezentujących podłoże, roślinność, powietrze oraz pokrycie szklarni) oraz 3 warstw zewnętrznych (symulujących otoczenie obiektu). W każdej z warstw w formie równań różniczkowych ujęte są zyski lub straty ciepła spowodowane promieniowaniem słonecznym, promieniowaniem w paśmie dalekiej podczerwieni, przewodzeniem lub konwekcją. Uwzględniona jest również wymiana masy spowodowana parowaniem [85,86,95]. Są też modele utworzone do konkretnej grupy upraw lub nawet uprawy konkretnego gatunku roślin jak na przykład model TOMGRO. Był on wielokrotnie używany jako narzędzie służące optymalizacji układu regulacji w szklarniach nastawionych na produkcję pomidorów [11]. Dokładność tego typu modeli jest zazwyczaj bardzo wysoka, jednak wymagają one doświadczenia w doborze dużej liczby współczynników. Nie zawsze autorzy udostępniający swoje modele do użytku powszechnego dają wystarczająco precyzyjne wskazówki co do sposobu doboru tychże współczynników [10].

Wspomniane modele są jedynie przykładami podejścia do problemu modelowania bazującego na prawach fizyki. Literatura w tym zakresie jest bardzo bogata. Często zdarza się, że modele wcześniej opracowane są po kilku latach aktualizowane przez samych autorów lub modyfikowane przez innych badaczy [99]. Można jednak zauważyć olbrzymią dysproporcję w liczbie dostępnych prac na temat modelowania mikroklimatu szklarni i mikroklimatu pieczarek.

Tak długo jak opracowane modele służą jedynie prowadzeniu badań symulacyjnych ich rozmiar i ilość wymaganych obliczeń nie ma większego znaczenia. Sytuacja jednak komplikuje się w chwili, gdy decydujemy się na wykorzystanie ich w układach regulacji zawierających modele procesu. Wymaga to implementacji w sterownikach PLC lub innych urządzeniach tego typu, złożonych i zawiłych struktur samych modeli. Modele o takim przeznaczeniu powinny mieć oszczędną strukturę, zapewniającą jak najmniejszą liczbę obliczeń. Taką właściwość mają modele wyznaczone drugim sposobem modelowania – poprzez identyfikację. Tutaj finalnym efektem jest również powiązanie matematycznymi zależnościami wszystkich sygnałów, jednak punktem startowym nie jest wiedza *a priori* lecz dane eksperymentalne. Powstały w taki sposób model powinien być łatwy do wykorzystania jako element układu regulacji. Zatem eksperyment należy zaplanować w taki sposób, aby zebrane dane pozwalały opisać w pełni badany obiekt. Model taki można przedstawić ogólnie w postaci schematu blokowego (rys. 1.22), wyróżniając zmienne w czasie sygnały: wejściowe $u(t)$, wyjściowe $y(t)$ oraz zakłóceń $e(t)$. Wszystkie parametry, które utrudniały proces modelowania oparty na prawach fizyki, są zawarte w sposób niejawnny w postaci wewnętrznych parametrów modelu. Ujawnia się tutaj podstawowa wada identyfikacji jako metody modelowania. Polega ona na trudności w skojarzeniu wewnętrznych parametrów modelu z rzeczywistymi parametrami obiektu.



Rys. 1.22 Obiekt identyfikacji jako obiekt sterowania

Klasyfikacji modeli można dokonać zazwyczaj przez perspektywę jakiejś konkretnej właściwości, która różnicuje modele. Takich klasyfikacji oczywiście może być bardzo dużo, jednak do najpopularniejszych klas modeli można zaliczyć [78]:

- modele jednowymiarowe o jednym wejściu i jednym wyjściu (SISO, z ang. Single Input Single Output) oraz wielowymiarowe (SIMO, MISO, MIMO),
- modele liniowe oraz nieliniowe,
- modele parametryczne oraz nieparametryczne,
- modele o parametrach stałych w czasie oraz o parametrach w czasie zmiennych,
- modele w dziedzinie czasu oraz w dziedzinie częstotliwości,
- modele z czasem dyskretnym oraz z czasem ciągłym,
- modele deterministyczne oraz stochastyczne.

Spośród wymienionych klas dla mikroklimatu najczęściej konstruowanymi są modele parametryczne opisywane w dziedzinie czasu o charakterystyce liniowej [2,12,56].

Jeśli strukturę modelu oznaczymy jako M , a wektor wewnętrznych parametrów modelu jako θ , wówczas powstanie model $M(\theta)$

$$M(\theta): y(t) = G(z, \theta)u(t - n_k) + H(z, \theta)e(t) \quad (3)$$

gdzie:

θ – wektor parametrów modelu,

$y(t)$ – n_y -wymiarowe wyjście w chwili t ,

$u(t)$ – n_u -wymiarowe wejście w chwili $t - n_k$,

z – operator opóźnienia, dla którego $z^{-1}u(t) = u(t - 1)$,

$G(z, \theta)$ – filtr o wymiarach $(n_y|n_u)$,

$H(z, \theta)$ – filtr o wymiarach $(n_y|n_u)$.

Ograniczając równanie 3 do jednego sygnału wejścia i jednego sygnału wyjścia można je zapisać również w postaci

$$A(z)y(t) = \frac{B(z)}{F(z)}u(t - n_k) + \frac{C(z)}{D(z)}e(t) \quad (4)$$

Wielomiany $A(z)$, $B(z)$, $C(z)$, $D(z)$ oraz $F(z)$ mają postać

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_a} a_i z^{-i} \\ B(z) &= \sum_{i=1}^{n_b} b_i z^{-i+1} \\ C(z) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_c} c_i z^{-i} \\ D(z) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_d} d_i z^{-i} \\ F(z) &= 1 + \sum_{i=1}^{n_f} f_i z^{-i} \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie:

n_a, n_b, n_c, n_d, n_f – stopnie poszczególnych wielomianów.

W takim przypadku wektor parametrów θ będzie równy

$$\theta = (a_1, \dots, a_{n_a}, b_1, \dots, b_{n_b}, c_1, \dots, c_{n_c}, d_1, \dots, d_{n_d}, f_1, \dots, f_{n_f})^T \quad (6)$$

Z równań (3) i (4) można wywnioskować, że:

$$G(z, \theta) = \frac{B(z)}{A(z)F(z)} \quad (7)$$

$$H(z, \theta) = \frac{C(z)}{A(z)D(z)}$$

W zależności od doboru stopni wielomianów otrzymuje się modele o różnych strukturach:

- AR (z ang. AutoRegressive), dla $n_b = n_c = n_d = 0$,
- MA (z ang. Moving-Average), dla $n_a = n_b = n_d = 0$,
- ARMA (z ang. AutoRegressive-Moving-Average), dla $n_b = n_d = 0$,
- FIR (z ang. Finite Impuls Response), dla $n_a = n_c = n_d = n_f = 0$,
- ARX (z ang. AutoRegressive with eXogenous input), dla $n_c = n_d = n_f = 0$,
- ARARX, dla $n_c = n_f = 0$,
- ARMAX (z ang. AutoRegressive Moving Average with eXogenous input), dla $n_d = n_f = 0$,
- ARARMAX, dla $n_f = 0$,
- OE (z ang. Output Error), dla $n_a = n_c = n_d = 0$,
- BJ (z ang. Box-Jenkins), dla $n_a = 0$.

W badaniach związanych z modelowaniem mikroklimatu pomieszczeń najczęściej występują struktury ARX, ARMAX, OE oraz BJ [6,48,53,86]. Jednak na szczególną uwagę zasługuje model o strukturze ARX, ponieważ jest ona najszerszej wykorzystywana przez ekspertów [33,44]. W publikacjach ta struktura charakteryzuje się dokładniejszym odwzorowaniem rzeczywistych procesów w porównaniu ze strukturami typu ARMAX, OE czy BJ [86]. Struktura ARX jest także wykorzystywana jako baza do budowy modeli nieliniowych NARX. Modele te składają się zazwyczaj z dwóch członów: liniowego i nieliniowego. Rolę członu liniowego może spełniać sieć neuronowa lub sieci SVM [53,73,85].

Inną niezmiernie ważną czynnością związaną z budowaniem modeli parametrycznych jest dobór wektora regresorów. Dopasowując równanie (4) do struktury ARX otrzymamy

$$A(z)y(t) = B(z)u(t - n_k) + e(t) \quad (8)$$

co jest równoznaczne z zapisem

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \quad (9)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\varphi}$ – wektor regresorów.

Wektor regresorów $\boldsymbol{\varphi}$ przyjmuje wtedy postać:

$$\boldsymbol{\varphi}(t) = (y(t-1), \dots, y(t-n_a), u(t-n_k), \dots, u(t-n_k-n_b))^T \quad (10)$$

Sposób doboru elementów wektora regresorów, czyli wybór parametrów n_a , n_b oraz opcjonalnie n_k , może być różny. Jednym z podejść jest zastosowanie algorytmu wyszukiwania wyczerpującego. W podejściu tym należy przebadać wszystkie możliwe kombinacje parametrów [71,73]. Przykładowo, jeśli w modelu SISO ograniczymy obszar wyboru parametrów $n_a, n_b \in \{1, \dots, 10\}$ oraz n_k przyjmiemy stałe to otrzymamy wówczas 100 różnych modeli ARX. W przypadku modelu o dwóch wejściach pula modeli zwiększy się do 1000. Ze względu na czasochłonność algorytmu wyszukiwania wyczerpującego niektórzy stosują alternatywne metody doboru stopni poszczególnych wielomianów. Jedną z metod wymaga przyjęcia równych stopni wielomianów $A(z)$ i $B(z)$, czyli $n_a = n_b$ [13,28]. Znacząco ogranicza się w ten sposób liczbę możliwych do zbudowania modeli. Przy tym podejściu zbiór modeli z poprzedniego przykładu będzie się składał z 10 elementów, niezależnie od przyjętej liczby sygnałów wejściowych. Jednak jeżeli najlepszy z przyjętego przedziału model będzie miał parametry $n_a \neq n_b$, wówczas nie zostanie on wyszukany przez ten algorytm. W literaturze można też znaleźć prace z odgórnie ustalonymi stopniami wielomianów [86]. Niektórzy autorzy w swoich badaniach optymalizują dodatkowo wektor regresorów $\boldsymbol{\varphi}$ po wstępnym ustaleniu jego składowych [42,57]. Przy użyciu narzędzi statystycznych dokonuje się selekcji negatywnej regresorów usuwając te najmniej istotne dla modelu.

Ocenę modelu dokonuje się zazwyczaj poprzez obliczenie wskaźników mówiących o stopniu dopasowania modelu do danych rzeczywistych. Najpopularniejszymi wskaźnikami są: wskaźnik dopasowania fit (11), błąd średniokwadratowy MSE (12), współczynnik determinacji R^2 (13) oraz kryterium informacyjne Akaike'a AIC (14).

$$\text{fit} = \left(1 - \frac{\|y(t) - \hat{y}(t)\|_2}{\|y(t) - \bar{y}(t)\|_2} \right) \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{MSE} = \frac{\|y(t) - \hat{y}(t)\|_2^2}{N} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{\|\hat{y}(t) - \bar{y}(t)\|_2^2}{\|y(t) - \bar{y}(t)\|_2^2} \quad (13)$$

$$\text{AIC} = \log(V) + \frac{2d}{N} \quad (14)$$

gdzie:

$y(t)$ – wartość wyjściowa (zmierzona) w chwili t ,

$\hat{y}(t)$ – wartość wyjściowa z modelu w chwili t ,

$\bar{y}(t)$ – uśredniona wartość wyjściowa (zmierzona) do chwili t ,

N – liczba punktów pomiarowych,

V – funkcja strat,

d – liczba współczynników modelu.

Wskaźnik fit jest wyrażony w procentach, natomiast MSE, R^2 i AIC są bezmianowe. Im większa wartość wskaźników fit i R^2 oraz mniejsza wartość MSE i AIC tym lepsze dopasowanie. Wartość wskaźnika fit dąży do 100%, R^2 do jedynki a minimalną wartością MSE jest zero. Funkcją strat w kryterium AIC jest zazwyczaj MSE.

1.5. Podsumowanie przeglądu literatury

Polski sektor produkcji grzybów rozwija się nieprzerwanie od kilkunastu lat. Pieczarka jest relatywnie droga w porównaniu z innymi świeżymi warzywami. Zachęca to producentów do intensyfikacji produkcji a także szukania zagranicznych rynków zbytu, gdzie cena pieczarek jest jeszcze bardziej atrakcyjna. Najlepiej odzwierciedla to dodatni bilans handlowy sektora grzybów. Wielkość eksportu pieczarek przewyższa kilkudziesięciokrotnie wielkość importu.

Należy jednak pamiętać, że chłonność każdego rynku jest ograniczona. Ciągłe zwiększanie wolumenu produkcji powoduje nasycanie kolejnych rynków. Sytuacja rynkowa jest niezwykle dynamiczna i wpływa na nią wiele czynników zarówno ekonomicznych (np. kursy walut), politycznych (np. relacje dyplomatyczne) jak i prawnych (regulacje prawne np. dotyczące przeciwdziałania uciążliwościom zapachowym, tzw. odorów). Przykładem zdarzenia, które nagle i w istotny sposób zaburzyło chwiejną równowagę rynkową jest rosyjskie embargo na produkty rolno-spożywcze. Zdarzenia tego typu mają wspólną cechę, są trudne lub wręcz niemożliwe do przewidzenia w dłuższej perspektywie. Zamknięte bądź przesycone rynki zmuszają do eksportowania produkcji w odległe rejony. Może to prowadzić do sytuacji, w której koszt transportu produktu do oddalonego rynku będzie na tyle wysoki, że produkcja stanie się nierentowna.

Analiza sytuacji ekonomicznej nasuwa ważny wniosek. Polscy producenci chcąc utrzymać pozycję największego światowego eksportera pieczarek muszą poszukiwać nowych źródeł przewagi konkurencyjnej. Dotychczasowa strategia, w której przewaga konkurencyjna opierała się na efekcie skali produkcji oraz niskich kosztach pracy i energii, za pewien czas może okazać się nieskuteczna. Istnieje zatem uzasadniona potrzeba prowadzenia badań wspierających produkcję pieczarek w Polsce. Z pewnością olbrzymią rolę odegrają tutaj poszukiwania innowacyjnych rozwiązań z szerokiego spektrum dziedziny inżynierii produkcji.

Produkcja pieczarek jest interesującym obszarem do prowadzenia badań naukowych. Zakres badań jest bardzo szeroki. Jest to przede wszystkim produkt spożywczy, więc naturalnym kierunkiem jest badanie składu chemicznego zarówno pieczarek

świeżych jak i przetworzonych oraz określenie ich wartości odżywczych [88]. Uprawę pieczarek można badać pod kątem ekonomiki produkcji analizując np. dochodowość produkcji [82] lub wyznaczając próg rentowności i marży bezpieczeństwa [81]. Prowadzone są również badania w kierunku doskonalenia zabiegów technologicznych analizując choćby różne sposoby ręcznego zbioru grzybów [19,20]. Trwają także prace nad ulepszeniem procesu produkcji podłoża [36,84] oraz metodami jego recyklingu. Nie słabnie też zainteresowanie naukowców wykorzystaniem robotów w procesach zbioru i pakowania [18,31,62].

Jako osobną kategorię należy wyróżnić badania procesu regulacji mikroklimatu. Dotyczą one zarówno modelowania mikroklimatu pieczarkarni jak również projektowania samych układów regulacji [92,93]. Mikroklimat pełni rolę narzędzia, za pomocą którego kształtowana jest ostateczna forma produktu – pieczarki. To od parametrów mikroklimatu zależy czy wyprodukowanych grzybów będzie dużo o niewielkich rozmiarach, czy też mniej lecz z kapeluszami o większych średnicach. Utrzymanie parametrów mikroklimatu na wymaganym poziomie jest możliwe dzięki wykorzystaniu regulatorów mikroprocesorowych. Regulator do właściwego działania potrzebuje dokładnej parametryzacji. Wymaga ona, aby wcześniej jak najdokładniej rozpoznać właściwości dynamiczne regulowanego obiektu. Przeprowadzenie identyfikacji dynamicznej i budowa modeli mikroklimatu stają się zatem niezbędne.

Najwięcej prac związanych z modelowaniem mikroklimatu dotyczy szklarni. Nie jest jednak możliwe bezpośrednie przeniesienie tych modeli do warunków uprawy pieczarek. Główną przyczyną jest odmienna fizjologia roślin. Sygnały, które należy uwzględnić w modelu będą również odmienne. Przykładem może być kwestia sztucznego doświetlania roślin lub ochrona przed zbyt intensywnym promieniowaniem słonecznym. Z racji tego, że grzyby nie dokonują fotosyntezy sygnały te w modelu można pominąć. Zasadnicze różnice można dostrzec także w przypadku czynników mikroklimatu wspólnych dla szklarni i pieczarkarni. Za przykład może posłużyć stężenie CO₂. Rośliny szklarniowe wymagają tzw. dokarmiania, czyli dostarczania dodatkowego dwutlenku węgla, podczas, gdy w uprawie pieczarek nadmierne stężenie tego gazu reguluje się poprzez usuwanie go z hali produkcyjnej. Obecne w literaturze opracowania modeli mikroklimatu pieczarkarni są konstruowane w oparciu o prawa fizyki [94]. Ze względu na swoją dokładność bardzo dobrze sprawdzają się w badaniach symulacyjnych jednak złożona struktura znacząco utrudnia ich praktyczne wykorzystanie. Modele parametryczne powstałe w wyniku identyfikacji mają prostszą strukturę, zatem ich wartość użytkowa jest większa. Problemem jest natomiast powiązanie współczynników modelu z parametrami technologicznymi hali uprawowej.

Znaczenie modelowania w procesie produkcyjnym podkreślają światowej klasy specjaliści jak np. Jack Little – prezydent firmy MathWorks oraz twórca pierwszych wersji programu MATLAB oraz biblioteki Control System Toolbox. Według Little zależność pomiędzy kosztem usunięcia błędu a etapem, na którym błąd został wykryty jest nieliniowa. Gdyby przyjąć, że koszt usunięcia błędu na etapie projektowania wynosi 1 to na etapie implementacji równy jest 6,5, w fazie testowania 15, a w czasie pracy układu 100 [43].

2. Problem naukowy, cel i zakres pracy

Na podstawie analizy literatury klarują się następujące wnioski:

- Rynek produkcji pieczarek w Polsce rozwija się w sposób dynamiczny nieprzerwanie od kilkunastu lat.
- Uprawa pieczarek wymaga kształtowania mikroklimatu, opisanego przez kilka wielkości fizycznych (temperaturę i wilgotność powietrza, temperaturę podłoża, stężenie dwutlenku węgla) zgodnie ze ściśle określonym przebiegiem w czasie.
- Wielkości fizyczne opisujące środowisko wewnętrzne są ze sobą sprzęgnięte.
- Kształtowanie mikroklimatu wymaga zastosowania wielowymiarowego, programowego układu regulacji wyposażonego w moduł generujący referencyjne wartości zadane.
- Synteza takiego układu regulacji wymaga opracowania modelu opisującego zasadnicze zjawiska zachodzące w procesie uprawy, które kształtują mikroklimat rozumiany w tym wypadku jako obiekt regulacji.
- Nie ma narzędzia umożliwiającego prognozowanie efektów decyzji dotyczących sterowania mikroklimatem pieczarkarni.

Przedstawione wnioski wskazują na konieczność podjęcia prac badawczych ukierunkowanych na budowę modeli mikroklimatu pieczarkarni. Na podstawie tych przesłanek określono cel pracy: **opracowanie modelu odwzorującego dynamikę mikroklimatu hali w produkcji pieczarek**. Osiągnięcie celu wymaga realizacji kilku celów cząstkowych:

- Selekcja regresorów modelu mikroklimatu.
- Identyfikacja właściwości dynamicznych mikroklimatu.
- Określenie zależności między parametrami charakterystycznymi uprawy a współczynnikami odpowiadającymi za dynamikę modelu.

Opracowany w efekcie pracy model będzie pomocnym narzędziem w projektowaniu systemów automatycznej regulacji. Może być również wykorzystany jako element predykcyjnych układów regulacji. Model opisujący dynamikę mikroklimatu pieczarkarni może być także użyty w działalności szkoleniowej. Na symulowanej komputerowo uprawie technolodzy produkcji będą mogli pozyskać pierwsze doświadczenie w zakresie obsługi układów regulacji.

Wnioski wynikające z literatury pozwalają sformułować pewne przypuszczenia wymagające weryfikacji badawczej. Zgodnie z definicją takie przypuszczenia noszą nazwę hipotez [51]. W pracy postawiono dwie hipotezy badawcze.

H1: *Proces kształtowania mikroklimatu hali uprawowej jest układem niestacjonarnym, ale można go podzielić na etapy opisywalne układami stacjonarnymi.*

H2: *Współczynniki modeli parametrycznych mikroklimatu produkcji pieczarek są zależne od parametrów charakterystycznych uprawy.*

Specyfika produkcji pieczarek, a w szczególności zachodzące w jej trakcie zjawiska fizyczne, wskazuje na konieczność podziału procesu uprawy na pewne typowe, charakterystyczne etapy. Dla każdego z etapów powinien zostać wyznaczony model lokalny. Ewentualne różnice współczynników poszczególnych modeli lokalnych będą decydowały o niestacjonarnym charakterze układu. W teorii uznaje się, że opisanie procesu za pomocą kilku modeli lokalnych jest zwykle bardziej precyzyjne niż pojedynczy model globalny. Wyznaczenie modelu globalnego bardzo często wymaga zastosowania wielu uproszczeń [29].

Sprawdzenie postawionych hipotez wymaga przeprowadzenia badań własnych, których zakres obejmuje:

- Archiwizację danych pomiarowych. Dane pochodziły z 5 pieczarkarni zlokalizowanych w województwach mazowieckim i lubelskim.
- Określenie parametrów różnicujących hale produkcyjne.
- Określenie czynników wpływających na mikroklimat wnętrza hali.
- Ustalenie typów modeli oraz dobór ich struktury.
- Ocena zbudowanych modeli.
- Analiza wpływu parametrów technologicznych na współczynniki modeli.

3. Badania własne

3.1. Charakterystyka obiektów badań

Dane pomiarowe pochodziły z 5 pieczarekarni. Oznaczenia poszczególnych obiektów to A1, A2, B, C oraz D. Widok elewacji jednego z obiektów przedstawia rys. 3.1. Większość pieczarekarni zlokalizowana jest w województwie mazowieckim w miejscowościach Łosice (A1, A2) oraz Nowosielec (B, C). Właściciele obiektów zrzeszeni są w grupie producenckiej East Mushrooms Sp. z o.o. Skala produkcji całej grupy w 2013 roku wynosiła ok. 170 t grzybów tygodniowo. Obecnie z pewnością moce produkcyjne są większe ze względu na rozbudowę poszczególnych pieczarekarni. Jeden z obiektów (D) zlokalizowany jest w województwie lubelskim w miejscowości Osiny. Parametry charakteryzujące pieczarekarnie przedstawia tabela 3.1.



Rys. 3.1 Budynek pieczarekarni A1

Tabela 3.1 Parametry charakterystyczne uprawy

	Pieczarekarnia				
	A1	A2	B	C	D
Liczba hal	6	6	6	6	12
Długość hali [m]	30,5	30,5	25	29	21
Szerokość hali [m]	10	10	10	7	12
Wysokość hali [m]	4	4	4	4	5
Kubatura hali [m ³]	1220	1220	1000	812	1260
Liczba półek	5	5	5	4	6
Liczba regałów	3	3	3	2	4
Szerokość regału [m]	1,34	1,34	1,34	1,34	1,34
Długość regału [m]	27	27	22,2	25,2	18
Powierzchnia uprawy [m ²]	540	540	450	270	579
Stosunek kubatury hali do powierzchni uprawy	2,259	2,259	2,222	3,007	2,176

W pieczarkarniach A1, A2, B i C zainstalowane są regulatory mikroklimatu firmy LAB-EL, natomiast obiekt D bazuje na rozwiązaniach firmy AEM. Zakres bazy pomiarowej dostępnej we wszystkich obiektach jest podobny. Zazwyczaj rejestrowane są sygnały:

- $U_{ch / n / nw}$ – sygnał nastawczy siłownika sterującego pracą chłodnicy / nagrzewnicy / nagrzewnicy wstępnej [%],
- CO_2 – zawartość dwutlenku węgla w powietrzu wewnątrz hali produkcyjnej [ppm],
- SPO_2 – wartość zadana CO_2 [ppm],
- U_{km} – sygnał nastawczy siłownika sterującego pracą przepustnic komory mieszania, wartość 0 oznacza brak dostępu świeżego powietrza, a wartość 100 pełne wykorzystanie świeżego powietrza, bez recyrkulacji powietrza z hali [%],
- $U_{naw / osu}$ – sygnał nastawczy nawilzacza / osuszacza [%],
- RH – wilgotność bezwzględna powietrza wewnątrz hali produkcyjnej [%],
- SPRH – wartość zadana RH [%],
- $T_{ch / nw}$ – temperatura powietrza mierzona za chłodnicą / nagrzewnicą wstępną [°C],
- T_n – temperatura powietrza nawiewanego do hali produkcyjnej [°C],
- T_{pod} – uśredniona wartość temperatury podłoża mierzonej w 4–6 punktach [°C],
- SPT_{pod} – wartość zadana T_{pod} [°C],
- T_{pow} – temperatura powietrza wewnątrz hali produkcyjnej [°C],
- SPT_{pow} – wartość zadana T_{pow} [°C],
- U_w – sygnał nastawczy falownika sterującego pracą wentylatora [%].

Mikroklimat panujący wewnątrz hali produkcyjnej będzie zatem opisywany sygnałami T_{pod} , T_{pow} , RH, CO_2 . Do modelowania niezbędne są także sygnały T_n oraz nastawcze, mające bezpośredni wpływ na warunki mikroklimatyczne U_{km} , U_{osu} , U_{naw} .

Układ do pomiaru temperatur wykorzystuje czujniki Pt1000. W układzie pomiarowym wilgotności względnej powietrza wykorzystywane są dwa czujniki Pt1000 oraz tablice psychrometryczne. Układ pomiarowy stężenia dwutlenku węgla zawiera czujnik NDIR (z ang. *Non-Dispersive Infrared*). Ze względu na wysoki koszt układu pomiarowego wykorzystuje się multiplexer. Oznacza to, że jeden czujnik wykonuje pomiary dla kolejnych próbek powietrza pochodzących z różnych hal [47].

Zbiór danych składa się z 27 okresów. Okresem nazwany jest jeden pełny cykl produkcyjny trwający ok. 6 tygodni. Okres rozpoczyna się z chwilą założenia uprawy i trwa aż do usunięcia zużytego podłoża z hali. Dane pomiarowe były rejestrowane na przełomie lat 2012–2014 w różnych miesiącach roku. Szczegółowe przyporządkowanie liczby okresów do konkretnej pieczarkarni jak również przedział czasowy, w którym zarejestrowano dane przedstawia tabe-

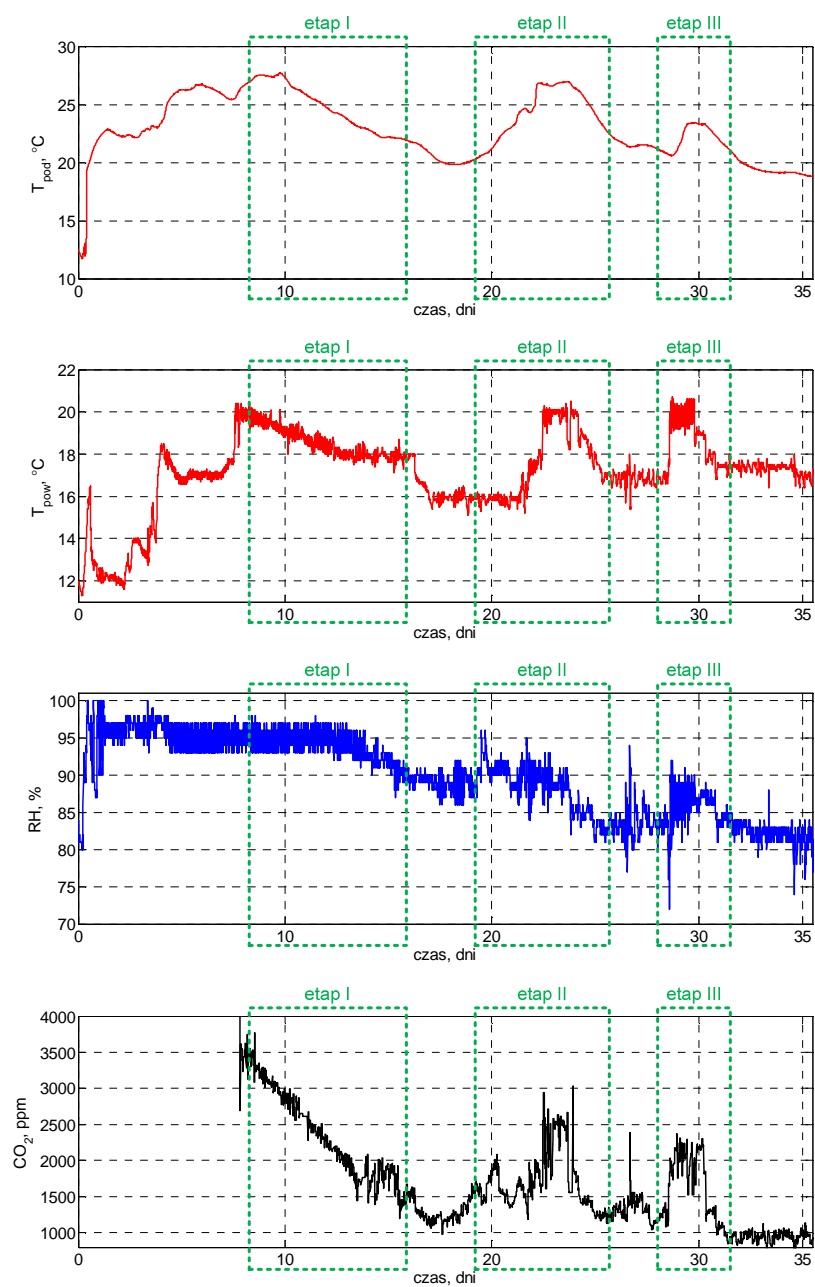
la 3.2. Pieczarkarnie A1 i A2 były identyczne zarówno pod względem konstrukcyjnym jak i technologicznym. Był to powód dla którego połączono oba zbiory tworząc wspólny zbiór A o łącznej liczbie okresów 10. Okresy od 1 do 6 odpowiadają pieczarkarni A1, natomiast od 7 do 10 pieczarkarni A2.

Tabela 3.2 Charakterystyka pomiarowej bazy danych

Pieczarkarnia	Liczba okresów	Przedział czasowy
A	10	12.2012 – 05.2014
B	6	02.2013 – 01.2014
C	7	07.2012 – 12.2013
D	4	02.2014 – 06.2014

Częstotliwość próbkowania sygnałów wynosiła 600^{-1} Hz. W każdym okresie zarejestrowano sygnały pomiarowe w ok. 5 500 próbkach czasowych. Biorąc pod uwagę jedynie 8 wybranych sygnałów, pojedynczy okres składa się z ok. 44 000 próbek pomiarowych. Zgromadzona baza danych obejmuje zatem blisko 1 200 000 próbek pomiarowych.

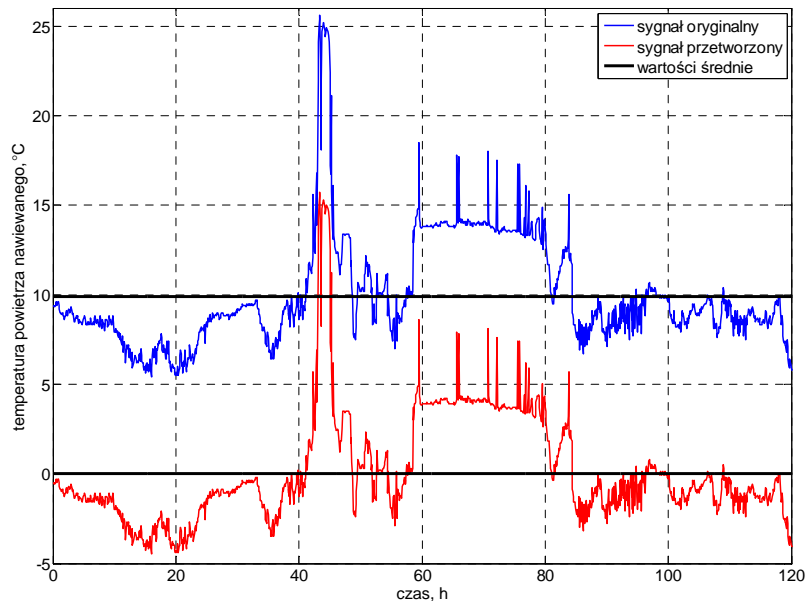
Każda uprawa przechodzi przez kilka charakterystycznych stanów. Stany te, nazywane w pracy etapami, wymagają odmiennych warunków mikroklimatycznych. Kolejne etapy poprzedzały zbiory grzybów prowadzone w tzw. rzutach I, II oraz III. Plony osiągnęte w poszczególnych rzutach są silnie zróżnicowane. Sugeruje to zmienność dynamiki mikroklimatu w czasie. Parametry modelu powinny zatem uwzględniać tę zmienność. Z tego powodu dla każdego z okresów, dla każdej pieczarkarni, obliczone zostaną trzy modele odpowiadające poszczególnym etapom. Przykładowy przebieg zmian sygnałów mikroklimatu wraz z zaznaczonymi etapami przedstawia rys. 3.2.



Rys. 3.2 Zmiany parametrów mikroklimatu w czasie całego cyklu produkcyjnego z wydzielonymi etapami

3.2. Metodyka badań

Wstępne przygotowanie danych obejmowało pomniejszenie wartości sygnału o jego średnią. W rezultacie otrzymuje się sygnał z zerową średnią (rys. 3.3).



Rys. 3.3 Przykład usunięcia wartości średniej z sygnału

Operacja ta poprawia dokładność modeli, rozumianą jako ich dopasowanie do zbioru danych pomiarowych. Usuwanie trendów jest szczególnie istotne w przypadku modeli typu OE oraz ARX. Wynika to z możliwości filtrowania zakłóceń przez obie struktury. Filtry G oraz H występujące w równaniu 7 w strukturze OE mają postać

$$G(z, \theta) = \frac{B(z)}{F(z)} \quad (15)$$

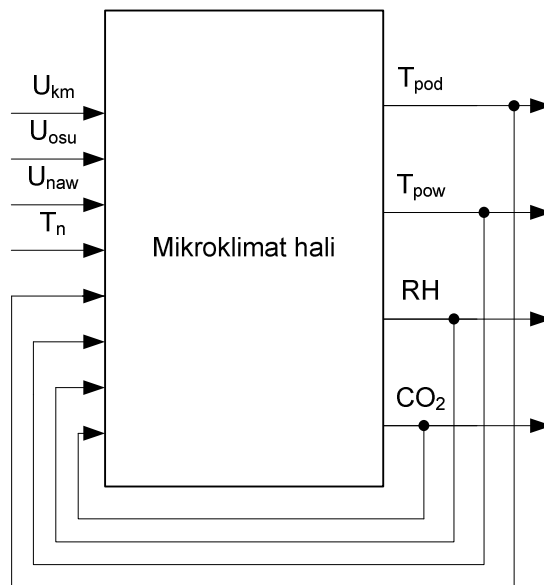
$$H(z, \theta) = 1$$

Widać zatem, że człon H nie przekształca w żaden sposób sygnału zakłóceń $e(t)$. W przypadku modelu o strukturze ARX o stopniu filtracji zakłóceń decyduje wielomian A (16).

$$G(z, \theta) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (16)$$
$$H(z, \theta) = \frac{1}{A(z)}$$

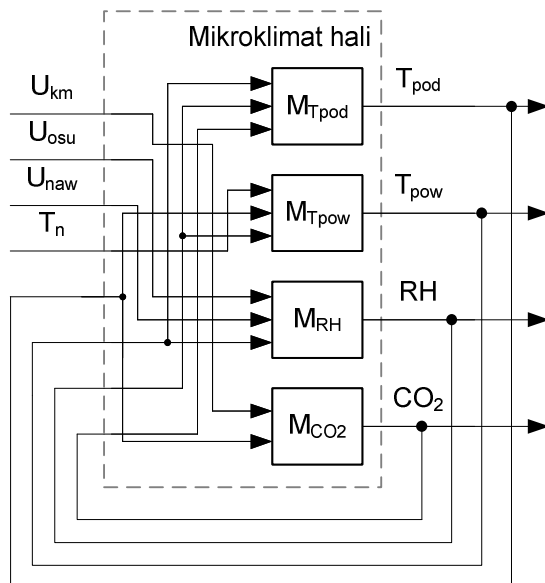
Wielomian ten występuje zarówno w filtrze G jak i H , zatem dobór jego współczynników będzie zawsze kompromisem między filtrowaniem sygnału zakłóceń $e(t)$ a przekształcaniem sygnału wymuszającego $u(t)$.

Schemat blokowy modelu mikroklimatu hali produkcyjnej przedstawia rys. 3.4. Jest to model MIMO z 4 sygnałami wejściowymi oraz 4 wyjściowymi. Parametry mikroklimatu są współzależne, dlatego też sygnały wyjściowe, tj. T_{pod} , T_{pow} , RH , CO_2 , występują także wśród sygnałów wejściowych. Takie sygnały często nazywa się sprzęgniętymi.



Rys. 3.4 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarkarni o strukturze MIMO

Warto zauważyć, że struktura MIMO jest zbudowana z kilku modeli typu MISO (rys. 3.5). Wewnętrzne parametry θ określono dla każdego modelu MISO ($M_{T_{pod}}$, $M_{T_{pow}}$, M_{RH} , M_{CO_2}) oddzielnie. Skraca to proces uczenia, czyli parametryzacji modeli.



Rys. 3.5 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarkarni zbudowany z modeli MISO

Każdy z modeli opracowano według struktury ARX, przy czym trzy z nich to modele o 3 sygnałach wejściowych a jeden o 2 wejściach. Parametry decydujące o długości wektora regresorów φ przyjęto $n_a = 3$, $n_b = [2 \ 2 \ 2]$, natomiast $n_k=1$. Ustandaryzowana struktura modelu dla wszystkich pieczarkarni, zarówno we wszystkich okresach jak i etapach, ułatwi późniejszą analizę porównawczą. Model ARX o trzech sygnałach wejściowych i jednym wyjściowym opisuje równanie 17, wektor parametrów θ równanie 18, natomiast wektor regresorów φ równanie 19.

$$A(z)y(t) = B_1(z)u_1(t) + B_2(z)u_2(t) + B_3(z)u_3(t) + e(t)$$

$$B_1(z) = b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2} \quad (17)$$

$$B_2(z) = b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}$$

$$B_3(z) = b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}$$

$$\theta = (a_1, a_2, a_3, b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}, b_{31}, b_{32})^T \quad (18)$$

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} y(t-1) \\ y(t-2) \\ y(t-3) \\ u_1(t-1) \\ u_1(t-2) \\ u_2(t-1) \\ u_2(t-2) \\ u_3(t-1) \\ u_3(t-2) \end{bmatrix} \quad (19)$$

W automatyce, opis właściwości dynamicznych sterowanego obiektu często sprowadza się do wyznaczenia transmitancji operatorowej [79,80]. Jest to matematyczny opis relacji jaka zachodzi pomiędzy sygnałem wejściowym a wyjściowym. Transmitancje nazywane są także funkcjami przejścia, ponieważ dzięki nim sygnał wejściowy przechodzi, lub określając to bardziej precyzyjnie przekształca się, w sygnał wyjściowy. Identyczną funkcję w modelu $M(\theta)$ opisanym równaniem 3 pełni filtr G . W rezultacie filtr ten, ze względu na operator opóźnienia z , jest zapisem transmitancji w dziedzinie czasu dyskretnego. Przekształcając odpowiednio równania modelu ARX o trzech sygnałach wejściowych i jednym wyjściowym (17) otrzymuje się zapis modelu przy pomocy transmitancji operatorowych. Każda z transmitancji G przyporządkowana jest jednemu sygnałowi wejściowemu u

$$y(t) = G_{y/u_1}(z)u_1(t) + G_{y/u_2}(z)u_2(t) + G_{y/u_3}(z)u_3(t) + H(z)e(t)$$

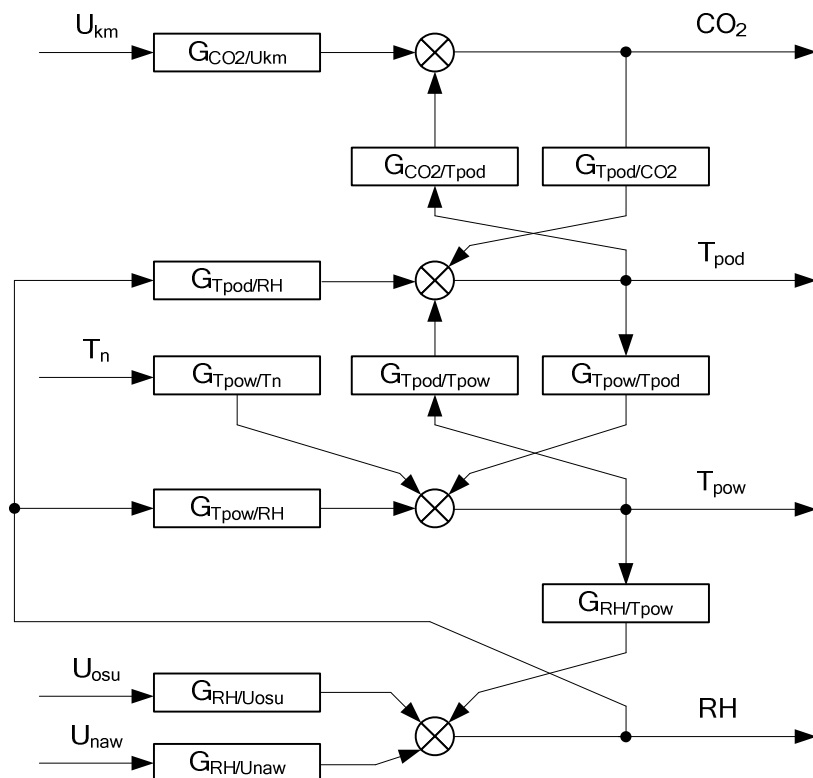
$$G_{y/u_1}(z) = \frac{B_1(z)}{A(z)} = \frac{b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}$$

$$G_{y/u_2}(z) = \frac{B_2(z)}{A(z)} = \frac{b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \quad (20)$$

$$G_{y/u_3}(z) = \frac{B_3(z)}{A(z)} = \frac{b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}$$

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}$$

Po uwzględnieniu omówionych przekształceń struktury ARX na transmitancje operatorowe, kompleksowy model mikroklimatu pieczarkarni może być przedstawiony jako schemat blokowy (rys. 3.6).



Rys. 3.6 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarki

Z kolei zapis matematyczny kompleksowego modelu będzie składał się z macierzy transmitancji $\mathbf{G}(s)$ (21).

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{U}(s)$$

$$\begin{bmatrix} T_{pod} \\ T_{pow} \\ RH \\ CO_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & G_{CO_2/U_{km}} \\ 0 & 0 & G_{RH/U_{osu}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{RH/U_{naw}} & 0 \\ 0 & G_{T_{pow}/T_n} & 0 & 0 \\ 0 & G_{T_{pow}/T_{pod}} & 0 & G_{CO_2/T_{pod}} \\ G_{T_{pod}/T_{pow}} & 0 & G_{RH/T_{pow}} & 0 \\ G_{T_{pod}/RH} & G_{T_{pow}/RH} & 0 & 0 \\ G_{T_{pod}/CO_2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} U_{km} \\ U_{osu} \\ U_{naw} \\ T_n \\ T_{pod} \\ T_{pow} \\ RH \\ CO_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Dyskretna postać transmitancji może być użyta do wyznaczania właściwości sterowanego obiektu, np. badania stabilności układu. Jednak o wiele popularniejszą i czytelniejszą formą jest transmitancja w dziedzinie czasu ciągłego.

Przejścia z transmitancji odwzorowanej na płaszczyźnie z na płaszczyznę s dokonano przy pomocy przekształcenia Tustina. Przejścia dokonuje się poprzez podstawienie

$$G(z) = G(s) \Big|_{z=\frac{2+sT_s}{2-sT_s}} \quad (22)$$

gdzie:

T_s – czas próbkowania.

W wyniku przekształcenia powstaje $G(s)$ o stopniu licznika równym stopniowi mianownika, czyli transmitancja właściwa. Wielomiany licznika i mianownika są stopnia trzeciego. Pierwiastki licznika są zerami transmitancji a pierwiastki mianownika jej biegunami. Funkcja ta jest także ułamkiem niewłaściwym, dlatego dokonano jej rozkładu na ułamki proste do postaci

$$G(s) = K_0 + \frac{r_1}{s - p_1} + \frac{r_2}{s - p_2} + \frac{r_3}{s - p_3} \quad (23)$$

gdzie:

K_0 – wyraz wolny,

$r_{1,2,3}$ – residua funkcji $G(s)$,

$p_{1,2,3}$ – bieguny transmitancji.

W większości przypadków w wyniku rozkładu otrzymano, zarówno dla residuów jak i biegunów, jedną liczbę rzeczywistą i dwie zespolone. Liczbami zespolonymi są r_2 i r_3 oraz p_2 i p_3 . Liczby te były zawsze liczbami sprzężonymi, czyli takimi, których części rzeczywiste są równe a części urojone przeciwne. Inaczej mówiąc, liczby te były symetryczne względem osi rzeczywistej. Z własności sprzężenia liczb zespolonych wynika, że

$$\begin{aligned} x + \bar{x} &= 2\text{Re}x \\ x \cdot \bar{x} &= |x|^2 \end{aligned} \quad (24)$$

gdzie:

x – liczba zespolona,

\bar{x} – liczba sprzężona do liczby x .

Chcąc ułatwić finalną interpretację wyników rozkład transmitancji $G(s)$ zapisano w formie sumy członu proporcjonalnego K_0 oraz trzech transmitancji cząstkowych $G_1(s)$, $G_2(s)$, $G_3(s)$:

$$\begin{aligned} G(s) &= K_0 + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \\ G_1(s) &= \frac{r_1}{s - p_1} \end{aligned} \quad (25)$$

$$G_2(s) = \frac{s(r_2 + r_3)}{s^2 + (-p_2 - p_3)s + p_2p_3}$$

$$G_3(s) = \frac{-r_3p_2 - r_2p_3}{s^2 + (-p_2 - p_3)s + p_2p_3}$$

Warto zauważyć, że transmitancje cząstkowe są lub składają się z podstawowych członów dynamicznych:

- G_1 – człon inercyjny I rzędu,
- G_2 – szeregowo połączenie członu oscylacyjnego II rzędu z członem różniczkującym,
- G_3 – człon oscylacyjny II rzędu.

Wobec tego można je również zapisać w sposób alternatywny

$$G_1(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1}$$

$$G_2(s) = s \frac{k_2}{T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1} \quad (26)$$

$$G_3(s) = \frac{k_3}{T^2s^2 + 2\zeta Ts + 1}$$

gdzie:

$k_{1,2,3}$ – wzmocnienia,

T_1, T – stałe czasowe,

ζ – współczynnik tłumienia.

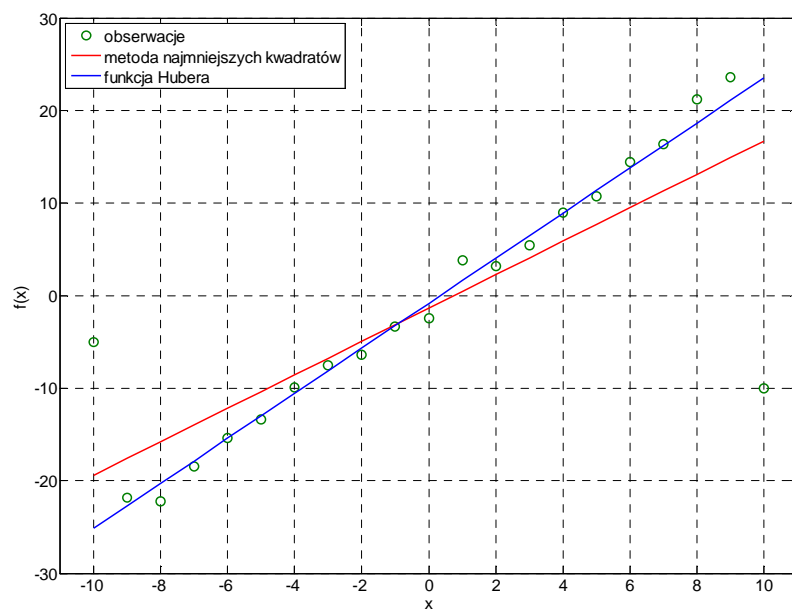
Wartości współczynników k_1, k_2, k_3, T_1, T i ζ decydują o właściwościach statycznych i dynamicznych modelu. Po dokonaniu kilku przekształceń współczynniki te można uzależnić od zer r_i i biegunów p_i transmitancji $G(s)$

$$\begin{aligned}
 k_1 &= -\frac{r_1}{p_1} \\
 k_2 &= \frac{r_2 + r_3}{p_2 p_3} \\
 k_3 &= -\frac{r_3 p_2 + r_2 p_3}{p_2 p_3} \\
 T_1 &= -\frac{1}{p_1} \\
 T &= \sqrt{\frac{1}{p_2 p_3}} \\
 \zeta &= \frac{-p_2 - p_3}{2\sqrt{p_2 p_3}}
 \end{aligned} \tag{27}$$

Kolejnym etapem pracy było powiązanie współczynników modelu z charakterystycznymi parametrami uprawy (tabela 3.1). W parametrach tych zawarte są informacje dotyczące rozmiaru hali uprawowej i samej uprawy oraz systemu technologicznego (np. liczba i wielkość regałów). W tym celu wykorzystano regresję liniową.

Po przeprowadzeniu identyfikacji mikroklimatu otrzymano osobny zbiór modeli dla każdej pieczarkarni. Zbiory te składały się z 3 podzbiorów opisujących dynamikę mikroklimatu tego samego fragmentu uprawy (etap I, II oraz III). Liczebność podzbiorów była związana z liczbą okresów jaki analizowano w ramach konkretnej pieczarkarni. Korzystając z terminologii statystycznej okresy można nazwać obserwacjami. W przypadku obiektów biologicznych trudno jest uzyskać wysoką powtarzalność obserwacji. Wiąże się to z rozrzutem danych i występowaniem obserwacji odstających.

Najpopularniejszą metodą wyznaczania współczynników prostej regresji jest metoda najmniejszych kwadratów [58]. Polega ona na minimalizacji sumy kwadratów odchyień e . Metoda najmniejszych kwadratów jako estymator jest jednak wrażliwa na obserwacje odstające. Aby rozwiązać problem obserwacji oddalonych wykorzystano funkcję Hubera. Funkcja ta jest zaliczana do M-estymatorów, inaczej mówiąc jest to estymator odporny na obserwacje odstające [38]. Porównanie dwóch linii regresji, jednej wyznaczonej przy pomocy metody najmniejszych kwadratów a drugiej funkcji Hubera, przedstawia rys. 3.7.



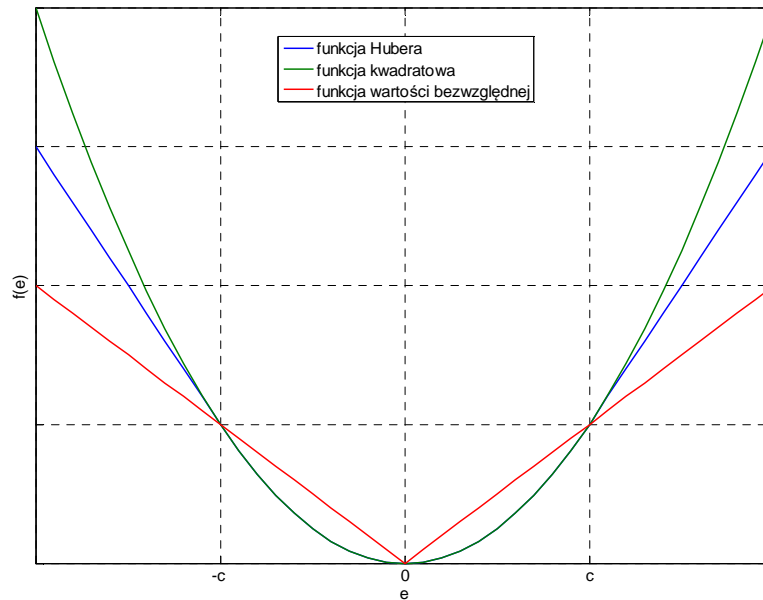
Rys. 3.7 Porównanie prostych regresji wyznaczonych przy pomocy dwóch estymatorów [7]

Funkcję Hubera (rys. 3.8) definiuje się jako

$$f(e) = \begin{cases} e^2, & |e| \leq c \\ 2c|e| + c^2, & |e| > c \end{cases} \quad (28)$$

gdzie:

c – dowolnie ustalona stała dodatnia.



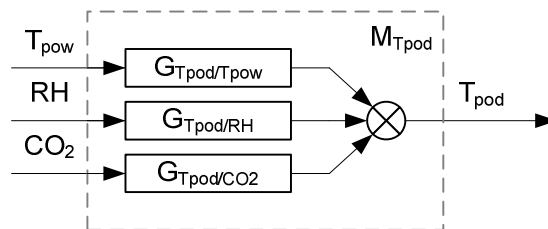
Rys. 3.8 Wykresy funkcji Hubera, kwadratowej oraz funkcji wartości bezwzględnej [7]

Wartość parametru c jest swobodnie dobieralna, jednak wielu naukowców proponuje $c = 1,345$ [7]. Funkcja Hubera łączy w sobie cechy funkcji kwadratowej i wartości bezwzględnej. W zakresie $(-c; c)$ wartość funkcji zmienia się zgodnie z funkcją kwadratową, natomiast dla $|e| > c$ zmienia się liniowo.

3.3. Analiza modelu mikroklimatu pieczarkarni

3.3.1. Model dla temperatury podłoża

Model $M_{T_{pod}}$ z temperaturą podłoża T_{pod} jako sygnałem wyjściowym ma trzy sygnały wejściowe: temperaturę powietrza T_{pow} , wilgotność względną powietrza RH oraz stężenie dwutlenku węgla w hali CO_2 (rys. 3.9).



Rys. 3.9 Schemat blokowy modelu $M_{T_{pod}}$

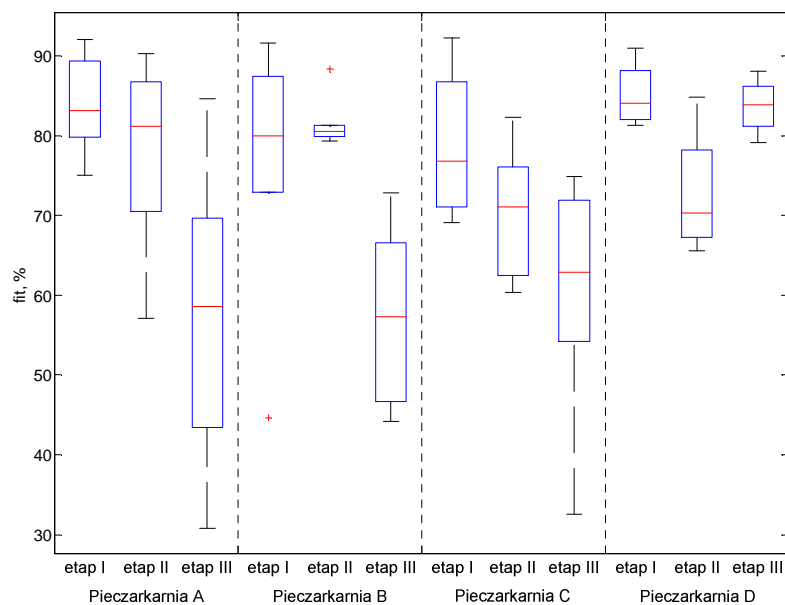
Model o strukturze ARX został przekształcony do postaci transmitancji operatorowych zgodnie z równaniem 20. W wyniku przekształcenia otrzymano transmitancje dyskretne $G_{T_{pod}/T_{pow}}$, $G_{T_{pod}/RH}$ oraz G_{T_{pod}/CO_2} w postaci

$$\begin{aligned} G_{T_{pod}/T_{pow}}(z) &= \frac{b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\ G_{T_{pod}/RH}(z) &= \frac{b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\ G_{T_{pod}/CO_2}(z) &= \frac{b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \end{aligned} \quad (29)$$

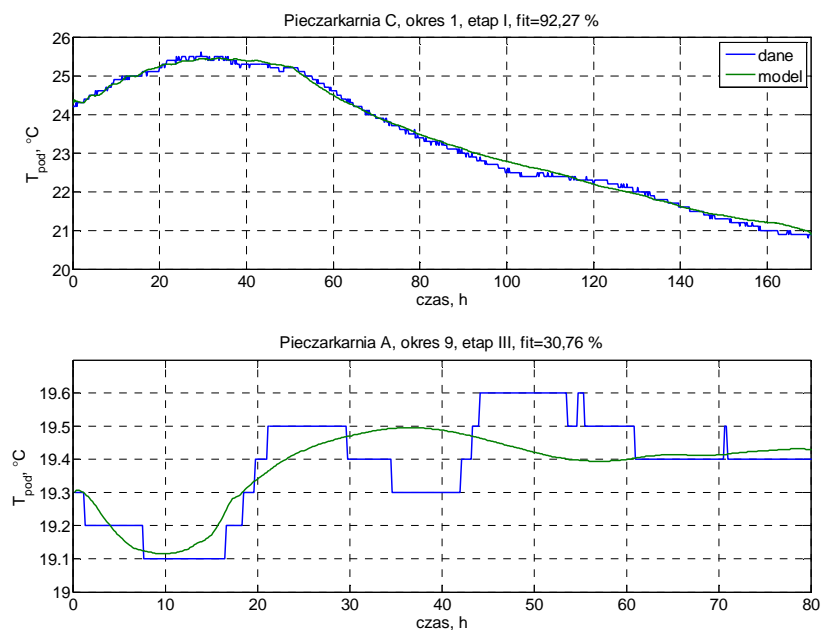
Wartości poszczególnych współczynników transmitancji dyskretnych są umieszczone w załączniku w tabelach Z.1–4.

Wszystkie zbudowane modele oceniono pod kątem dopasowania do danych pomiarowych. Oceny dokonano obliczając wartość wskaźnika fit dla każdego modelu. Wartości wskaźnika dla każdego z okresów z podziałem na pieczarkarnie oraz etapy przedstawia wykres skrzynkowy (rys. 3.10).

Największy rozrzut wartości występował w przypadku modeli opisujących etap III. W większości pieczarkarni mediana wskaźnika fit była największa dla etapu I a najmniejsza dla III. Największą wartość wskaźnika dopasowania 92,27% uzyskano dla pieczarkarni C dla etapu I w okresie 1. Modelem najgorzej dopasowanym do danych pomiarowych był model dla pieczarkarni A dla etapu III w okresie 9. Wartość wskaźnika wyniosła 30,76%. Przebiegi sygnału wyjściowego T_{pod} dla obu przypadków przedstawia rys. 3.11.

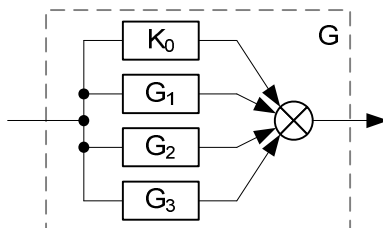


Rys. 3.10 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu $M_{T_{pod}}$



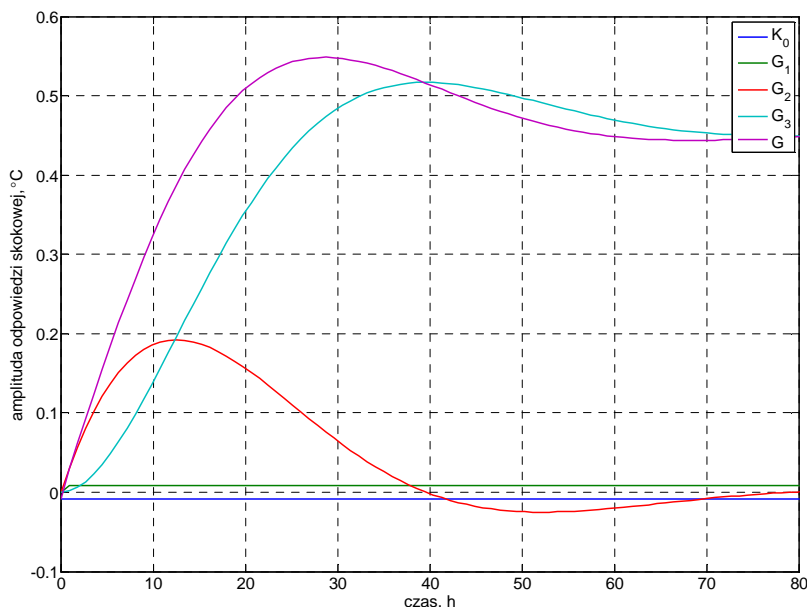
Rys. 3.11 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli $M_{T_{pod}}$ o największej (wykres górny) i najmniejszej (wykres dolny) wartości współczynnika fit

Zmiany dziedziny transmitancji z dyskretniej z na ciągłą s dokonano zgodnie z równaniem 22. Następnie rozłożono każdą z transmitancji ciągłych G na człon proporcjonalny K_0 (tabela Z.5) i transmitancje cząstkowe G_1 (tabele Z.6 i Z.7), G_2 (tabele Z.8, Z.9 i Z.11) oraz G_3 (tabele Z.9–11). Transmitancje składowe są połączone równoległe (rys. 3.12).



Rys. 3.12 Struktura transmitancji G zbudowanej z transmitancji składowych K_0 , G_1 , G_2 i G_3

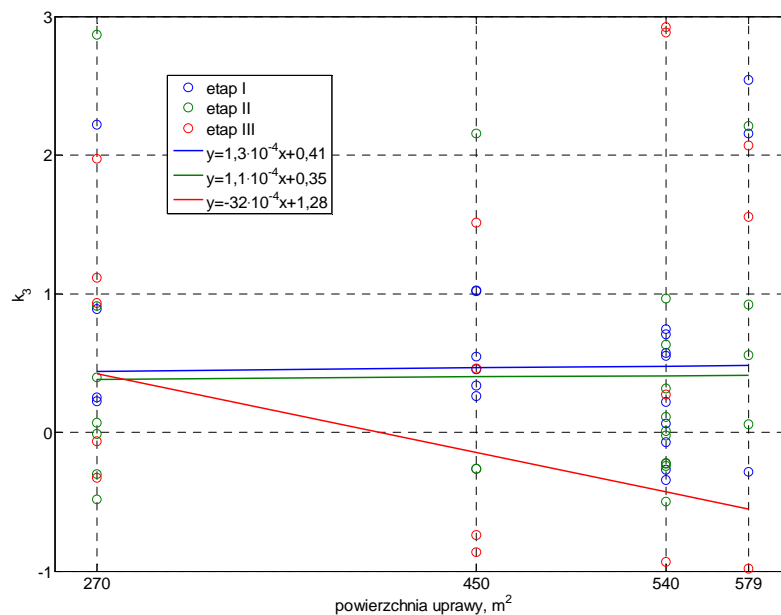
Na podstawie charakterystyk skokowych (rys. 3.13) ustalono, że dynamika transmitancji G zależy w głównej mierze od parametrów transmitancji cząstkowej G_3 . Może to sugerować przewymiarowanie modelu. Aby ułatwić analizę właściwości statycznych i dynamicznych ograniczono ją do parametrów transmitancji cząstkowej G_3 , czyli wzmocnienia k_3 , stałej czasowej T oraz współczynnika tłumienia ζ .



Rys. 3.13 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{T_{pod}/T_{pow}}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych (przykład dla pieczarkarni B okres 5 etap I)

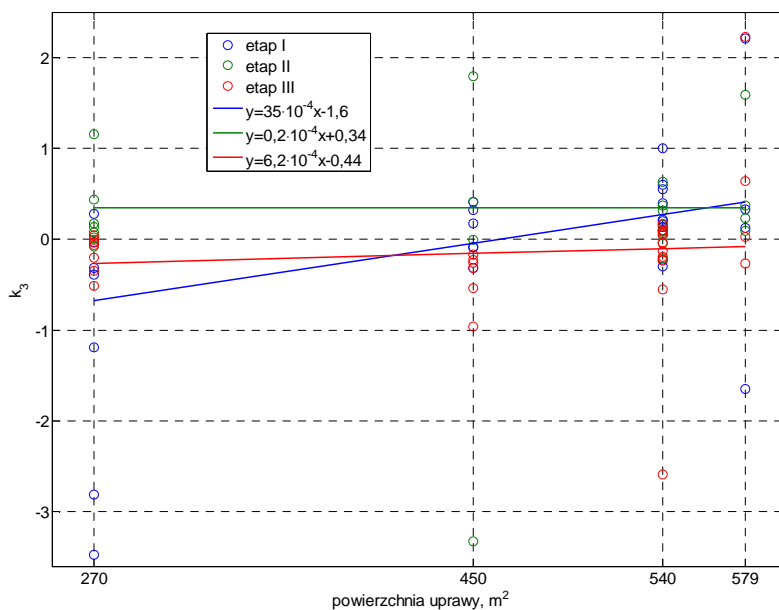
Zależność współczynników modelu od parametrów technologicznych pieczarkarni określono przy pomocy regresji liniowej. Ze względu na biologiczny charakter badanego obiektu współczynniki modelu cechował duży rozrzut. Chcąc uodpornić funkcję regresji liniowej na odstające obserwacje do określenia współczynników regresji wykorzystano M-estymator – funkcję Hubera (28). Parametrem technologicznym była powierzchnia uprawy. Jest to podstawowy parametr opisujący pieczarkarnie. W kalkulacjach ekonomicznych wielkość plonu wyrażana jest zazwyczaj w $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Z tego powodu powierzchnia uprawy jest ważna już na etapie projektowania pieczarkarni. Należy dobrać ją w taki sposób aby przy założonej wydajności wielkość produkcji odpowiadała możliwościom organizacyjnym producenta. Mowa tutaj np. o możliwościach pozyskania siły roboczej na lokalnym rynku pracy. Na powierzchnię uprawy składają się takie parametry technologiczne jak: szerokość i długość regału, liczba regałów oraz liczba półek.

Współczynnik kierunkowy linii regresji opisującej zależność wzmocnienia proporcjonalnego k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{T_{\text{pod}}/T_{\text{pow}}}$ od powierzchni uprawy ma podobną wartość dla etapu I i II (rys. 3.14). Nachylenie prostej w stosunku do osi X jest minimalne co oznacza, że współczynnik wzmocnienia k_3 nie jest zależny od powierzchni uprawy.



Rys. 3.14 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{T_{\text{pod}}/T_{\text{pow}}}$ od powierzchni uprawy

Analiza linii regresji wyznaczonych dla wzmocnienia k_3 wskazuje, że wartości współczynnika k_3 modelu $G_{T_{pod}/RH}$ zmieniają się proporcjonalnie do powierzchni uprawy (rys. 3.15). Dla etapu II zmienność ta jest pomijalnie mała. Największe zmiany zachodziły w etapie I.



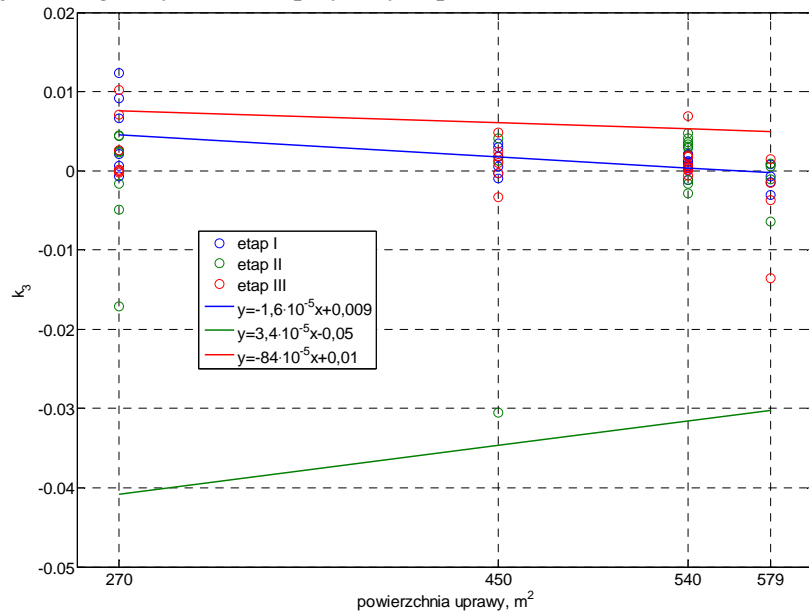
Rys. 3.15 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{T_{pod}/RH}$ od powierzchni uprawy

Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{T_{pod}/CO_2} zmienia się podobnie w etapie I i III (rys. 3.16). Współczynniki kierunkowe linii regresji dla obu przypadków mają wartość ujemną, co oznacza, że wartość wzmocnienia proporcjonalnego maleje wraz ze wzrostem powierzchni uprawy. Jednak największe zmiany wartości wzmocnienia można zaobserwować w etapie II. Są one proporcjonalne do powierzchni uprawy. W tym etapie wzmocnienie przyjmuje ujemne wartości.

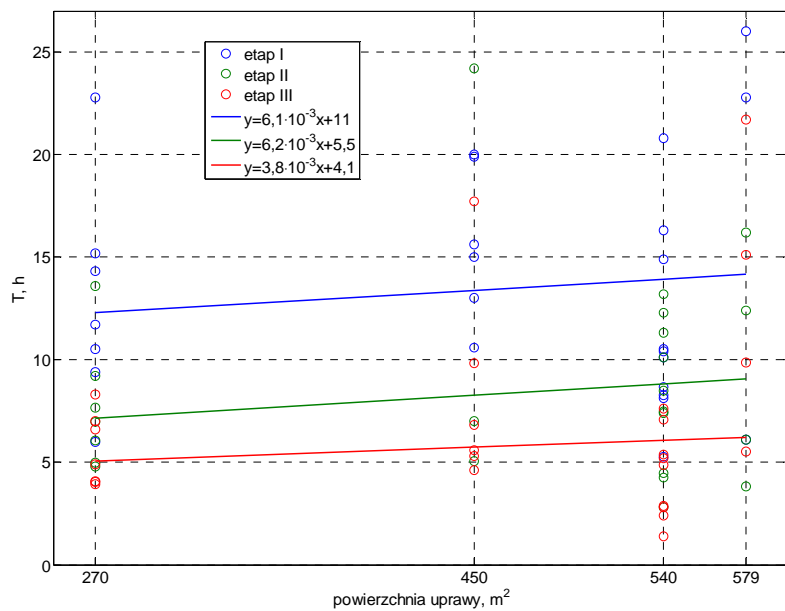
W przypadku stałej czasowej T można zaobserwować wyraźne różnice między kolejnymi etapami uprawy (rys. 3.17). Najdłuższe stałe czasowe odpowiadały etapowi I a najkrótsze III. Warto przypomnieć, że etap I opisuje uprawę w momencie szoku, tuż przed rozpoczęciem I zbioru, który zazwyczaj jest najbardziej obfity. Z kolei etap III uprawy wyznaczono tak aby obejmował czas poprzedzający ostatni zbiór owocników pieczarki.

Stała czasowa zmienia się proporcjonalnie do powierzchni uprawy. Współczynnik kierunkowy linii regresji ma podobną wartość dla etapu I i II oraz najmniejszą dla etapu III. Stała czasowa dla pieczarkarni o największej powierzchni uprawy (D) w porównaniu z pieczarkarnią o najmniejszej powierzchni (C) jest dłuższa

o 1 h 53 min, 1 h 55 min oraz 1 h 10 min odpowiednio dla etapu I, II oraz III. W ujęciu względnym będą to przyrosty odpowiednio o 15,4%, 26,9% oraz 22,9%.



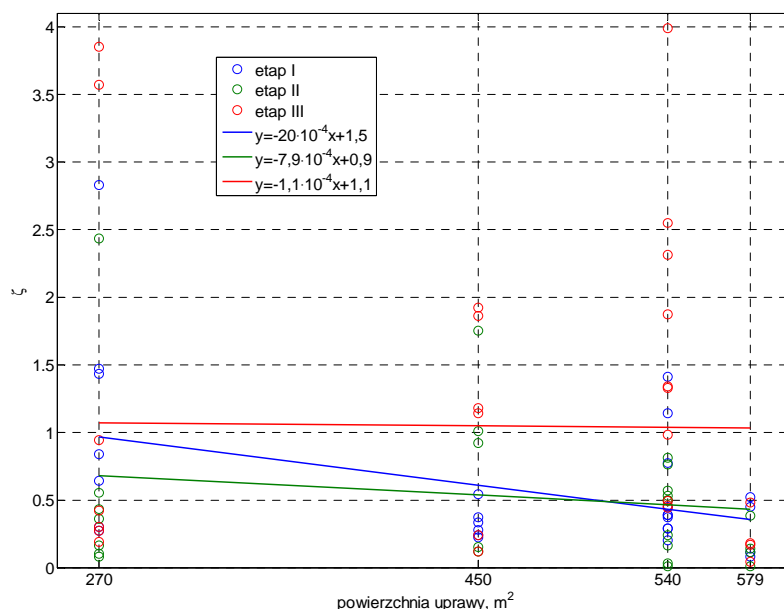
Rys. 3.16 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{Tpod/CO_2} od powierzchni uprawy



Rys. 3.17 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{Tpod} od powierzchni uprawy

Współczynnik tłumienia decyduje o tym czy przebieg przejściowy modelu będzie miał charakter oscylacyjny, czy inercyjny. Jeżeli $\zeta < 1$, wówczas wystąpią oscylacje i będą one tym większe, im mniejszy będzie współczynnik tłumienia. Przy $\zeta \geq 1$ oscylacje nie występują a dynamika modelu ma charakter inercyjny.

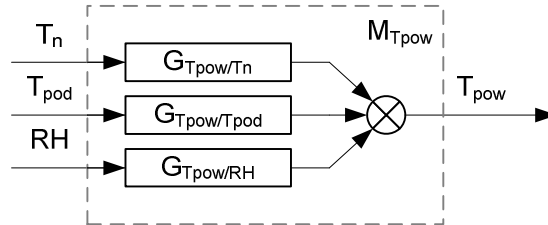
Największa zmienność współczynnika tłumienia wystąpiła w etapie I (rys. 3.18). Największe oscylacje przebiegu przejściowego transmitancji składowej G_3 wystąpiły w modelu pieczarkarni o największej powierzchni (D). Współczynnik kierunkowy linii regresji dla etapu III miał najmniejszą wartość co powodowało również najmniejszą spośród wszystkich etapów zmienność współczynnika tłumienia od 1,033 do 1,068. Dla każdej pieczarkarni w etapie III spełniony był warunek $\zeta \geq 1$. Model miał zatem charakter inercyjny.



Rys. 3.18 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu $M_{T_{pod}}$ od powierzchni uprawy

3.3.2. Model dla temperatury powietrza

Strukturę modelu $M_{T_{pow}}$ pokazuje rysunek 3.19. Sygnałami wejściowymi są temperatura powietrza nawiewanego T_n , temperatura podłoża T_{pod} oraz wilgotność względna RH.



Rys. 3.19 Schemat blokowy modelu $M_{T_{pow}}$

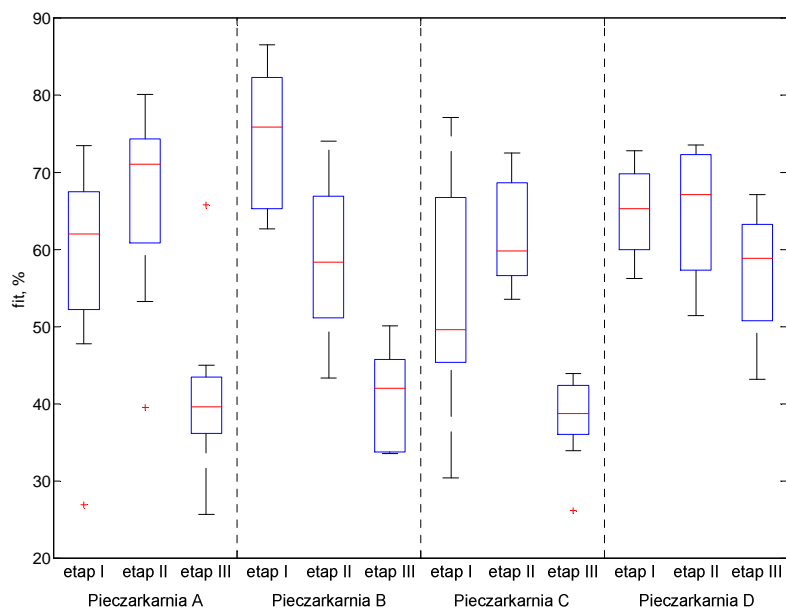
W wyniku przekształcenia modelu ARX zgodnie z równaniem 20 powstały trzy transmitancje: G_{T_{pow}/T_n} , $G_{T_{pow}/T_{pod}}$ oraz $G_{T_{pow}/RH}$. Transmitancje w dziedzinie z opisane są równaniami:

$$\begin{aligned}
 G_{T_{pow}/T_n}(z) &= \frac{b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\
 G_{T_{pow}/T_{pod}}(z) &= \frac{b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\
 G_{T_{pow}/RH}(z) &= \frac{b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}
 \end{aligned} \tag{30}$$

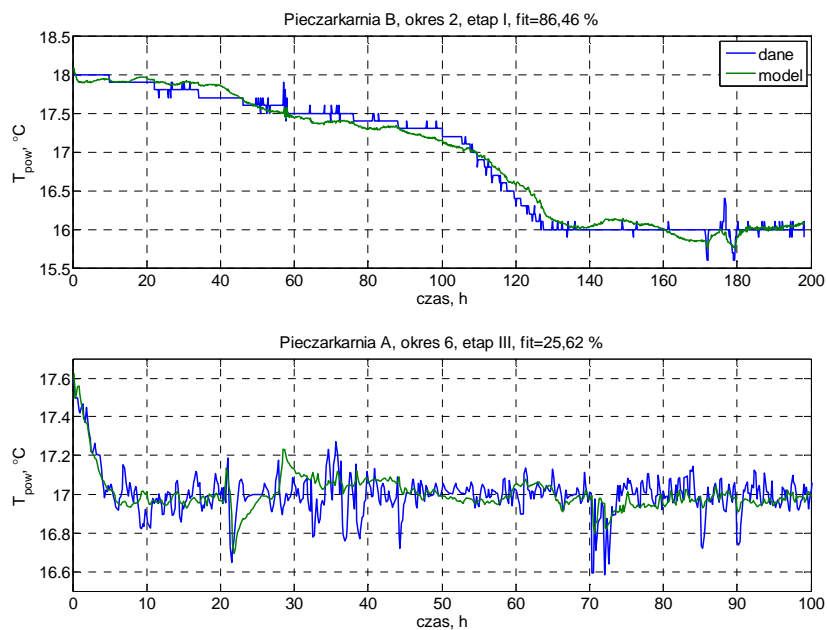
Poszczególne współczynniki transmitancji dyskretnej przedstawiają tabele Z.12–15.

Otrzymane wartości wskaźnika dopasowania fit prezentuje rys. 3.20. Rozrzut wartości wskaźnika dopasowania, w odróżnieniu od modelu $M_{T_{pod}}$, jest nieregularny. Nie można powiedzieć, aby któryś z etapów wyróżniał się największym lub najmniejszym rozrzutem we wszystkich pieczarkarniach. Mediana wskaźnika fit jest największa dla etapu II a najmniejsza dla etapu III, wyjątek stanowi pieczarkarnia B.

Największą wartość dopasowania otrzymano dla pieczarkarni B dla etapu I w okresie 2, było to 86,46%. Z kolei najniższa wartość wskaźnika fit 25,62% wystąpiła dla modelu pieczarkarni A dla etapu III w okresie 6 (rys. 3.21).



Rys. 3.20 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu $M_{T_{pow}}$

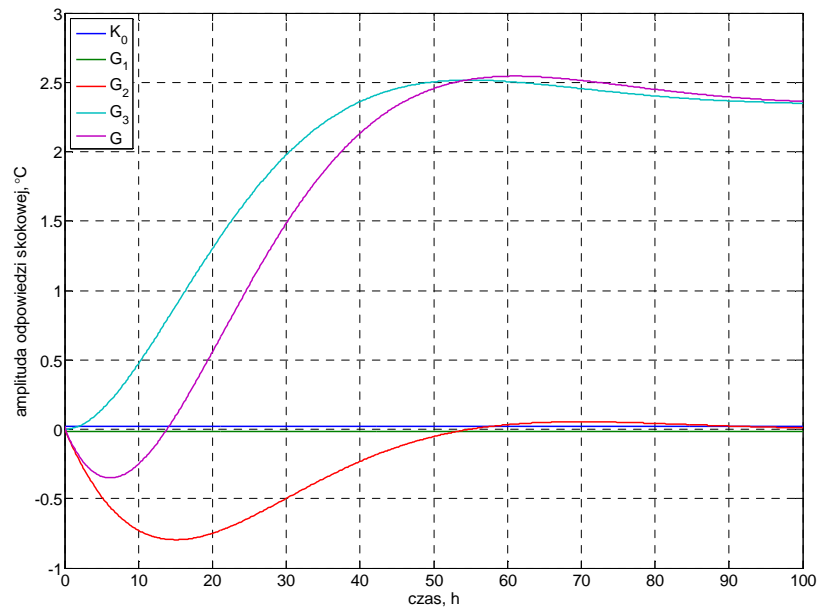


Rys. 3.21 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli $M_{T_{pow}}$ o największej (wykres górny) i najmniejszej (wykres dolny) wartości współczynnika fit

Po przejściu z transmitancji dyskretniej $G(z)$ na ciągłą $G(s)$ dokonano jej rozkładu na transmitancje składowe. Współczynniki poszczególnych transmitancji składowych są zawarte w tabelach Z.16–22. Rozkładu $G(s)$ dokonano zgodnie z równaniem

$$G(s) = K_0 + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \quad (31)$$

Charakterystyki skokowe transmitancji składowych K_0 , G_1 , G_2 i G_3 wskazują, że modelem o dynamice najbardziej zbliżonej do transmitancji G jest transmitancja G_3 (rys. 3.22). Z tego powodu zakres analizy właściwości modelu ograniczono do wzmocnienia k_3 , stałej czasowej T oraz współczynnika tłumienia ζ .

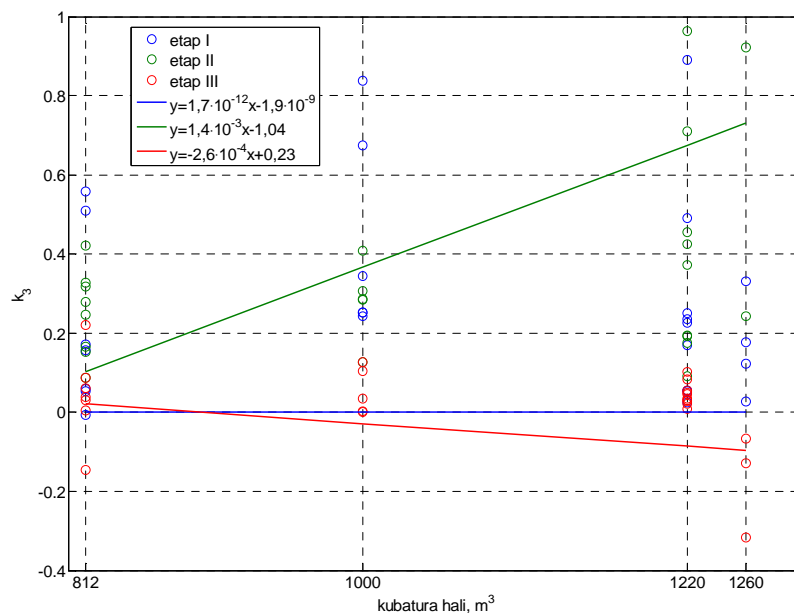


Rys. 3.22 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu G_{T_{pow}/T_n} w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych (przykład dla pieczarkarni E okres 4 etap II)

Linie regresji opisujące zależność współczynników modelu od parametrów technologicznych, w tym przypadku kubatury hali, wyznaczono przy pomocy funkcji Hubera (28).

Wzmocnienie proporcjonalne k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{T_{pow}/T_n} jest silnie zróżnicowane między etapami (rys. 3.23). W etapie I wzmocnienie jest podobne dla wszystkich pieczarkarni a jego wartość jest zbliżona do zera. Może to sugerować, że pozostałe sygnały wejściowe, czyli temperatura podłoża T_{pod} oraz wilgotność względna powietrza RH , mają większe znaczenie w kształtowaniu wartości temperatury powietrza T_{pow} niż sygnał temperatury powietrza nawiewanego do hali T_n . W etapie III wartość współczynnika k_3 male-

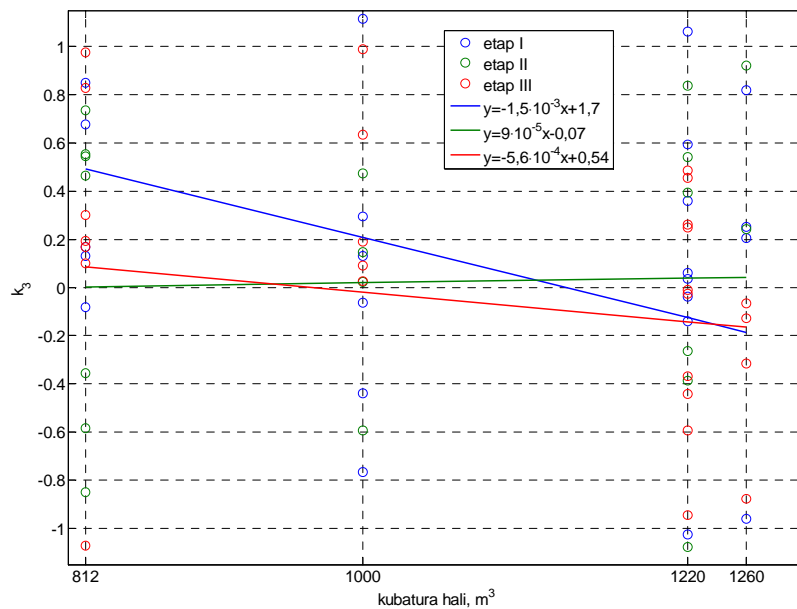
je wraz ze wzrostem kubatury hali, jednak zmiana ta jest niewielka. Największą wartość współczynnika kierunkowego linii regresji otrzymano dla etapu II, jest ona również dodatnia. Pieczarkarnia o największej kubaturze (D) miała największy współczynnik wzmocnienia.



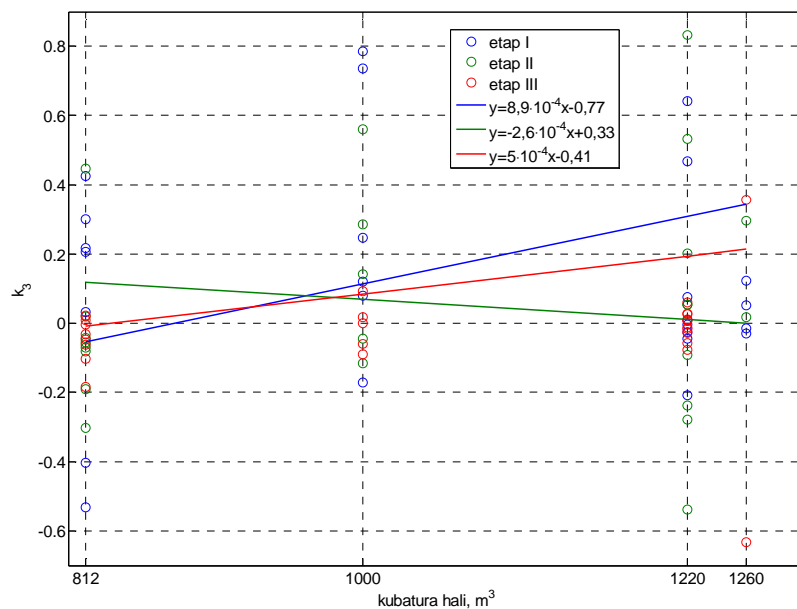
Rys. 3.23 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{Tpow/Tn}$ od kubatury hali

W przypadku transmitancji cząstkowej $G_{Tpow/Tpod}$ największe zmiany współczynnika wzmocnienia k_3 wystąpiły w etapie I (rys. 3.24). Jego wartość była wprost proporcjonalna do kubatury hali. Największe wzmocnienie wystąpiło dla pieczarkarni C o kubaturze 812 m^3 . Zmienność współczynnika k_3 w etapie II była najmniejsza.

Współczynniki linii regresji wyznaczone dla wzmocnienia k_3 modelu $G_{Tpow/RH}$ dla etapu I oraz III miały zbliżone wartości (rys. 3.25). Współczynniki kierunkowe obu prostych były dodatnie. W etapie II wartość wzmocnienia malała wraz ze wzrostem kubatury.

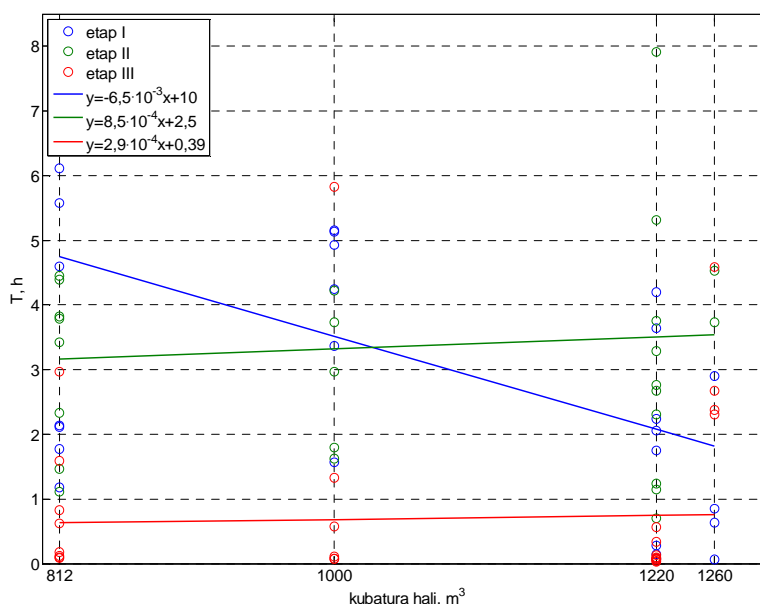


Rys. 3.24 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{Tpow}/T_{pod} od kubatury hali



Rys. 3.25 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{Tpow}/RH od kubatury hali

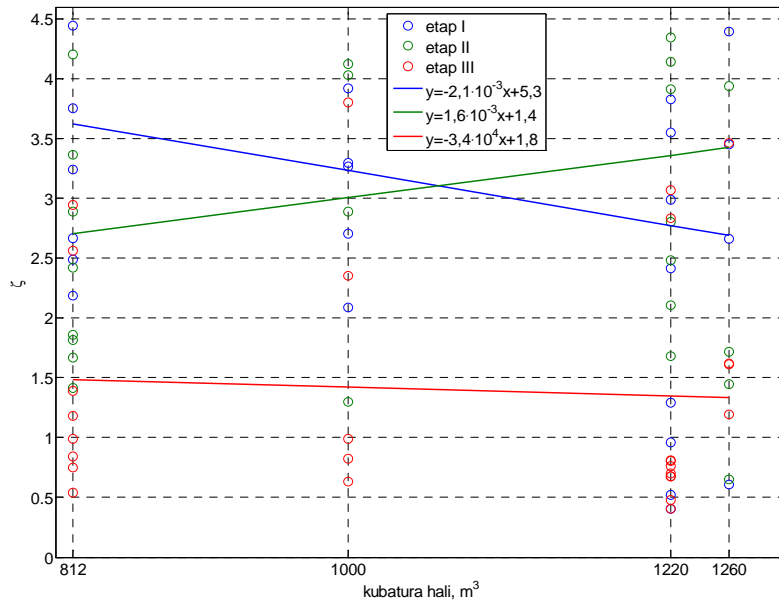
Stała czasowa modelu $M_{T_{pow}}$ również jest zróżnicowana w kolejnych etapach (rys. 3.26). W etapach II i III stała czasowa zwiększała się wraz z kubaturą hali. Zmiany te jednak nie były znaczące. W etapie II stała czasowa była o ok. 23 min. dłuższa dla pieczarkarni o kubaturze 1260 m³ (D) w porównaniu z pieczarkarnią o kubaturze 812 m³ (C). W etapie III zmiana ta wyniosła już tylko ok. 8 min. Największe zmiany co do wartości stałej czasowej T można było zaobserwować w etapie I. Różnica między najdłuższą a najkrótszą stałą czasową wyniosła 2 h 55 min. Linia regresji dla etapu I ma ujemny współczynnik kierunkowy. Jest to spowodowane niskimi wartościami stałej czasowej pieczarkarni D w porównaniu z pozostałymi obiektami. Średnia wartość stałej czasowej pieczarkarni D w etapie I wyniosła 1 h 7 min. Można to tłumaczyć najniższą wartością współczynnika wyrażającego stosunek kubatury hali do powierzchni uprawy. Dla pieczarkarni D współczynnik ten jest najmniejszy i wynosi 2,176 (tabela 3.1). Oznacza to, że pomimo największej kubatury, w hali znajduje się najmniej powietrza w stosunku do jednostki powierzchni. Układ regulacji temperatury powietrza będzie szybciej osiągał zadane wartości.



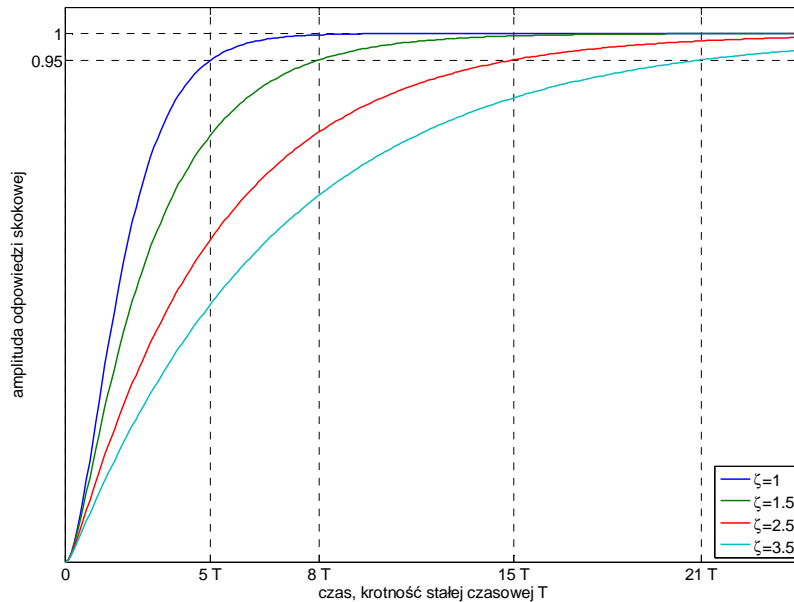
Rys. 3.26 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu $M_{T_{pow}}$ od kubatury hali

We wszystkich etapach współczynnik tłumienia ζ był większy od 1 (rys. 3.27). Najniższe wartości wystąpiły w etapie III i zawierały się w przedziale 1,3–1,5. W etapach I i II zakres zmienności był podobny, współczynnik ζ zmieniał się od 2,7 do 3,6. Jednak w etapie II zmiany były proporcjonalne, a w etapie I wprost proporcjonalne do zmiany kubatury hali. Współczynnik tłumienia oprócz wpływu na szybkość

zanikania oscylacji wpływa również na szybkość stabilizowania się sygnału wyjściowego przy przebiegu inercyjnym. W teoretyczny sposób ilustruje to rys. 3.28. Przedstawia on charakterystyki skokowe modeli o transmitancji operatorowej G_3 (26).



Rys. 3.27 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{Tpow} od kubatury hali



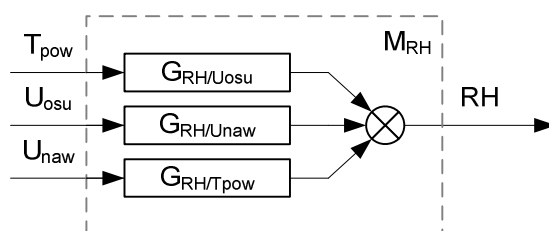
Rys. 3.28 Wpływ współczynnika tłumienia na właściwości dynamiczne modelu

Modele różnią się współczynnikiem tłumienia, natomiast wzmocnienie oraz stałą czasową T mają takie same. Modele o wyższym współczynniku tłumienia osiągają stan ustalony dużo później. Jeżeli $\zeta = 3,5$ to czas stabilizacji wyniesie ok. 21 T , natomiast przy $\zeta = 1$ sygnał wyjściowy osiągnie nową wartość ustaloną po czasie ok. 5 T .

Można zauważyć pewne podobieństwo dynamiki modelu $M_{T_{pow}}$ w etapie I i II. W obu etapach model reaguje na zmiany sygnałów wejściowych wolniej niż w etapie III. Zauważono również, że współczynniki odpowiadające za dynamikę modelu były na stałym poziomie dla hal o różnej kubaturze.

3.3.3. Model dla wilgotności względnej powietrza

Struktura modelu M_{RH} przedstawiona jest na rys. 3.29. Sygnałami wejściowymi są tutaj temperatura powietrza T_{pow} , sygnał nastawy osuszacza U_{osu} oraz sygnał nastawczy nawilżacza U_{naw} .



Rys. 3.29 Schemat blokowy modelu M_{RH}

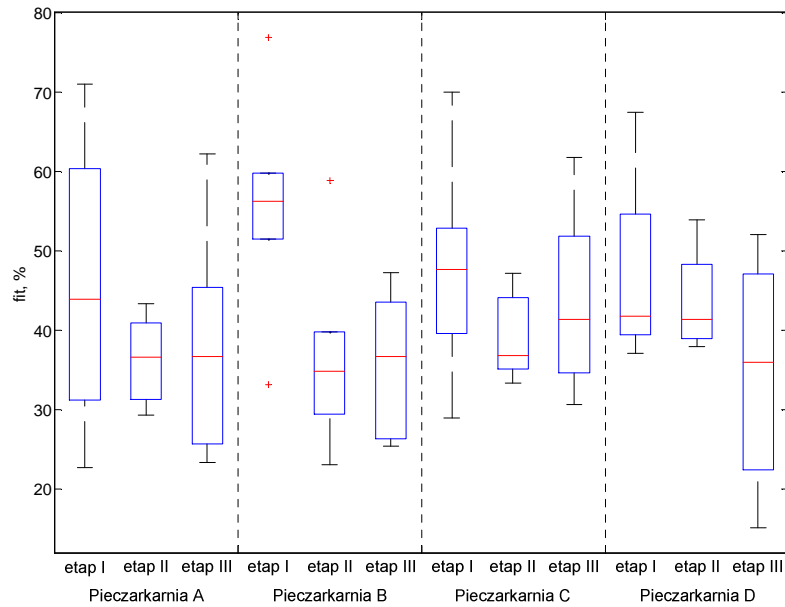
Transmitancje budujące ten model to $G_{RH/T_{pow}}$, $G_{RH/U_{osu}}$ i $G_{RH/U_{naw}}$. Są one wyrażone w postaci

$$\begin{aligned}
 G_{RH/T_{pow}}(z) &= \frac{b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\
 G_{RH/U_{osu}}(z) &= \frac{b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \\
 G_{RH/U_{naw}}(z) &= \frac{b_{31}z^{-1} + b_{32}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}
 \end{aligned} \tag{32}$$

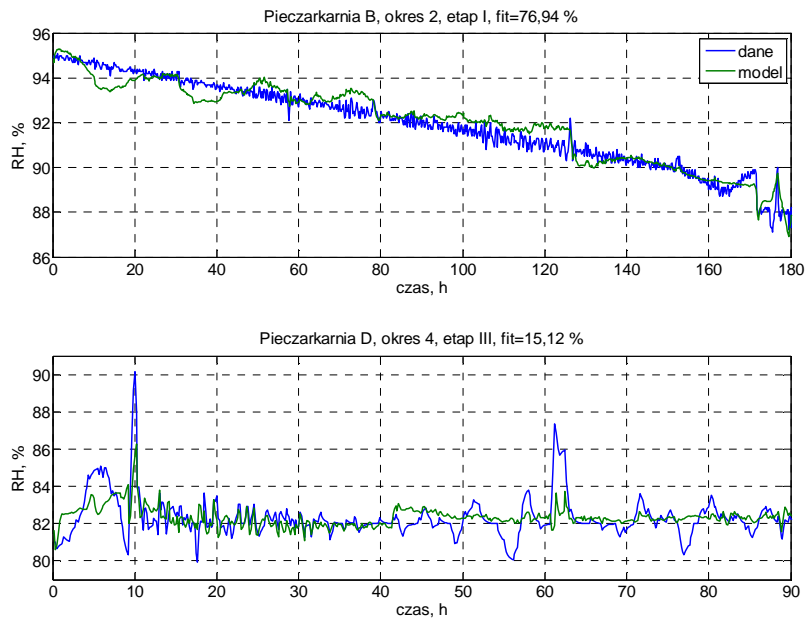
Współczynniki transmitancji dyskretnych podane są w tabelach Z.23–26.

Modele poddano ocenie dopasowania do danych pomiarowych obliczając wskaźnik fit. Otrzymane wartości wskaźnika fit w poszczególnych pieczarkarniach z podziałem na etapy prezentuje wykres skrzynkowy (rys. 3.30). Najmniejszy rozrzut wartości dopasowania otrzymano dla etapu II. Mediana wskaźnika fit była najwyższa dla etapu I. Mediany dopasowania w etapach II i III we wszystkich pieczarkarniach były zbliżone. Najwyższą wartość wskaźnika fit=76,94% uzyskano dla modelu pieczarkarni B w okresie 2 w etapie I. Najniż-

sza wartość wskaźnika wynosiła 15,12%. Była to wartość dopasowania modelu pieczarkarni D w okresie 4 w etapie III. Przebiegi sygnału wyjściowego RH dla modelu o najwyższym i najniższym wskaźniku dopasowania przedstawia rys 3.31.



Rys. 3.30 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu M_{RH}

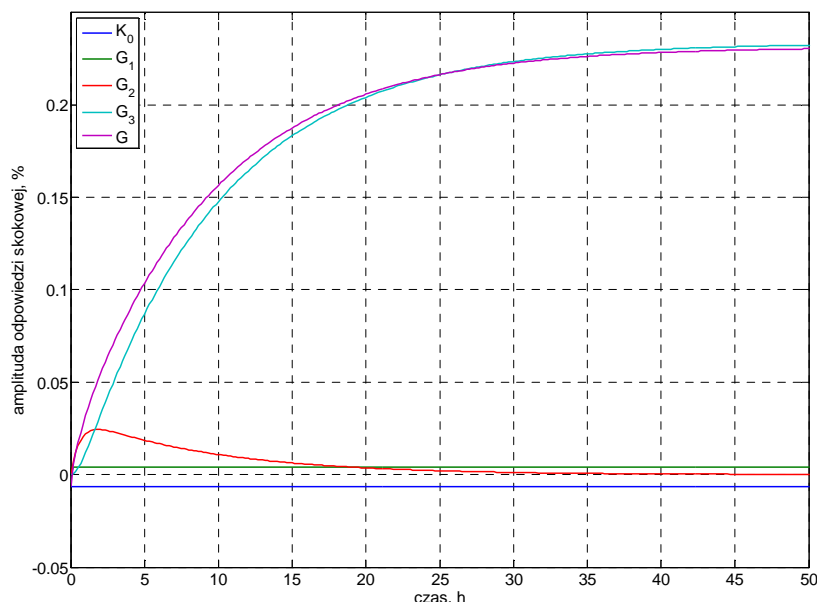


Rys. 3.31 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli M_{RH} o największej (wykres górny) i najmniejszej (wykres dolny) wartości współczynnika fit

Transmitancję dyskretną $G(z)$ przekształcono do postaci ciągłej $G(s)$ według równania 22. Następnie transmitancję $G(s)$ rozłożono na sumę transmitancji K_0 , G_1 , G_2 oraz G_3 . Współczynniki transmitancji składowych przedstawiają tabele Z.27–33.

Z obserwacji odpowiedzi skokowych wynika, że na dynamikę transmitancji G wpływa przede wszystkim transmitancja składowa G_3 (rys. 3.32). Jest ona wystarczająco dokładnym przybliżeniem transmitancji G , dzięki czemu analizę właściwości statycznych i dynamicznych modelu można ograniczyć tylko do analizy współczynników transmitancji opisanej jako

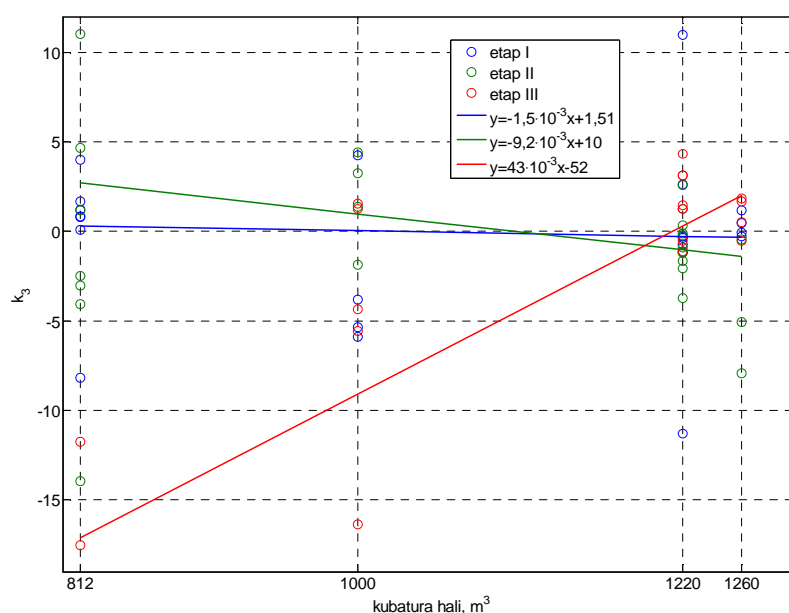
$$G_3(s) = \frac{k_3}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1} \quad (33)$$



Rys. 3.32 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{RH/U_{osu}}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych (przykład dla pieczarkarni C okres 8 etap II)

Analiza zależności współczynników modelu od parametrów technologicznych pieczarkarni przebiega według tej samej procedury co w przypadku modeli $M_{T_{pod}}$ i $M_{T_{pow}}$. Z uwagi na to, że sygnałem wyjściowym modelu M_{RH} jest wilgotność względna powietrza to na parametr technologiczny wybrano kubaturę hali. Parametr ten informuje o tym jaką objętość powietrza może pomieścić hala produkcyjna.

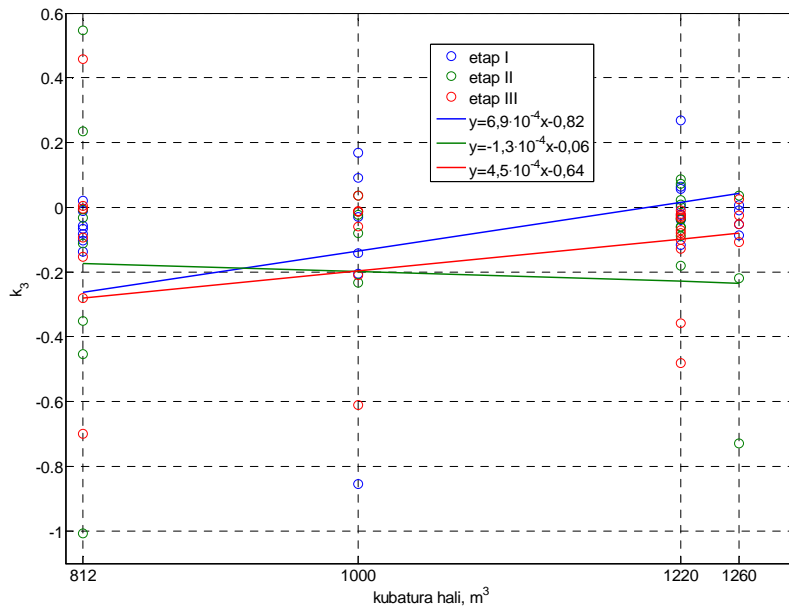
Współczynnik wzmocnienia k_3 transmitancji składowej $G_{RH/TPow}$ modelu M_{RH} dla etapu I i II jest odwrotnie proporcjonalny do kubatury hali (rys. 3.33). W etapie I tangens kąta nachylenia linii regresji jest najmniejszy, co oznacza, że zmiana wartości wzmocnienia proporcjonalnego będzie również najmniejsza. Największy zakres zmienności współczynnika k_3 zauważono w etapie III. Zarówno wartość minimalna jak i maksymalna wzmocnienia wystąpiła dla pieczarkarni o kubaturze 812 m^3 (C).



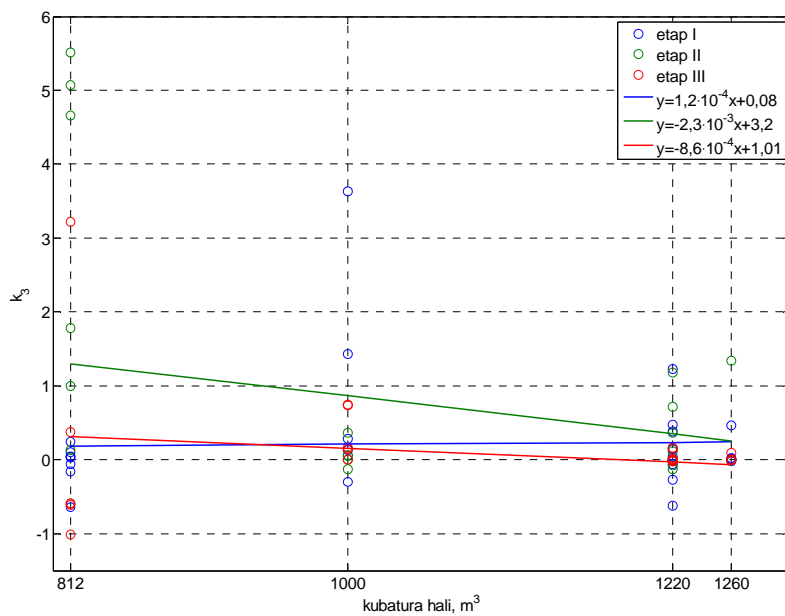
Rys. 3.33 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/TPow}$ od kubatury hali

Linie regresji opisujące zależność wzmocnienia proporcjonalnego transmitancji składowej $G_{RH/U_{osu}}$ od kubatury hali przedstawia rys. 3.34. Najmniejsze zmiany wartości współczynnika k_3 zaobserwowano w etapie II. W etapach I i III dla pieczarkarni o najmniejszej kubaturze współczynniki wzmocnienia miały zbliżone wartości. Ze względu na różne współczynniki kierunkowe linii regresji różnica między wartościami k_3 powiększała się wraz ze wzrostem kubatury hali.

Wartość współczynnika wzmocnienia transmitancji $G_{RH/U_{naw}}$ maleje wraz ze wzrostem kubatury (rys. 3.35). Wyjątkiem jest etap I, w którym wzmocnienie utrzymuje się na stałym poziomie we wszystkich pieczarkarniach. Powodem tego jest niski kąt nachylenia prostej regresji do osi X.

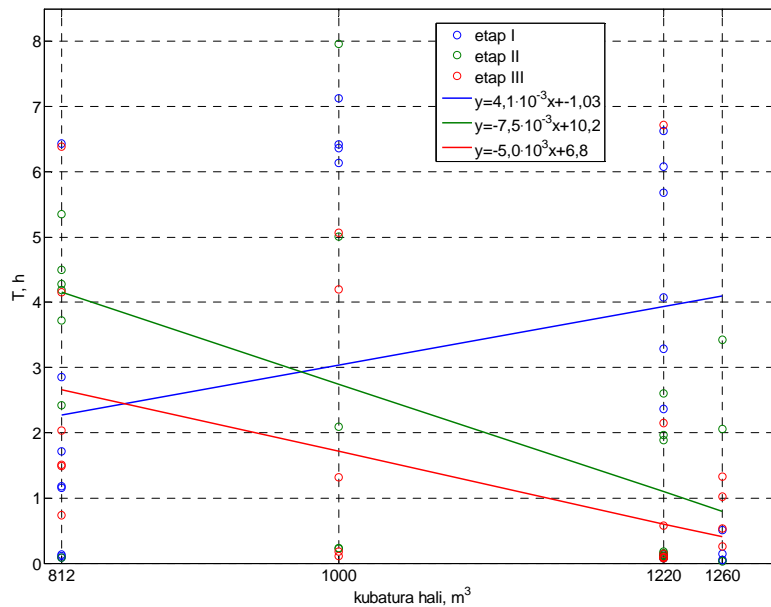


Rys. 3.34 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/U_{osu}}$ od kubatury hali



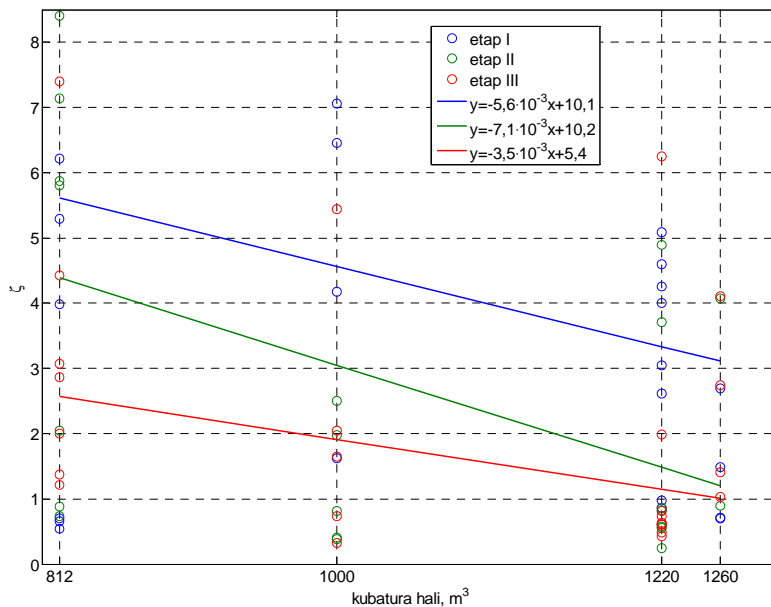
Rys. 3.35 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/U_{aw}}$ od kubatury hali

Za właściwości dynamiczne modelu M_{RH} odpowiadają stała czasowa T oraz współczynnik tłumienia ζ . Porównując wykresy przedstawiające zależność obu współczynników od kubatury hali (rys. 3.36–37) można zauważyć pewne podobieństwo. Proste regresji jakie otrzymano dla T i ζ w etapach II i III mają zbliżone współczynniki. Wartość stałej czasowej i współczynnika tłumienia maleje wraz ze wzrostem kubatury hali. Taka zależność między współczynnikami modelu sugeruje, że w pieczarkarni o największej kubaturze (D) w etapach II i III zmiany wilgotności względnej powietrza są znacznie szybsze niż w przypadku pieczarkarni o kubaturze najmniejszej (C). Warty podkreślenia jest również fakt, że $\zeta \geq 1$ we wszystkich etapach. Model M_{RH} ma zatem zawsze charakter inercyjny.

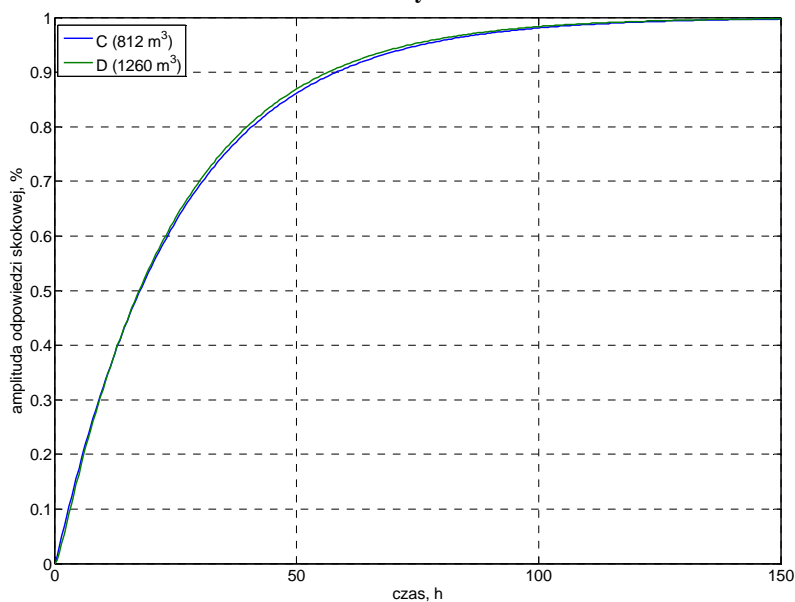


Rys. 3.36 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{RH} od kubatury hali

Interesująca jest również zależność stałej czasowej T i współczynnika tłumienia ζ od kubatury hali w etapie I. Współczynniki kierunkowe obu prostych regresji mają podobną wartość bezwzględną jednak różnią się znakiem. Im większa jest kubatura tym wyższa stała czasowa i jednocześnie mniejszy współczynnik tłumienia. Taka interakcja między współczynnikami odpowiadającymi za dynamikę modelu powoduje, że pomimo zauważalnych różnic w wartościach tych współczynników dynamika modelu pozostaje taka sama. Dowodem na to są charakterystyki skokowe wyznaczone dla dwóch skrajnych przypadków (rys. 3.38). Pieczarkarnia C (812 m³) w etapie I miała najmniejszą stałą czasową wynoszącą 2,3 h oraz największy współczynnik tłumienia równy 5,6. Dla pieczarkarni D (1260 m³) stała czasowa wynosiła 4,1 h a współczynnik tłumienia 3,1.



Rys. 3.37 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmittancji cząstkowej G_3 modelu M_{RH} od kubatury hali

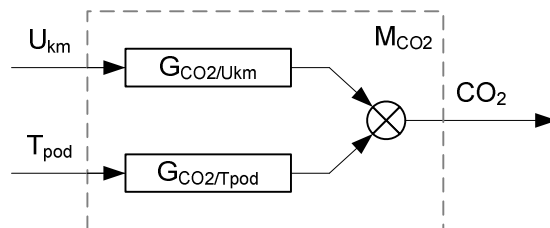


Rys. 3.38 Odpowiedź na wymuszenie jednostkowe transmittancji w postaci G_3 przy współczynnikach⁴: $T=2,3$ h, $\zeta=5,6$ dla pieczarkarni C oraz $T=4,1$ h, $\zeta=3,1$ dla pieczarkarni D

⁴ Dla lepszego zobrazowania podobieństw w dynamice modeli przyjęto wzmocnienie proporcjonalne $k_3=1$ dla obu przypadków.

3.3.4. Model dla stężenia dwutlenku węgla w powietrzu

Ostatnim analizowanym modelem jest M_{CO_2} . Jego schemat blokowy pokazany jest na rys. 3.39. W odróżnieniu od modeli omawianych dotychczas jego struktura obejmuje dwa sygnały wejściowe: sygnał nastawczy siłownika sterującego pracą przepustnic komory mieszania U_{km} oraz temperaturę podłoża T_{pod} . Sygnałem wyjściowym, oznaczonym jako CO_2 , jest stężenie dwutlenku węgla w hali.



Rys. 3.39 Schemat blokowy modelu M_{CO_2}

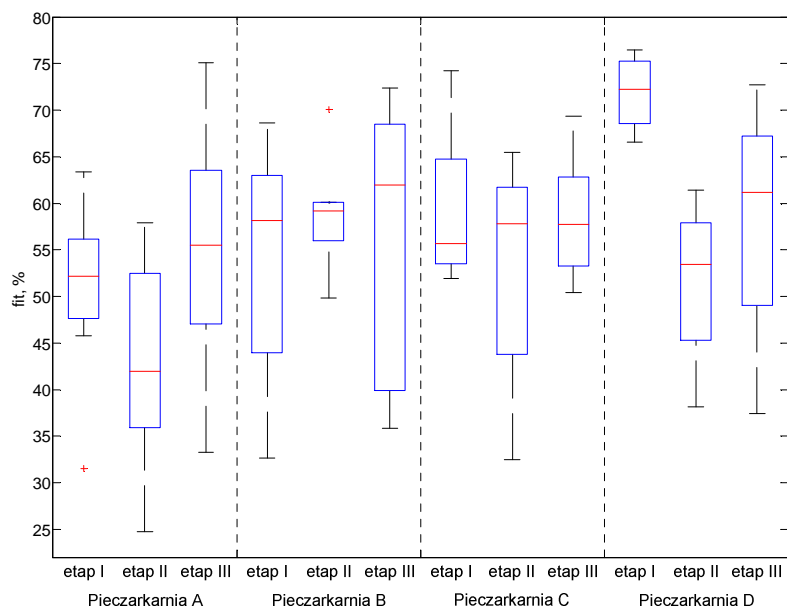
Transmitancje $G_{CO_2/U_{km}}$ i $G_{CO_2/T_{pod}}$ są opisane równaniami

$$G_{CO_2/U_{km}}(z) = \frac{b_{11}z^{-1} + b_{12}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \quad (34)$$

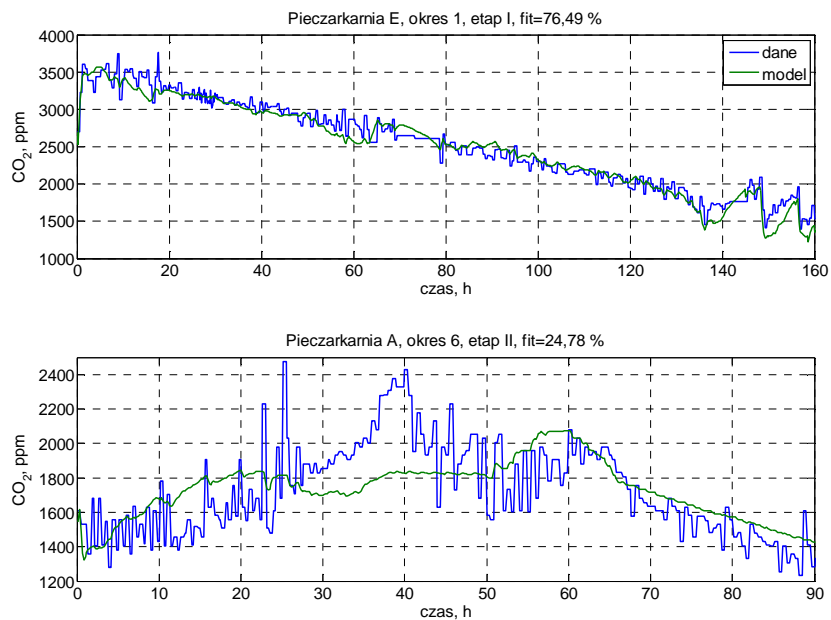
$$G_{CO_2/T_{pod}}(z) = \frac{b_{21}z^{-1} + b_{22}z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}$$

Współczynniki liczników i mianownika zawarte są w tabelach Z.34–36.

Wartości wskaźnika dopasowania wszystkich zbudowanych modeli przedstawia wykres skrzynkowy (rys. 3.40). Najwyższą wartość dopasowania $fit=76,49\%$ uzyskano dla pieczarkarni E dla okresu 1 w etapie I. Wskaźnik fit był najniższy dla pieczarkarni A w okresie 6 w etapie II i wynosił $24,78\%$. Przebiegi sygnału wyjściowego CO_2 dla obu przypadków przedstawia rys. 3.41.

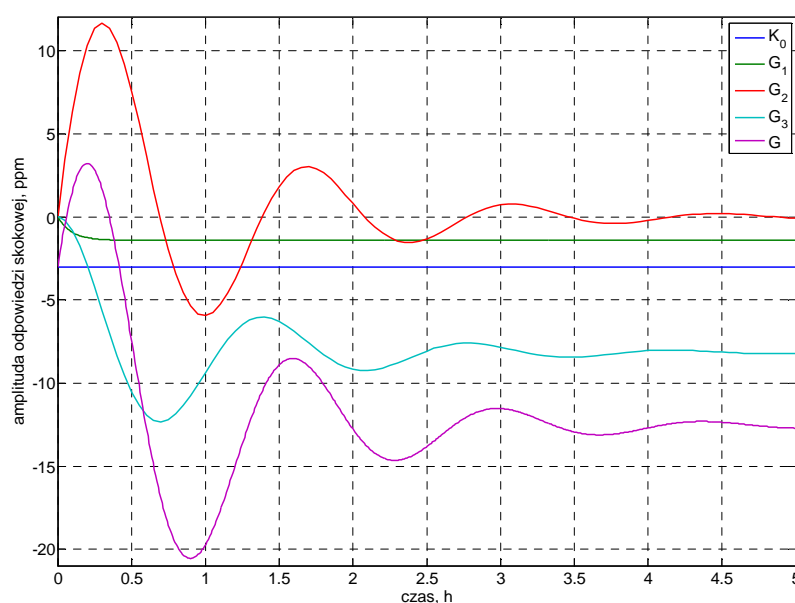


Rys. 3.40 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu M_{CO_2}



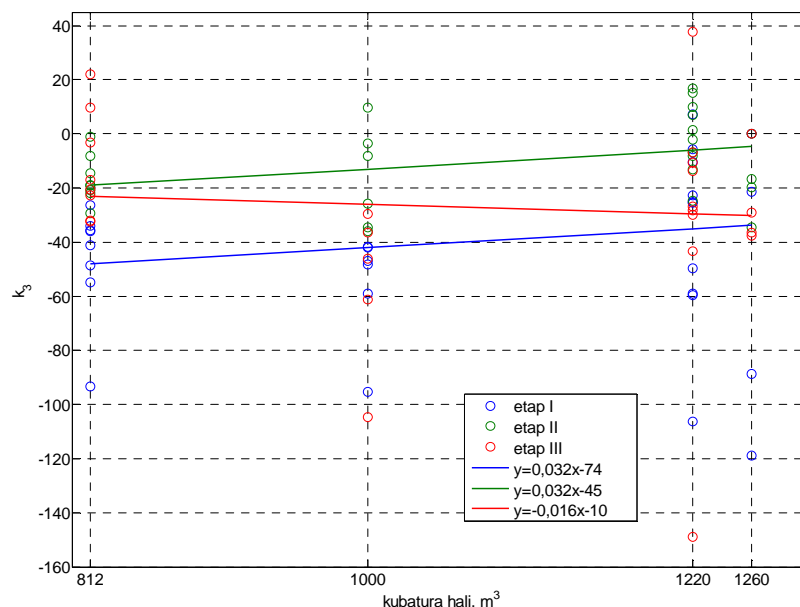
Rys. 3.41 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli M_{CO_2} o największej (wykres górny) i najmniejszej (wykres dolny) wartości współczynnika fit

Dyskretne transmitancje $G(z)$ zostały przekształcone do postaci ciągłych $G(s)$ przekształceniem Tustina (22). Następnie $G(s)$ rozłożono na połączone równolegle transmitancje składowe K_0 , G_1 , G_2 i G_3 . Współczynniki transmitancji składowych ujęte są w tabelach Z.37–43. Charakterystyki skokowe transmitancji składowych wskazały, że transmitancja G_3 najdokładniej odzwierciedla dynamikę transmitancji G (rys. 3.42). Analizę właściwości modelu ograniczono do współczynników transmitancji G_3 , tj. wzmocnienia k_3 , stałej czasowej T oraz współczynnika tłumienia ζ .



Rys. 3.42 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{CO_2/U_{km}}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych (przykład dla pieczarkarni A okres 7 etap II)

Zależność wzmocnienia proporcjonalnego transmitancji składowej G_3 modelu $G_{CO_2/U_{km}}$ od kubatury hali przedstawia rys. 3.43. W pierwszych dwóch etapach wartość wzmocnienia zwiększa się wraz ze wzrostem kubatury. Tempo wzrostu jest identyczne ze względu na taką samą wartość tangensa kąta nachylenia linii regresji do osi X. W etapie III tangens tego kąta jest dwukrotnie mniejszy. Kolejną różnicą jest znak współczynnika kierunkowego prostej regresji, dla etapu III jest on ujemny. Wszystkie wartości współczynnika k_3 określone przy pomocy regresji liniowej są ujemne. Ma to logiczne uzasadnienie. Sygnałem wejściowym transmitancji $G_{CO_2/U_{km}}$ jest sygnał sterujący pracą komory mieszania. Jest to miejsce w bloku klimatyzacyjnym, w którym ustala się proporcje powietrza świeżego z cyrkulacyjnym.



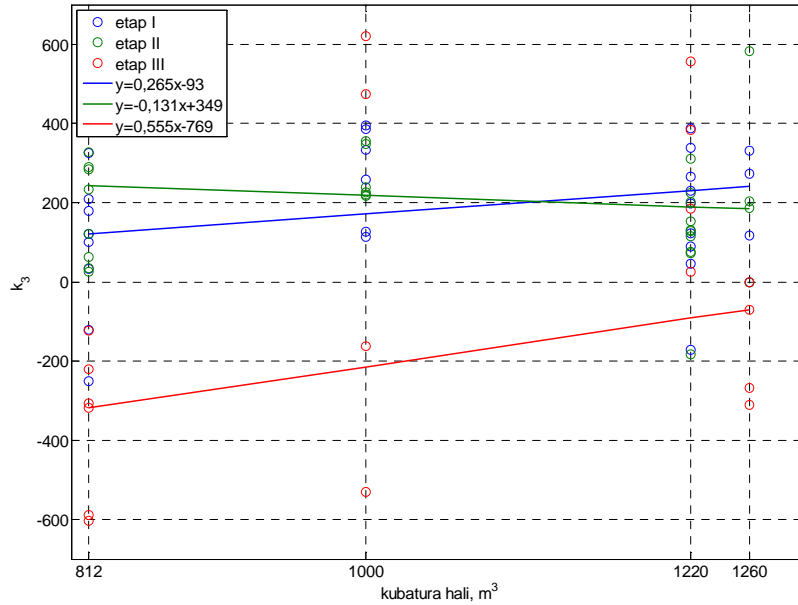
Rys. 3.43 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{CO_2/U_{km}}$ od kubatury hali

Wyższa wartość sygnału U_{km} oznacza, że do komory mieszania dostaje się więcej powietrza świeżego. Z racji tego, że powietrze świeże zawiera ok. 400 ppm dwutlenku węgla, to używa się go m.in. do obniżenia stężenia tego gazu wewnątrz hali. W etapie I, uprawa jest wtedy w stanie przejściowym pomiędzy fazą wegetatywną a generatywną, zawartość CO_2 w powietrzu stopniowo obniża się do ok. 1500 ppm. Etap II przypada na czas między wykonywaniem I a II zбору pieczarek. Wykonuje się w tym czasie tzw. szok międzyrzutowy. Stężenie dwutlenku węgla jest wtedy chwilowo podwyższane, aby później można było łagodnie je obniżyć do poziomu ok. 1200 ppm. Etap III odzwierciedla przygotowanie uprawy do rzutu III. Zawartość CO_2 utrzymuje się wtedy na najniższym poziomie 1000 ppm.

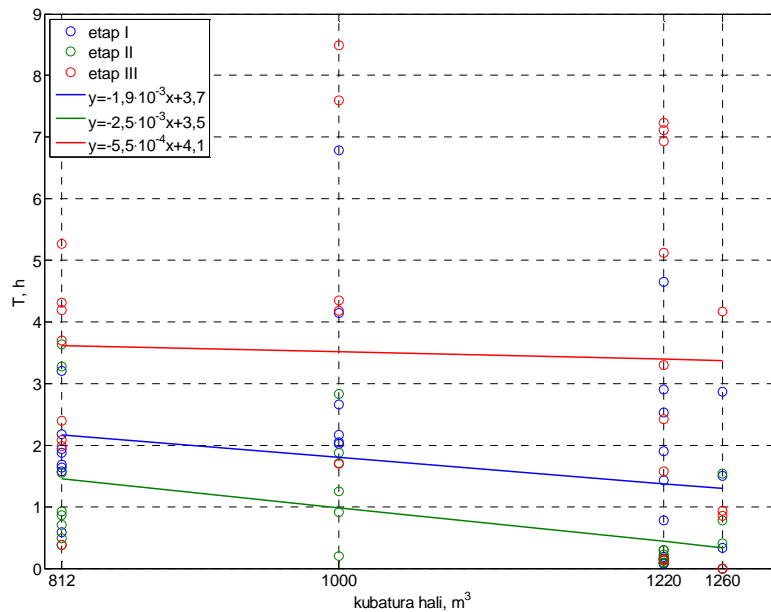
W przypadku transmitancji cząstkowej $G_{CO_2/T_{pod}}$ wzmocnienie k_3 jest proporcjonalne do kubatury hali w etapie I i III (rys. 3.44). Wzmocnienie szybciej zwiększa się w etapie III. Ma to odzwierciedlenie w wartości współczynnika kierunkowego, jest ona dwukrotnie większa w etapie III w porównaniu do I. Funkcja liniowa opisująca zmiany wzmocnienia k_3 w etapie II jest malejąca. Wartości k_3 zmieniają się w podobnym przedziale w etapie I i II.

Stała czasowa modelu M_{CO_2} jest wyraźnie zróżnicowana między kolejnymi etapami (rys. 3.45). We wszystkich etapach proste regresji są malejące. Etapy I i II mają wyższe wartości współczynnika kierunkowego niż etap III. Najdłuższe stałe czasowe wystąpiły w etapie III. W tym etapie różnica między najdłuższą

(pieczarkarnia C o kubaturze 812 m³) a najkrótszą stałą czasową (D) wyniosła ok. 20 min. Różnice w etapach I i II wynosiły odpowiednio 52 minuty i ponad 1 h.

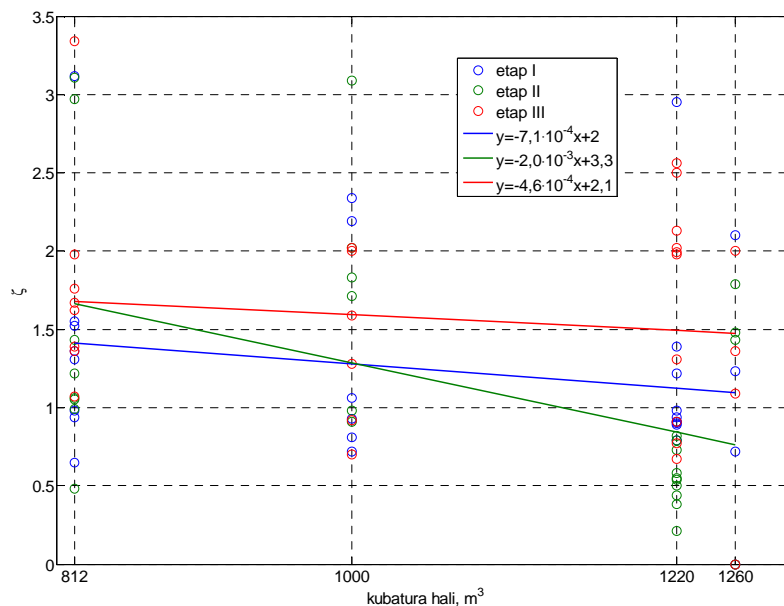


Rys. 3.44 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{CO_2/Tpod}$ od kubatury hali



Rys. 3.45 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{CO_2} od kubatury hali

Wartość współczynnika tłumienia maleje wraz ze wzrostem kubatury hali (rys. 3.46). Najmniejszą zmienność wartości ζ wykazano w etapach I i III. Przebieg w jakim zmieniała się jego wartość to $\langle 1,09; 1,41 \rangle$ dla etapu I oraz $\langle 1,47; 1,68 \rangle$ dla etapu III.



Rys. 3.46 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{CO_2} od kubatury hali

W etapie II zależność wartości współczynnika tłumienia od kubatury jest znacznie silniejsza. Różnica między wartością maksymalną a minimalną wynosi 0,9. Takie oszacowanie wskazuje, że dla dwóch pieczarekarni o największej kubaturze $\zeta < 1$. W przebiegu przejściowym odpowiedzi skokowej modelu M_{CO_2} należy się zatem spodziewać oscylacji. Maksymalne przeregulowanie M_p uzależnione jest od wartości współczynnika tłumienia i można je obliczyć na podstawie równania

$$M_p = \exp\left(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) \quad (35)$$

W przypadku pieczarekarni D (1260 m³) współczynnik tłumienia wynosił 0,76 zatem maksymalne przeregulowanie powinno wynieść ok. 2,5%.

3.4. Dyskusja wyników

Dla każdej z pieczarekarni opracowano modele $M_{T_{pod}}$, $M_{T_{pow}}$, M_{RH} oraz M_{CO_2} . Wszystkie te modele miały jednakową strukturę a różniły się tylko ilością

uwzględnionych sygnałów wejściowych. Były to trzy sygnały wejściowe, przy czym wyjątek stanowił model M_{CO_2} , w którym ograniczono liczbę sygnałów do dwóch. Każdy z tych modeli zbudowany był z kilku równolegle ze sobą połączonych gałęzi transmitancji operatorowych G . Pojedyncza transmitancja operatorowa była związana z konkretnym sygnałem wejściowym modelu. Każdą z transmitancji G rozłożono następnie na transmitancje składowe K_0 , G_1 , G_2 i G_3 zgodnie z równaniem

$$G(s) = K_0 + G_1(s) + G_2(s) + G_3(s) \quad (36)$$

Wykazano na podstawie charakterystyk skokowych, że o dynamice transmitancji G decyduje przede wszystkim składowa G_3 opisana jako

$$G_3(s) = \frac{k_3}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1} \quad (37)$$

Podjęto próbę powiązania współczynników modeli i parametrów technologicznych. Najpopularniejszym parametrem charakteryzującym pieczarkarnie jest powierzchnia uprawy. Jest ona wypadkową takich parametrów jak: szerokość regału, długość regału oraz liczba półek. Drugim parametrem była kubatura hali obliczana na podstawie wymiarów hali uprawowej.

W modelach, których sygnał wyjściowy związany był z powietrzem, tj. M_{Tpow} , M_{RH} oraz M_{CO_2} , poszukiwano zależności współczynników modelu od kubatury hali. Sygnał wyjściowy modelu M_{Tpod} związany był bezpośrednio z podłożem, dlatego w tym przypadku starano się uzależnić współczynniki modelu od powierzchni uprawy.

Istotną częścią pracy było także zbadanie czy i w jaki sposób zmieniały się współczynniki tych samych modeli w czasie uprawy. Należy pamiętać, że obiekty biologiczne w trakcie rozwoju mogą wchodzić w różne interakcje z otoczeniem. Obiektem biologicznym w pracy był organizm grzyba – pieczarki, natomiast jego otoczeniem mikroklimat hali. Ponadto pieczarki, jak wszystkie organizmy żywe, podlegają różnym, złożonym procesom, np. starzeniu. Te same zjawiska fizyczne zachodzące w trakcie uprawy mogą mieć inny przebieg na początku a inny (mniej lub bardziej intensywny) pod koniec uprawy. Z tego powodu wyszczególniono z całości uprawy trzy etapy. Były one związane z pewnymi charakterystycznymi momentami uprawy:

- etap I obejmował czas wykonywania szoku, tj. przejścia z fazy rozwoju wegetatywnego do generatywnego, po tym czasie następował zbiór owocników pieczarki (tzw. rzut I),
- etap II to czas potrzebny na zregenerowanie struktury grzybni w podłożu po intensywnym zbiorze w rzucie I i przygotowanie uprawy do rzutu II,
- etap III poprzedzał bezpośrednio zbiór prowadzony w rzucie III.

Każdy model został oszacowany w trzech wariantach bazując na zbiorach danych opisujących etap I, II i III. Powstałe w ten sposób trzy modele lokalne opisujące mikroklimat hali uprawowej. Każdy z modeli odwzorowuje zatem badany proces w pewnym otoczeniu stanu. Ich zestawienie natomiast tworzy model globalny. W przypadku zaobserwowania zmienności współczynników modeli w kolejnych etapach, można mówić o niestacjonarności mikroklimatu hali jako obiektu regulacji.

Na podstawie dokonanej analizy nie można jednoznacznie określić wpływu wzmocnienia proporcjonalnego k_3 na ogólne właściwości statyczne wszystkich modeli M . Wynika to z samej struktury modelu, którą tworzyły trzy (lub dwie w przypadku modelu M_{CO_2}) równoległe połączone ze sobą transmitancje operatorowe G . W zależności od znaku współczynnika k_3 sygnały w poszczególnych torach pomiarowych mogły się wzmacniać, jeśli miały zgodny znak, lub wzajemnie tłumić, jeśli znaki były przeciwne.

Trudno jest także porównywać wartości współczynników k_3 w różnych torach pomiarowych. Dla przykładu, w transmitancjach $G_{T_{pod}/T_{pow}}$, $G_{T_{pod}/RH}$ oraz G_{T_{pod}/CO_2} sygnały wejściowe mają nieporównywalną skalę wielkości. Temperatura zmienia się w zakresie kilku °C, wilgotność względna kilkunastu punktów procentowych a stężenie dwutlenku węgla nawet o kilka tysięcy jednostek ppm.

Zdecydowanie łatwiej jest wyciągnąć wnioski dotyczące właściwości dynamicznych analizowanych modeli. Właściwości te kształtują dwa współczynniki: stała czasowa T oraz współczynnik tłumienia ζ . Informacja o wartościach tych współczynników znajduje się w mianowniku transmitancji operatorowej. Ze względu na wykorzystanie identyfikacji parametrycznej w postaci modeli o strukturze ARX otrzymane transmitancje miały jednakowe mianowniki dla wszystkich torów pomiarowych.

Analiza modelu $M_{T_{pod}}$ wskazała na pewne podobieństwo między rozkładem wielkości plonu w trzech rzutach a wielkością stałej czasowej w trzech etapach. Tabela 3.3 prezentuje wyniki badań wielkości plonu przypadające na jednostkę powierzchni z podziałem na poszczególne rzuty. Zarówno wyniki opisywane w literaturze jak i badania własne wskazują, że wielkość plonu w ok. 50% składa się ze zbiorów prowadzonych w trakcie I rzutu, ok. 30% przypada na rzut II a ok. 20% generuje rzut III.

Tabela 3.3 Rozkład wielkości plonu na trzy rzuty [69]

Osiągane plony w roku 2007 według badań Saksona [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]				
	Rzut I	Rzut II	Rzut III	Suma
	10,4	7,6	2,1	20,1
	15,4	10,0	2,1	25,5
	11,6	10,9	6,0	28,5
	15,3	10,4	4,0	29,6
	16,0	10,1	2,9	29,0
	15,1	11,3	3,2	29,6
	14,7	10,6	3,6	28,9
	17,2	10,5	3,4	31,1
	17,0	8,9	4,7	31,2
	16,0	12,8	3,1	31,9
	15,9	18,8	2,9	29,6
	18,0	11,8	2,7	32,5
	14,4	10,1	2,9	27,4
	18,3	12,9	4,3	35,5
	17,1	11,5	3,6	32,1
	17,1	12,9	3,1	33,1
	17,8	10,8	3,5	32,1
	15,2	12,1	4,0	31,9
	15,9	12,2	4,1	32,4
Średnia	15,7	11,4	3,5	30,1
Osiągane plony w pieczarkarni C według badań własnych [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$]				
Założenie uprawy	Rzut I	Rzut II	Rzut III	Suma
24.04.2014	16,8	9,2	4,5	30,5
24.10.2014	15,7	9,2	5,4	30,3
13.03.2014	15,0	11,3	4,5	30,8
30.04.2014	17,1	9,2	3,0	29,3
Średnia	16,2	9,7	4,4	30,2

Warto zwrócić uwagę na przedział w jakim zmienia się wielkość plonu w poszczególnych rzutach. Dane zaczerpnięte z literatury wskazują na różnice między maksymalnym a minimalnym plonem ok. 8,5 kg w rzucie I, ponad 11 kg w rzucie II oraz blisko 4 kg w rzucie III. Jest to kolejny dowód potwierdzający tezę, że przy badaniu obiektów biologicznych niezwykle trudno jest uzyskać powtarzalność wyników, co znacznie zwiększa trudność ich późniejszej interpretacji. Z kolei analizując plon łączny, po odrzuceniu kilku odstających obserwacji, można dojść do wniosku, że jest on raczej stabilny i oscyluje w okolicy 31 kg. Każda uprawa posiada potencjał biologiczny umożliwiający osiągnięcie

określonej produktywności. Z danych wynika, że potencjał ten najlepiej wykorzystywany jest w rzucie I. Zdarzają się też przypadki, w których rzut I nie przyniósł plonów o oczekiwanej wielkości a potencjał uprawy został wykorzystany dopiero w rzucie II. Pytanie o to jak zwiększyć, czy choćby podtrzymać, ów potencjał umożliwiając większą produktywność rzutu III pozostaje otwarte. Choć wydaje się, że pytanie to kierowane jest raczej do biologów to z pewnością modele mikroklimatu pieczarkarni mogą okazać się niezwykle pomocne w rozwiązaniu tego problemu.

Podział o podobnym charakterze co rozkład plonów zauważono po wyznaczeniu wartości stałych czasowych, uzyskanych w wyniku regresji liniowej, odniesionych do zsumowanej wartości stałej czasowej z trzech etapów (tabela 3.4). Otrzymane stałe czasowe kolejnych etapów stanowiły odpowiednio 50, 30 i 20% ich sumy. Zauważono, że taki rozkład powtarza się dla każdej pieczarkarni. Może to stanowić ciekawą przesłankę do prowadzenia dalszych badań. Warto będzie podjąć próby znalezienia odpowiedzi na następujące pytania w przyszłych badaniach:

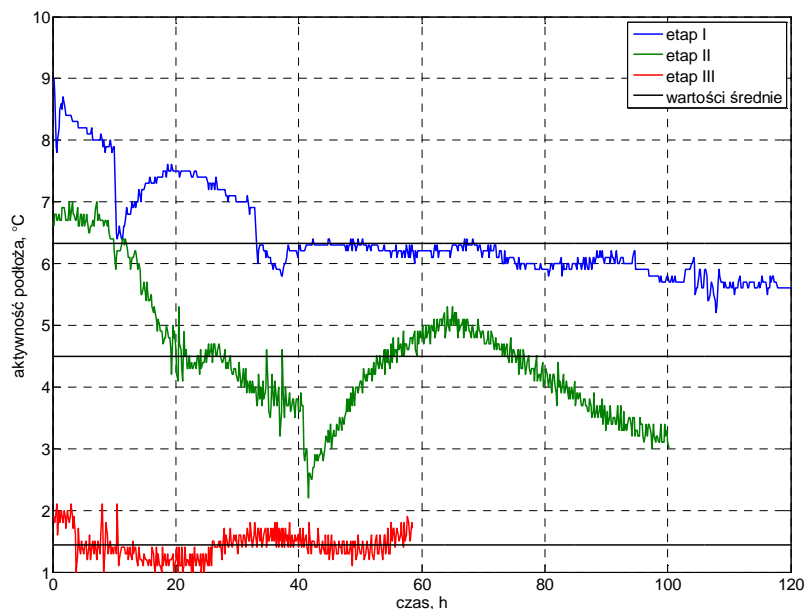
- Czy określając stałą czasową w trakcie uprawy będzie można na jej podstawie przewidywać wielkość plonu?
- Czy zmiana wartości stałej czasowej któregoś z etapów wpłynie na wielkość plonu?

System predykcji plonu na podstawie stałej czasowej przyczyniłby się do lepszej organizacji pracy pieczarkarni przez optymalne zaplanowanie harmonogramu prowadzenia zbioru. Możliwość wpływania na wielkość plonu poprzez zmianę stałej czasowej pozwoliłoby na określenie pewnych wskazówek dotyczących technologii uprawy.

Tabela 3.4 Stałe czasowe uzyskane w wyniku regresji liniowej

Pieczarkarnia	Stała czasowa			
	etap I	etap II	etap III	Suma
A	13,9	8,8	6,1	28,8
B	13,4	8,3	5,7	27,4
C	12,3	7,2	5,1	24,6
D	14,2	9,1	6,2	29,5

Takie zróżnicowanie wartości stałej czasowej w kolejnych etapach można również powiązać ze zmianą aktywności podłoża, czyli różnicą między wartością temperatury podłoża T_{pod} a powietrza T_{pow} (rys. 3.47). Jest to kolejny dowód na zasadność dokonanego podziału całego okresu produkcji na trzy etapy.



Rys. 3.47 Zmiana aktywności podłoża w kolejnych etapach na przykładzie pieczarkarni A

Analizując średnie wartości aktywności podłoża można dostrzec pewne proporcje, podobne do tych związanych ze stałą czasową. W przywołanym przykładzie średnie wartości aktywności podłoża wynoszą: 6,3 w etapie I, 4,5 w etapie II oraz 1,4°C. Ponownie sprawdzając proporcje średniej z etapu do sumy wszystkich średnich otrzymujemy: 52, 37 oraz 11%. Po przeprowadzeniu podobnej analizy dla wszystkich okresów z całego zbioru danych stwierdzono, że średnia aktywność podłoża w etapie I zawierała się w przedziale 50–55%, w etapie II przedział ten wynosił 30–35% a w etapie III 10–20% zsumowanej aktywności z trzech etapów.

Stałe czasowe wszystkich modeli, których sygnał wyjściowy związany był z powietrzem, zmniejszały się bądź pozostawały na praktycznie niezmiennym poziomie w stosunku do zwiększającej się kubatury. Wyjątkiem wykraczającym poza tę regułę jest przypadek etapu I dla modelu M_{RH} . Jak opisano w podrozdziale 3.3.3 (Model dla wilgotności względnej powietrza) wydłużanie się stałej czasowej nie prowadzi do spowolnienia reakcji modelu ze względu na zmianę współczynnika tłumienia. Pokazano, że w tym etapie dynamika modelu jest taka sama dla hali o kubaturze najmniejszej jak i największej.

Modele $M_{T_{pow}}$, M_{RH} oraz M_{CO_2} miały również podobny rozkład wartości minimalnej i maksymalnej stałej czasowej. Przedziały, w ramach których zmieniała się stała czasowa wynosiły:

- $\langle 0,6; 4,7 \rangle$ dla $M_{T_{pow}}$,
- $\langle 0,4; 4,2 \rangle$ dla M_{RH} ,
- $\langle 0,3; 3,7 \rangle$ dla M_{CO_2} .

Model $M_{T_{pod}}$ wyróżniał się większymi wartościami stałych czasowych. Zawierały się one w przedziale $\langle 5,1; 14,2 \rangle$. Zazwyczaj największe wartości stałej czasowej modeli $M_{T_{pow}}$, M_{RH} oraz M_{CO_2} występowały dla pieczarkarni C o kubaturze 812 m³. Większa wartość stałej czasowej oznacza, że wszelkie zmiany zachodzą wolniej. Należy również pamiętać, że obiekt ten miał najwyższy spośród wszystkich pieczarkarni stosunek kubatury do powierzchni uprawy. Na 1 m² uprawy pieczarkarni C przypadało aż 3 m³ powietrza. Dla porównania, w hali o kubaturze ponad połowę większej (D, 1260 m³) na 1 m² uprawy przypadało tu tylko 2,176 m³ powietrza.

Kilka ciekawych informacji niesie analiza współczynników tłumienia ζ . Badania wykazały, że wszystkie modele, oprócz $M_{T_{pod}}$, dla każdej pieczarkarni i na każdym etapie uprawy są obiektami inercyjnymi. Drobnym wyjątkiem jest również model M_{CO_2} opracowany dla pieczarkarni A i D. Dla tych dwóch przypadków w etapie II współczynnik tłumienia ζ przyjmuje wartości mniejsze niż 1. Jednak, co wykazano również w podrozdziale 3.3.4, maksymalne przeregulowanie przebiegu przejściowego nie jest duże i wynosi niecałe 3%.

Przypadkiem zupełnie odbiegającym od pozostałych po raz kolejny jest model $M_{T_{pod}}$. W odpowiedzi skokowej modeli dla wszystkich pieczarkarni w etapie I i II pojawiły się oscylacje. Były one tym silniejsze, im większa była powierzchnia uprawy. W etapie III współczynnik tłumienia kształtował się już powyżej wartości 1.

W modelu M_{RH} niektóre współczynniki k_3 były równe 0 (tabela Z.31). Sytuacja ta występowała tylko dla sygnałów wejściowych U_{osu} i U_{naw} . Są to sygnały sterujące urządzeniami wykonawczymi. Są to analogowe sygnały napięciowe z zakresu 0–10 V. W regulatorze są one przekształcane do postaci cyfrowej i wówczas zmieniają się w zakresie 0–100%. Zerowe wartości spowodowane są tym, że w danym czasie proces regulacji nie wymagał obniżenia lub podwyższenia wilgotności względnej powietrza przez uruchomienie osuszacza lub nawilżacza. Potwierdzają to również wartości współczynników licznika transmitancji dyskretnych $G_{RH/U_{osu}}$ i $G_{RH/U_{naw}}$, które w wybranych okresach również mają wartość 0 (tabela Z.25–26).

Więcej informacji o dynamice zmian mikroklimatu wewnątrz hali produkcyjnej dostarczyłby higrometr umieszczony w bloku klimatyzacyjnym, np. przed rękawem nawiewowym. Wówczas w modelu M_{RH} można byłoby uwzględnić nie tylko temperaturę powietrza nawiewanego ale również jego wilgotność.

Z pewnością taki model miałby większą dokładność. Dałoby to również możliwość wykorzystania układu kaskadowego w regulacji wilgotności podobnego do układu omawianego w rozdziale 1.1.3 (rys. 1.10). Z drugiej strony, z punktu widzenia układu regulacji wilgotności taka informacja nie jest konieczna. W obecnie stosowanych układach nastawy regulatora kształtują sygnał nastawczy osuszacza lub nawilżacza. Rozpoznanie dynamiki modelu odwzorowującego wpływ sygnału U_{osu} oraz U_{naw} bezpośrednio na wilgotność bezwzględna hali jest zatem korzystniejsze dla praktyki.

Uzyskane wskaźniki dopasowania fit dla modelu M_{RH} są niższe niż innych modeli. Przyczyną tego mogą być również częste operacje nawadniania uprawy. Zdarza się także, że technolodzy prowadzący uprawę decydują się na zwiększenie wilgotności powietrza w dawny sposób, tj. przez zroszenie ścian i podłogi hali wodą. Wszystko to dla układu automatycznej regulacji stanowi źródło dodatkowych, niemierzalnych zakłóceń.

Synteza wyników badań jest tabelaryczne zestawienie współczynników wszystkich zbudowanych modeli mikroklimatu (tabele 3.5–8). Współczynniki są wyrażone w funkcji jednego z dwóch parametrów technologicznych pieczarkarni: powierzchni uprawy S lub kubatury hali V . Poszczególne transmitancje mają postać G_3 opisaną równaniem 37.

Tabela 3.5 Współczynniki transmitancji modelu M_{Tpod} w zależności od powierzchni uprawy S

Licznik transmitancji $G_{Tpod/Tpow}$	$k_3(S) = \begin{cases} 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,41 & \text{dla etapu I} \\ 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,35 & \text{dla etapu II} \\ -32 \cdot 10^{-4} \cdot S + 1,28 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{Tpod/RH}$	$k_3(S) = \begin{cases} 35 \cdot 10^{-4} \cdot S - 1,6 & \text{dla etapu I} \\ 0,2 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,34 & \text{dla etapu II} \\ 6,2 \cdot 10^{-4} \cdot S - 0,44 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji G_{Tpod/CO_2}	$k_3(S) = \begin{cases} -1,6 \cdot 10^{-5} \cdot S + 0,009 & \text{dla etapu I} \\ 3,4 \cdot 10^{-5} \cdot S + 0,05 & \text{dla etapu II} \\ -84 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,01 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Wspólny mianownik transmitancji: $G_{Tpod/Tpow}$ $G_{Tpod/RH}$ G_{Tpod/CO_2}	$T(S) = \begin{cases} 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot S + 11 & \text{dla etapu I} \\ 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot S + 5,5 & \text{dla etapu II} \\ 3,8 \cdot 10^{-3} \cdot S + 4,1 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
	$\zeta(S) = \begin{cases} -20 \cdot 10^{-4} \cdot S + 1,5 & \text{dla etapu I} \\ -7,9 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,9 & \text{dla etapu II} \\ -1,1 \cdot 10^{-4} \cdot S + 1,1 & \text{dla etapu III} \end{cases}$

Tabela 3.6 Współczynniki transmitancji modelu M_{Tpow} w zależności od kubatury V

Licznik transmitancji $G_{Tpow/Tn}$	$k_3(V) = \begin{cases} 1,7 \cdot 10^{-12} \cdot V - 1,9 \cdot 10^{-9} & \text{dla etapu I} \\ 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot V - 1,04 & \text{dla etapu II} \\ -2,6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,23 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{Tpow/Tpod}$	$k_3(V) = \begin{cases} -1,5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 1,7 & \text{dla etapu I} \\ 9 \cdot 10^{-5} \cdot V + 0,07 & \text{dla etapu II} \\ -5,6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,54 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{Tpow/RH}$	$k_3(V) = \begin{cases} 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0,77 & \text{dla etapu I} \\ -2,6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,33 & \text{dla etapu II} \\ 5 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0,41 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Wspólny mianownik transmitancji: $G_{Tpow/Tn}$ $G_{Tpow/Tpod}$ $G_{Tpow/RH}$	$T(V) = \begin{cases} -6,5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 10 & \text{dla etapu I} \\ 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot V + 2,5 & \text{dla etapu II} \\ 2,9 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,39 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
	$\zeta(S) = \begin{cases} -2,1 \cdot 10^{-3} \cdot V + 5,3 & \text{dla etapu I} \\ 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot V + 1,4 & \text{dla etapu II} \\ -3,4 \cdot 10^{-4} \cdot V + 1,8 & \text{dla etapu III} \end{cases}$

Tabela 3.7 Współczynniki transmitancji modelu M_{RH} w zależności od kubatury V

Licznik transmitancji $G_{RH/Tpow}$	$k_3(V) = \begin{cases} -1,5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 1,51 & \text{dla etapu I} \\ -9,2 \cdot 10^{-3} \cdot V + 10 & \text{dla etapu II} \\ 43 \cdot 10^{-3} \cdot V - 52 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{RH/Uosu}$	$k_3(V) = \begin{cases} 6,9 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0,82 & \text{dla etapu I} \\ -1,3 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0,06 & \text{dla etapu II} \\ 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot V - 0,64 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{RH/Unaw}$	$k_3(V) = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot V + 0,08 & \text{dla etapu I} \\ -2,3 \cdot 10^{-3} \cdot V + 3,2 & \text{dla etapu II} \\ -8,6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 1,01 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Wspólny mianownik transmitancji: $G_{RH/Tpow}$ $G_{RH/Uosu}$ $G_{RH/Unaw}$	$T(V) = \begin{cases} 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot V - 1,03 & \text{dla etapu I} \\ -7,5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 10,2 & \text{dla etapu II} \\ -5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 6,8 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
	$\zeta(S) = \begin{cases} -5,6 \cdot 10^{-3} \cdot V + 10,1 & \text{dla etapu I} \\ -7,1 \cdot 10^{-3} \cdot V + 10,2 & \text{dla etapu II} \\ -3,5 \cdot 10^{-4} \cdot V + 5,4 & \text{dla etapu III} \end{cases}$

Tabela 3.8 Współczynniki transmitancji modelu M_{CO_2} w zależności od kubatury V

Licznik transmitancji $G_{CO_2/Ukm}$	$k_3(V) = \begin{cases} 0,032 \cdot V - 74 & \text{dla etapu I} \\ 0,032 \cdot V - 45 & \text{dla etapu II} \\ -0,016 \cdot V - 10 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Licznik transmitancji $G_{CO_2/Tpod}$	$k_3(V) = \begin{cases} 0,265 \cdot V - 93 & \text{dla etapu I} \\ -0,131 \cdot V + 349 & \text{dla etapu II} \\ 0,555 \cdot V - 769 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
Wspólny mianownik transmitancji: $G_{CO_2/Ukm}$ $G_{CO_2/Tpod}$	$T(V) = \begin{cases} -1,9 \cdot 10^{-3} \cdot V + 3,7 & \text{dla etapu I} \\ -2,5 \cdot 10^{-3} \cdot V + 3,5 & \text{dla etapu II} \\ -5,5 \cdot 10^{-4} \cdot V + 4,1 & \text{dla etapu III} \end{cases}$
	$\zeta(S) = \begin{cases} -7,1 \cdot 10^{-4} \cdot V + 2 & \text{dla etapu I} \\ -2 \cdot 10^{-3} \cdot V + 3,3 & \text{dla etapu II} \\ -4,6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 2,1 & \text{dla etapu III} \end{cases}$

Dla tak zdefiniowanego modelu w literaturze światowej dostępne są zasobne zbiory nastaw regulatorów. Jedną z najobszerniejszych pozycji jest *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules* [50], zawierająca 35 propozycji różnych zestawów nastaw regulatora PI oraz 125 regulatora PID. Wszystkie nastawy są uzależnione od współczynników modelu: wzmocnienia proporcjonalnego k_3 , stałej czasowej T oraz współczynnika tłumienia ζ .

4. Podsumowanie badań własnych

Projektowanie układu regulacji obejmuje dwa podstawowe zadania: dobór struktury układu oraz algorytmu regulacji. Zarówno struktura jak i algorytm należy dostosować do właściwości statycznych i dynamicznych obiektu regulacji. Obiektem regulacji w procesie kształtowania środowiska wewnętrznego pieczarkarni jest mikroklimat hali uprawowej. Obecnie dostępne są w literaturze modele fenologiczne, które w opisowy sposób przedstawiają związki między zmianami warunków klimatycznych a zjawiskami zachodzącymi w rozwoju roślin. Obiekty regulacji wymagają opisu formalnego, matematycznego. Z tego powodu modele fenologiczne są niewystarczające dla układów regulacji, jednak stanowią ważny fundament w budowie modeli parametrycznych.

Proces klimatyzacji w uprawie pieczarek ma specyficzny i wyjątkowy charakter. Podobieństwa do innych systemów klimatyzacji, np. szklarni lub budynku użytkowego, są tylko pozorne. Przy głębszej analizie okazuje się, że proces klimatyzacji w technologii uprawy grzybów tworzy osobną, indywidualną kategorię. Dzieje się tak za sprawą niepowtarzalnego dla innych gatunków roślin lub kierunku produkcji podsystemu środowiska wewnętrznego. Z tego powodu nie można, pomimo bardzo bogatego dorobku naukowego w obszarze modelowania mikroklimatu, wykorzystać dostępnych rozwiązań. Konieczne stało się opracowanie własnego, autorskiego modelu opisującego dynamikę hali produkcyjnej pieczarkarni.

Brak dostępnych narzędzi umożliwiających prognozowanie efektów decyzji dotyczących sterowania mikroklimatem pieczarkarni był jednym z głównych czynników decydujących o rozpoczęciu prac badawczych w tym kierunku. Podstawowym założeniem było to aby model opisywał dynamikę mikroklimatu hali w sposób możliwie dokładny oraz aby jego struktura nie była zbyt rozbudowana. Skomplikowana, rozległa obliczeniowo struktura mogłaby utrudnić późniejsze praktyczne wykorzystanie modelu w predykcyjnych układach regulacji.

W trakcie realizacji pracy postawiono dwie hipotezy badawcze. Pierwsza z nich, hipoteza H1 brzmiała *Proces kształtowania mikroklimatu hali uprawowej jest układem niestacjonarnym, ale można go podzielić na etapy opisywalne układami stacjonarnymi*. O niestacjonarności układu można mówić wtedy, gdy jego właściwości statyczne lub dynamiczne zmieniają się w czasie. Dzięki temu, że proces produkcji został podzielony na trzy etapy, a każdy z nich opisywał inny okres uprawy, można było porównać wartości współczynników modeli. Wykazano zmienność współczynników, szczególnie tych odpowiadających za właściwości dynamiczne modeli, tj. stałej czasowej T oraz współczynnika tłumienia ζ . Przyczyn niestacjonarności należy doszukiwać się w poważnych biologicznych zmianach jakie zachodzą w organizmie pieczarki w trakcie uprawy. Zmiany przejawiają się m.in. w obniżającym się stopniowo potencjale biologicznym uprawy (zbiory w trzech kolejnych rzutach stanowią odpowiednio 50,

30 oraz 20% łącznych plonów). W kolejnych etapach zmniejsza się także aktywność podłoża. Ma ona silny wpływ na intensywność procesów wymiany ciepła i masy między powietrzem a podłożem. Zmiany te wywierają silny wpływ na środowisko wewnętrzne hali uprawowej, czyli na obiekt regulacji.

Oprócz głównego celu pracy, czyli opracowania modelu odwzorowującego dynamikę mikroklimatu hali w produkcji pieczarek wyznaczono także kilka celów cząstkowych. Wszystkie cele, zarówno główny jak i cząstkowe udało się z sukcesem zrealizować.

Jako jeden z celów cząstkowych wskazano określenie zależności między parametrami charakterystycznymi uprawy a współczynnikami odpowiadającymi za dynamikę modelu. Realizacja tego celu była konieczna do sprawdzenia hipotezy badawczej H2, która brzmiała *Współczynniki modeli parametrycznych mikroklimatu produkcji pieczarek są zależne od parametrów charakterystycznych uprawy*.

Powiązania współczynników modeli z parametrami technologicznymi pieczarkarni dokonano przy pomocy regresji. Wyznaczenie parametrów regresji jest utrudnione w przypadku gdy badany obiekt ma charakter biologiczny. Biologiczny charakter obiektu przejawia się w występowaniu dużej liczby obserwacji odstających oraz w trudności z uzyskaniem powtarzalności wyników badań. Na powtarzalność wyników może mieć wpływ wiele czynników związanych ze specyfiką produkcji pieczarek: podłoże (cały proces jego produkcji począwszy od pozyskania surowca podstawowego – słomy, a na rozmieszczeniu go na półce skończywszy; jego parametry fizyczne i biologiczne), rasa grzybni pieczarki oraz występowanie niestandardowych stanów uprawy (np. choroby grzybni lub owocników). Wykorzystano narzędzie statystyczne w postaci odpornego na obserwacje odstające M-estymatora.

Wskazanie odniesienia w wewnętrznych współczynnikach modeli zbudowanych na podstawie identyfikacji parametrycznej do pewnych parametrów charakterystycznych uprawy stanowi wartość dodaną pracy. Podejście to stanowi nowość i jest niespotykane w innych pracach związanych z modelowaniem mikroklimatu.

Jest kilka praktycznych zastosowań efektów pracy. Opracowany model z pewnością będzie pomocnym narzędziem w projektowaniu systemów automatycznej regulacji. Może być również stosowany jako element predykcyjnych układów regulacji. Ich zasada polega na wykorzystaniu przyszłych stanów procesu oszacowanych na podstawie modelu. Przedstawione zależności współczynników modelu od parametrów technologicznych pieczarkarni mogą być użyte także do ponownego doboru nastaw regulatorów pracujących w obecnych systemach klimatyzacji.

Wnioski uogólniające:

- Z uwagi na to, że w uprawie występują możliwe do wyznaczenia etapy o odmiennej dynamice to układ regulacji systemu klimatyzacji powinien mieć właściwości adaptacyjne.
- Mikroklimat pieczarkarni należy sklasyfikować jako obiekt inercyjny.
- Istnieje podobieństwo między rozkładem wielkości plonu w trzech rzutach a rozkładem stałej czasowej modelu dla temperatury podłoża w trzech etapach.
- Zaproponowany kompleksowy model mikroklimatu jest prostszy w implementacji w mikroprocesorowych regulatorach klimatu niż modele fizykalne.

Plany przyszłych badań:

- Opracowanie eksperckiego systemu diagnozowania zmian lub uszkodzeń w procesie kształtowania mikroklimatu pieczarkarni.
- Wykorzystanie zbudowanego modelu do opracowania predykcyjnego układu sterowania mikroklimatem pieczarkarni.
- Bardziej szczegółowe zbadanie zależności stałej czasowej modelu $M_{T_{pod}}$ z wielkością plonu.

5. Załącznik

Tabela Z.1 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{Tpod}

Okres	a_1			a_2			a_3			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-1,63	-1,75	-1,29	0,28	0,52	-0,07	0,35	0,24	0,37
	2	-1,60	-1,46	-1,40	0,22	-0,07	-0,07	0,38	0,53	0,48
	3	-1,48	-1,63	-1,27	-0,01	0,34	0,05	0,50	0,29	0,22
	4	-1,57	-1,66	-1,00	0,18	0,37	-0,49	0,39	0,29	0,52
	5	-1,55	-1,65	-1,46	0,12	0,38	-0,03	0,43	0,27	0,49
	6	-1,52	-1,78	-1,26	0,06	0,57	-0,31	0,47	0,21	0,57
	7	-1,67	-1,66	-1,51	0,34	0,31	0,06	0,32	0,34	0,46
	8	-1,53	-1,79	-1,52	0,11	0,60	0,13	0,42	0,19	0,39
	9	-1,94	-1,86	-1,96	0,89	0,72	0,94	0,05	0,14	0,02
	10	-1,41	-1,62	-1,13	-0,10	0,28	-0,31	0,51	0,34	0,45
B	1	-1,65	-1,76	-1,67	0,30	0,52	0,48	0,34	0,24	0,20
	2	-1,46	-1,69	-1,21	-0,07	0,41	-0,36	0,53	0,28	0,58
	3	-1,47	-1,72	-1,32	-0,04	0,44	-0,29	0,52	0,27	0,62
	4	-1,56	-1,83	-1,84	0,13	0,67	0,70	0,43	0,16	0,15
	5	-1,47	-1,49	-1,37	-0,03	0,07	-0,24	0,50	0,42	0,61
	6	-1,67	-1,88	-1,41	0,35	0,76	-0,14	0,32	0,12	0,55
C	1	-1,45	-1,81	-1,10	-0,05	0,63	-0,34	0,50	0,19	0,44
	2	-1,64	-1,66	-1,58	0,29	0,33	0,19	0,35	0,33	0,40
	3	-1,58	-1,06	-1,47	0,18	-0,67	-0,05	0,40	0,74	0,51
	4	-1,56	-1,40	-1,39	0,18	-0,17	-0,19	0,38	0,57	0,58
	5	-1,41	-1,62	-1,20	-0,11	0,27	-0,46	0,52	0,35	0,67
	6	-1,37	-1,80	-1,17	-0,19	0,62	-0,31	0,56	0,18	0,48
	7	-1,72	-1,37	-1,63	0,45	-0,21	0,28	0,27	0,59	0,35
D	1	-2,10	-2,75	-2,29	1,20	2,50	1,57	-0,10	-0,75	-0,29
	2	-2,25	-2,18	-2,05	1,51	1,35	1,11	-0,26	-0,18	-0,06
	3	-2,53	-2,96	-2,68	2,07	2,92	2,36	-0,54	-0,96	-0,68
	4	-2,39	-2,24	-2,27	1,78	1,49	1,54	-0,39	-0,24	-0,27

Tabela Z.2 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpod/Tpow}$ w modelu M_{Tpod}

Okres	b_{11}			b_{12}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,0115	-0,0048	0,0154	-0,0111	0,0050	0,0031
	2	-0,0041	-0,0080	0,0113	0,0040	0,0079	-0,0127
	3	0,0072	-0,0420	0,0826	-0,0073	0,0419	-0,1162

	4	-0,0044	-0,0083	0,1072	0,0046	0,0079	-0,0482
	5	0,0032	0,0256	-0,0371	-0,0030	-0,0260	0,0240
	6	0,0066	-0,0037	-0,0173	-0,0067	0,0039	0,0145
	7	0,0145	-0,0029	-0,0029	-0,0145	0,0029	0,0029
	8	0,0111	-0,0004	-0,0004	-0,0164	0,0004	0,0004
	9	0,0069	0,0050	0,0050	-0,0069	-0,0051	-0,0051
	10	-0,0096	0,0154	0,0154	0,0100	-0,0151	-0,0151
B	1	0,0077	-0,0105	0,0142	-0,0075	0,0107	-0,0137
	2	0,0002	0,0100	0,0018	$-0,2 \cdot 10^{-4}$	-0,0100	-0,0035
	3	0,0100	-0,0348	0,0379	-0,0100	0,0346	-0,0406
	4	0,0085	-0,0160	0,0169	-0,0085	0,0161	-0,0178
	5	0,0087	0,0042	0,0029	-0,0086	-0,0046	-0,0015
	6	0,0075	0,0109	-0,0067	-0,0074	-0,0105	0,0062
C	1	0,027	-0,0083	0,2359	-0,026	0,0085	-0,2232
	2	0,017	-0,0019	0,0088	-0,017	0,0021	-0,0089
	3	0,005	-0,0288	0,0024	-0,006	0,0317	-0,0005
	4	0,037	0,0042	0,0155	-0,036	-0,0045	-0,0163
	5	-0,035	0,0215	-0,0593	0,034	-0,0214	0,0454
	6	-0,012	-0,0009	0,0873	0,013	0,0009	-0,0855
	7	0,015	0,0018	0,0070	-0,015	-0,0022	-0,0065
D	1	0,00818	$5 \cdot 10^{-6}$	0,0042	-0,0082	0,0002	-0,0044
	2	-0,0028	0,0008	0,0063	0,0029	-0,0008	-0,0061
	3	0,0078	0,0014	0,0047	-0,0078	-0,0014	-0,0041
	4	0,0298	0,0031	0,0012	-0,0288	-0,0029	-0,001

Tabela Z.3 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnej $G_{Tpod/RH}$ w modelu M_{Tpod}

Okres	b_{21}			b_{22}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,0048	0,0033	0,0008	-0,0047	-0,0031	-0,0002
	2	-0,0011	-0,0003	0,0015	0,0008	0,0004	-0,0018
	3	0,0085	-0,0011	0,0044	-0,0081	0,0015	-0,0139
	4	0,0051	0,0005	0,0139	-0,0050	-0,0004	-0,0104
	5	0,0033	-0,0015	-0,0034	-0,0033	0,0014	0,0030
	6	0,0033	-0,0010	-0,0005	-0,0031	0,0011	$-8,9 \cdot 10^{-6}$
	7	0,0040	-0,0014	-0,0023	-0,0040	0,0016	0,0022
	8	0,0053	-0,0001	0,0005	-0,0055	0,0002	-0,0006
	9	0,0025	-0,0012	0,0003	-0,0024	0,0013	-0,0002
	10	0,0041	0,0008	0,0021	-0,0040	-0,0009	-0,0019
B	1	0,0073	-0,0031	0,0012	-0,0072	0,0032	-0,0015
	2	0,0048	-0,0018	0,0021	-0,0048	0,0019	-0,0028
	3	0,0025	0,0007	0,0004	-0,0024	-0,0004	-0,0007

	4	0,0011	-0,0010	-0,0013	-0,0011	0,0010	0,0011
	5	0,0043	0,0044	0,0007	-0,0044	-0,0044	-0,0009
	6	0,0039	-0,0013	-0,0010	-0,0039	0,0013	0,0009
C	1	0,0057	-0,0034	0,0058	-0,0059	0,0035	-0,0063
	2	0,0032	-0,0003	0,0006	-0,0031	0,0004	-0,0006
	3	-0,0040	0,0029	0,0001	0,0040	-0,0017	-0,0001
	4	0,0054	-0,0036	0,0001	-0,0055	0,0035	-0,0002
	5	0,0098	0,0009	-0,0028	-0,0101	-0,0007	0,0019
	6	0,0057	-0,0008	0,0039	-0,0062	0,0009	-0,0047
	7	-0,0007	0,0022	-0,0003	0,0002	-0,0021	0,0003
D	1	0,0012	-0,0012	0,0001	-0,0011	0,0012	0,00002
	2	0,0005	0,0009	0,0002	-0,0005	-0,0008	-0,0002
	3	0,0003	0,0003	0,0006	-0,0004	-0,0003	-0,0006
	4	0,0016	0,0034	0,0010	-0,0014	-0,0033	-0,0009

Tabela Z.4 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{Tpod/CO2}$ w modelu M_{Tpod}

Okres	b_{31}			b_{32}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	$10 \cdot 10^{-6}$	$-8 \cdot 10^{-6}$	$-52 \cdot 10^{-6}$	$-9,8 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$54 \cdot 10^{-6}$
	2	$17 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$	$-26 \cdot 10^{-6}$	$-14 \cdot 10^{-6}$	$-29 \cdot 10^{-6}$	$27 \cdot 10^{-6}$
	3	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$75 \cdot 10^{-6}$	$74 \cdot 10^{-6}$	$-5,7 \cdot 10^{-6}$	$-63 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$
	4	$36 \cdot 10^{-6}$	$59 \cdot 10^{-6}$	$-83 \cdot 10^{-6}$	$-36 \cdot 10^{-6}$	$-54 \cdot 10^{-6}$	$90 \cdot 10^{-6}$
	5	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$58 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	$-51 \cdot 10^{-6}$	$-10 \cdot 10^{-6}$
	6	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$-18 \cdot 10^{-6}$	$-3,3 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$
	7	$-5,4 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-11 \cdot 10^{-6}$
	8	$11 \cdot 10^{-6}$	$41 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$	$-103 \cdot 10^{-7}$	$-40 \cdot 10^{-6}$	$-35 \cdot 10^{-6}$
	9	$-0,4 \cdot 10^{-6}$	$-0,04 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
	10	$22 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-6}$	$43 \cdot 10^{-6}$	$-209 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$-43 \cdot 10^{-6}$
B	1	$-14 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$	$-33 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
	2	$-1,4 \cdot 10^{-6}$	$86 \cdot 10^{-6}$	$21 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$-87 \cdot 10^{-6}$	$-16 \cdot 10^{-6}$
	3	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$84 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$	$-4,8 \cdot 10^{-6}$	$-83 \cdot 10^{-6}$	$-37 \cdot 10^{-6}$
	4	$4,92 \cdot 10^{-6}$	$62 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-4,6 \cdot 10^{-6}$	$-63 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
	5	$8,33 \cdot 10^{-6}$	$98 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-7,7 \cdot 10^{-6}$	$-91 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$
	6	$10,4 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$	$-9,8 \cdot 10^{-6}$	$-12 \cdot 10^{-6}$	$-13 \cdot 10^{-6}$
C	1	$22,0 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$258 \cdot 10^{-6}$	$-21 \cdot 10^{-6}$	$-6 \cdot 10^{-6}$	$-240 \cdot 10^{-6}$
	2	$-14,8 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-13 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$13 \cdot 10^{-6}$
	3	$-1,32 \cdot 10^{-6}$	$192 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$-209 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-6}$
	4	$72,1 \cdot 10^{-6}$	$34 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$-72 \cdot 10^{-6}$	$-29 \cdot 10^{-6}$	$-11 \cdot 10^{-6}$
	5	$15,9 \cdot 10^{-6}$	$42 \cdot 10^{-6}$	$108 \cdot 10^{-6}$	$-15 \cdot 10^{-6}$	$-38 \cdot 10^{-6}$	$-101 \cdot 10^{-6}$
	6	$12,3 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$-9,8 \cdot 10^{-6}$	$-46 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$
	7	$3,23 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$	$-11 \cdot 10^{-6}$	$-1,8 \cdot 10^{-6}$	$-57 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$

D	1	$-2 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-4 \cdot 10^{-6}$
	2	$10 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-10 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$
	3	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$-10 \cdot 10^{-6}$	$-4 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
	4	$-8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$

Tabela Z.5 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{Tpod}

Okres	K_0									
	$G_{Tpod/TPow}$			$G_{Tpod/RH}$			$G_{Tpod/CO2}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-0,0089	0,0032	-0,0066	-0,0037	-0,0021	-0,0006	$-79 \cdot 10^{-7}$	$47 \cdot 10^{-7}$	$57 \cdot 10^{-6}$
	2	0,0033	0,0085	-0,0130	0,0008	0,0004	-0,0018	$-12 \cdot 10^{-6}$	$32 \cdot 10^{-6}$	$29 \cdot 10^{-6}$
	3	-0,0074	0,0314	-0,0945	-0,0084	0,0010	-0,0087	$-55 \cdot 10^{-7}$	$-52 \cdot 10^{-6}$	$-59 \cdot 10^{-6}$
	4	0,0038	0,0059	-0,1569	-0,0043	-0,0003	-0,0246	$-31 \cdot 10^{-6}$	$-41 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-5}$
	5	-0,0028	-0,0187	0,0317	-0,0029	0,0010	0,0033	$-45 \cdot 10^{-7}$	$-39 \cdot 10^{-6}$	$-11 \cdot 10^{-6}$
	6	-0,0063	0,0024	0,0229	-0,0031	0,0007	0,0003	$-32 \cdot 10^{-7}$	$-19 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-6}$
	7	-0,0108	0,0022	0,0201	-0,0030	0,0012	0,0022	$41 \cdot 10^{-7}$	$22 \cdot 10^{-7}$	$-11 \cdot 10^{-6}$
	8	-0,0124	0,0003	0,0137	-0,0049	0,0001	-0,0005	$-98 \cdot 10^{-7}$	$-25 \cdot 10^{-6}$	$-32 \cdot 10^{-6}$
	9	-0,0037	-0,0029	-0,0022	-0,0013	0,0007	-0,0001	$3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
	10	0,0109	-0,0119	-0,0051	-0,0045	-0,0007	-0,0029	$-24 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-7}$	$-63 \cdot 10^{-6}$
B	1	-0,0059	0,0070	-0,0095	-0,0056	0,0021	-0,0009	$11 \cdot 10^{-6}$	$-21 \cdot 10^{-6}$	$57 \cdot 10^{-7}$
	2	-0,0001	-0,0071	-0,0042	-0,0052	0,0013	-0,0039	$15 \cdot 10^{-7}$	$-61 \cdot 10^{-6}$	$-30 \cdot 10^{-6}$
	3	-0,0104	0,0241	-0,0556	-0,0026	-0,0004	-0,0008	$-50 \cdot 10^{-7}$	$-58 \cdot 10^{-6}$	$-52 \cdot 10^{-6}$
	4	-0,0075	0,0096	-0,0102	-0,0010	0,0006	0,0007	$-42 \cdot 10^{-7}$	$-37 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-7}$
	5	-0,0089	-0,0041	-0,0029	-0,0045	-0,0042	-0,0010	$-82 \cdot 10^{-7}$	$-89 \cdot 10^{-6}$	$-25 \cdot 10^{-7}$
	6	-0,0055	-0,0061	0,0075	-0,0029	0,0007	0,0011	$-75 \cdot 10^{-7}$	$-62 \cdot 10^{-7}$	$-15 \cdot 10^{-6}$
C	1	-0,0282	0,0052	-0,3489	-0,0061	0,0021	-0,0092	$-23 \cdot 10^{-6}$	$-36 \cdot 10^{-7}$	$-38 \cdot 10^{-5}$
	2	-0,0129	0,0015	-0,0075	-0,0024	0,0003	-0,0005	$12 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-7}$	$11 \cdot 10^{-6}$
	3	-0,0048	0,0920	-0,0015	0,0034	-0,0070	-0,0001	$14 \cdot 10^{-7}$	$-61 \cdot 10^{-5}$	$-77 \cdot 10^{-7}$
	4	-0,0312	-0,0052	-0,0196	-0,0046	0,0043	-0,0001	$-61 \cdot 10^{-6}$	$-38 \cdot 10^{-6}$	$-13 \cdot 10^{-7}$
	5	0,0386	-0,0169	0,0976	-0,0112	-0,0006	0,0044	$-17 \cdot 10^{-6}$	$-32 \cdot 10^{-6}$	$-19 \cdot 10^{-5}$
	6	0,0154	0,0006	-0,1250	-0,0074	0,0005	-0,0062	$-14 \cdot 10^{-6}$	$-29 \cdot 10^{-6}$	$-13 \cdot 10^{-6}$
	7	-0,0106	-0,0026	-0,0053	0,0003	-0,0027	0,0002	$-18 \cdot 10^{-7}$	$-74 \cdot 10^{-6}$	$86 \cdot 10^{-7}$
D	1	-0,0037	$2 \cdot 10^{-5}$	-0,0017	-0,0005	0,0003	$-2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-7}$	$-16 \cdot 10^{-7}$
	2	0,0011	-0,0004	-0,0029	-0,0002	-0,0004	-0,0001	$-40 \cdot 10^{-7}$	$-15 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$
	3	-0,0025	-0,0004	-0,0013	-0,0001	-0,0001	-0,0002	$-14 \cdot 10^{-7}$	$-3 \cdot 10^{-7}$	$28 \cdot 10^{-7}$
	4	-0,0105	-0,0012	-0,0004	-0,0005	-0,0012	-0,0004	$31 \cdot 10^{-7}$	$-7 \cdot 10^{-7}$	$-8 \cdot 10^{-7}$

Tabela Z.6 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	k_1									
	$G_{Tpod/Tpow}$			$G_{Tpod/RH}$			$G_{Tpod/CO2}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	$7 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$-5 \cdot 10^{-5}$
	2	$-3 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$-6 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$-3 \cdot 10^{-5}$
	3	$7 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$-8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
	4	$-3 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$-2 \cdot 10^{-4}$
	5	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	6	$6 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$-3 \cdot 10^{-5}$
	7	$8 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$-9 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
	8	$1 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
	9	$7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$-3 \cdot 10^{-7}$	$-3 \cdot 10^{-8}$
	10	$-1 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$
B	1	$5 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$-8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-6}$
	2	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
	3	$9 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
	4	$6 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$-8 \cdot 10^{-7}$
	5	$8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
	6	$4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
C	1	$3 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	2	$1 \cdot 10^{-2}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$-9 \cdot 10^{-6}$	$-7 \cdot 10^{-7}$	$-9 \cdot 10^{-6}$
	3	$4 \cdot 10^{-3}$	$-9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6}$
	4	$3 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	5	$-4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$-9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	6	$-1 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
	7	$7 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$-7 \cdot 10^{-6}$
D	1	$-2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$-4 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-3 \cdot 10^{-6}$
	2	$2 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-4}$	$-8 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-4 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-8 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$
	3	$-3 \cdot 10^{-2}$	2,3	$-3 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$
	4	$-4 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$-7 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$-2 \cdot 10^{-6}$

Tabela Z.7 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	T_1			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,039	0,051	0,030
	2	0,037	0,026	0,026
	3	0,028	0,044	0,040
	4	0,035	0,045	0,014
	5	0,033	0,046	0,027

	6	0,030	0,054	0,019
	7	0,042	0,041	0,030
	8	0,033	0,056	0,034
	9	0,075	0,063	0,080
	10	0,025	0,040	0,020
B	1	0,040	0,051	0,053
	2	0,026	0,046	0,017
	3	0,026	0,047	0,018
	4	0,033	0,060	0,062
	5	0,027	0,031	0,020
	6	0,043	0,066	0,023
C	1	0,026	0,057	0,020
	2	0,040	0,042	0,035
	3	0,035	0,008	0,026
	4	0,036	0,022	0,021
	5	0,025	0,039	0,013
	6	0,022	0,057	0,020
	7	0,048	0,021	0,040
D	1	0,102	0,605	0,151
	2	0,142	0,120	0,094
	3	0,278	27,7	0,457
	4	0,191	0,137	0,145

Tabela Z.8 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	k_2									
	$G_{Tpod/TPow}$			$G_{Tpod/RH}$			G_{Tpod/CO_2}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	3,42	-1,33	0,11	1,45	0,83	0,01	0,003	-0,002	$-2 \cdot 10^{-3}$
	2	-0,49	-1,75	1,37	-0,10	-0,08	0,19	0,002	0,007	$-3 \cdot 10^{-3}$
	3	2,99	-1,60	5,01	3,40	-0,05	0,50	0,002	0,003	$3 \cdot 10^{-3}$
	4	-4,33	-0,76	0,63	4,84	0,04	0,10	0,035	0,005	$-7 \cdot 10^{-4}$
	5	1,40	2,30	-2,72	1,49	-0,13	-0,30	0,002	0,005	$1 \cdot 10^{-3}$
	6	3,06	-3,36	-3,07	1,46	-0,95	-0,04	0,002	0,003	$-4 \cdot 10^{-3}$
	7	17,4	-1,69	-4,36	4,81	-0,91	-0,47	-0,007	-0,002	$2 \cdot 10^{-3}$
	8	4,71	-0,33	-1,83	1,74	-0,11	0,07	0,003	0,031	$5 \cdot 10^{-3}$
	9	17,4	2,76	1,19	6,11	-0,67	0,08	-0,001	-0,001	$-3 \cdot 10^{-4}$
	10	-2,65	4,99	0,12	1,09	0,29	0,07	0,006	-0,002	$2 \cdot 10^{-3}$
B	1	5,75	-30,2	2,33	5,51	-9,09	0,24	-0,010	0,092	$-2 \cdot 10^{-3}$
	2	0,08	304	0,23	4,59	-58,6	0,21	-0,001	2,645	$2 \cdot 10^{-3}$
	3	15,6	-8,06	14,2	3,82	0,11	0,21	0,008	0,019	$1 \cdot 10^{-2}$

	4	14,3	-242	2,62	1,90	-15,5	-0,17	0,008	0,941	$-4 \cdot 10^{-4}$
	5	3,88	0,49	0,35	1,98	0,49	0,14	0,004	0,010	$3 \cdot 10^{-4}$
	6	7,59	150	-7,78	4,02	-18,4	-1,12	0,010	0,163	$2 \cdot 10^{-2}$
C	1	21,9	-3,63	15,6	4,79	-1,49	0,41	0,017	0,003	$2 \cdot 10^{-2}$
	2	6,54	-1,74	1,88	1,22	-0,31	0,13	-0,006	-0,001	$-3 \cdot 10^{-3}$
	3	3,42	-5,14	0,19	-2,32	0,39	0,02	-0,001	0,034	$1 \cdot 10^{-3}$
	4	18,1	0,63	1,00	2,70	-0,50	0,01	0,036	0,004	$7 \cdot 10^{-4}$
	5	-71,3	2,39	-3,11	20,7	0,08	-0,14	0,032	0,004	$6 \cdot 10^{-3}$
	6	-1,75	-0,11	8,82	0,85	-0,10	0,45	0,002	0,005	$8 \cdot 10^{-4}$
	7	17,0	0,46	2,03	-0,38	0,48	-0,08	0,002	0,013	$-3 \cdot 10^{-3}$
D	1	109	-0,65	3,70	15,0	-1,37	-0,06	-0,022	0,001	$3 \cdot 10^{-3}$
	2	-12,5	0,91	8,87	2,11	0,94	0,30	0,043	0,004	$-3 \cdot 10^{-3}$
	3	68,1	-1,21	1,75	3,60	-0,31	0,37	0,038	0,000	$-4 \cdot 10^{-3}$
	4	10,5	5,96	3,59	0,49	6,71	3,42	-0,003	0,004	$1 \cdot 10^{-2}$

Tabela Z.9 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	k_3									
	$G_{Tpod/TPow}$			$G_{Tpod/RH}$			G_{Tpod/CO_2}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,55	0,32	2,92	0,22	0,37	0,09	$8 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
	2	-0,07	-0,22	-0,93	-0,23	0,07	-0,23	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-4}$
	3	-0,27	-0,02	-9,14	1,00	0,10	-2,59	$-1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
	4	0,75	-0,24	2,88	0,55	0,04	0,17	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	5	0,71	-0,22	-7,48	0,20	-0,05	-0,19	$6 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
	6	-0,35	0,96	-3,32	0,60	0,31	-0,55	$6 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	7	0,22	0,01	-2,16	0,39	0,63	-0,13	$1 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	8	-10,1	0,11	-3,67	-0,30	0,15	-0,04	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$
	9	0,06	-0,50	3,76	0,14	0,17	0,09	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$-6 \cdot 10^{-4}$
	10	0,57	0,63	0,28	0,10	-0,21	0,05	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$
B	1	1,03	2,15	0,46	0,18	1,79	-0,26	$6 \cdot 10^{-4}$	$-3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	2	1,02	8,61	-0,87	0,32	18,6	-0,32	$-3 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	3	0,34	-0,26	-5,82	0,41	0,41	-0,54	$-9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-3}$
	4	0,26	9,65	-0,74	-0,09	8,77	-0,17	$3 \cdot 10^{-3}$	$-9 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	5	0,46	-0,27	1,51	-0,32	0,00	-0,22	$2 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-3 \cdot 10^{-4}$
	6	0,55	33,7	-3,85	-0,09	-3,33	-0,96	$3 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-3}$
C	1	3,50	0,40	5,13	-1,19	0,13	-0,20	$7 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$
	2	0,25	0,91	-0,07	0,28	0,43	-0,07	$6 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$
	3	-2,83	2,87	1,97	-0,31	1,16	0,04	$3 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-2}$	$-3 \cdot 10^{-5}$
	4	2,22	-0,30	-0,32	-0,03	-0,08	-0,04	$-7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$-2 \cdot 10^{-4}$
	5	-5,96	0,07	-5,04	-3,47	0,17	-0,35	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$

	6	0,22	-0,01	1,11	-0,39	0,08	-0,52	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
	7	0,89	-0,48	0,93	-2,81	0,02	$-3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$-4 \cdot 10^{-5}$
D	1	-0,29	0,92	-0,98	2,21	0,37	0,64	$-3 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	2	2,54	0,06	1,56	0,13	0,23	-0,27	$-7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$-2 \cdot 10^{-3}$
	3	4,79	0,56	2,07	-1,65	0,09	0,03	$-1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-3}$
	4	2,16	2,21	4,48	0,33	1,59	2,23	$8 \cdot 10^{-4}$	$-6 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-2}$

Tabela Z.10 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	T			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	8,26	7,40	2,39
	2	5,26	7,48	5,19
	3	10,1	2,82	2,88
	4	14,9	4,48	1,41
	5	10,4	4,27	4,85
	6	10,5	13,2	7,08
	7	16,3	11,3	7,09
	8	8,66	12,3	5,36
	9	20,8	10,1	7,61
	10	8,14	8,49	2,80
B	1	13,0	24,2	5,60
	2	15,6	80,1	4,63
	3	19,9	7,01	9,81
	4	20,0	53,6	5,31
	5	10,6	5,06	6,82
	6	15,0	51,3	17,7
C	1	14,3	9,21	3,94
	2	9,40	13,6	7,01
	3	11,7	6,98	6,59
	4	10,5	6,06	4,05
	5	22,8	4,99	4,07
	6	6,00	4,78	4,91
	7	15,2	7,65	8,29
D	1	44,7	6,09	9,87
	2	22,8	12,4	15,1
	3	26,0	3,83	5,53
	4	6,11	16,2	21,7

Tabela Z.11 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}

Okres	ζ			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,29	0,16	1,87
	2	0,20	0,24	1,33
	3	0,37	0,50	3,99
	4	1,14	0,57	1,34
	5	0,39	0,76	0,46
	6	0,29	0,50	2,31
	7	0,39	0,03	0,44
	8	0,77	0,53	0,98
	9	0,45	0,01	0,49
	10	1,41	0,81	2,55
B	1	0,28	0,12	1,86
	2	0,33	6,05	1,92
	3	0,24	0,15	1,14
	4	0,37	1,75	0,12
	5	0,54	0,92	0,24
	6	0,22	1,01	1,18
C	1	1,43	0,08	3,85
	2	0,27	0,10	0,27
	3	0,30	2,43	0,30
	4	1,47	0,43	0,19
	5	2,83	0,36	0,94
	6	0,84	0,16	3,57
	7	0,64	0,55	0,42
D	1	0,11	0,14	0,04
	2	0,45	0,11	0,48
	3	0,52	0,38	0,18
	4	0,08	0,01	0,17

Tabela Z.12 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{Tpow}

Okres	a_1			a_2			a_3			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-1,56	0,20	-1,39	0,56	-0,94	0,09	0,56	-0,94	0,09
	2	-1,15	-0,86	0,21	-0,06	-0,63	-0,80	-0,06	-0,63	-0,80
	3	-1,31	-0,34	-0,96	-0,07	-0,71	0,25	-0,07	-0,71	0,25
	4	-0,86	-1,05	-1,05	-0,61	-0,28	-0,48	-0,61	-0,28	-0,48
	5	-1,48	-0,25	-0,38	0,65	-0,35	0,03	0,65	-0,35	0,03

	6	-1,71	-0,79	-0,82	0,47	-0,25	0,01	0,47	-0,25	0,01
	7	-2,29	-1,52	-1,52	1,77	0,43	0,69	1,77	0,43	0,69
	8	-0,94	-1,16	-0,90	0,04	0,01	0,19	0,04	0,01	0,19
	9	-1,34	-2,22	-0,58	0,29	1,45	0,09	0,29	1,45	0,09
	10	-1,22	-2,22	-0,58	0,10	1,45	0,09	0,10	1,45	0,09
B	1	-2,08	-1,26	-1,26	1,17	-0,04	0,55	1,17	-0,04	0,55
	2	-1,05	-1,20	-0,86	-0,56	0,03	-0,08	-0,56	0,03	-0,08
	3	-1,38	-2,40	-1,28	0,05	2,01	-0,05	0,05	2,01	-0,05
	4	-0,89	-1,13	-1,18	-0,56	-0,57	0,13	-0,56	-0,57	0,13
	5	-1,11	-0,97	-1,30	-0,34	-0,20	0,64	-0,34	-0,20	0,64
	6	-1,02	-0,80	-1,12	-0,57	-0,48	0,29	-0,57	-0,48	0,29
C	1	-1,08	-1,63	-1,36	-0,22	0,44	0,71	-0,22	0,44	0,71
	2	-1,53	-1,56	-1,38	0,25	0,33	0,44	0,25	0,33	0,44
	3	-1,27	-1,58	-1,28	-0,09	0,33	0,17	-0,09	0,33	0,17
	4	-0,97	-1,21	-0,87	-0,29	0,03	0,14	-0,29	0,03	0,14
	5	-0,61	-1,43	-1,16	-0,49	0,13	0,06	-0,49	0,13	0,06
	6	-1,18	-1,53	-0,84	-0,29	0,58	0,44	-0,29	0,58	0,44
	7	-1,11	-1,62	-1,67	-0,05	0,53	0,74	-0,05	0,53	0,74
	8	-1,26	-1,66	-1,29	0,02	0,65	-0,02	0,02	0,65	-0,02
D	1	-0,58	-1,62	-0,95	-0,35	0,39	-0,50	-0,35	0,39	-0,50
	2	-1,50	-1,76	-1,19	0,33	0,57	-0,27	0,33	0,57	-0,27
	3	-0,95	-1,15	-0,36	-0,06	-0,24	-0,91	-0,06	-0,24	-0,91
	4	-0,54	0,65	-1,90	-0,16	-0,82	0,90	-0,16	-0,82	0,90

Tabela Z.13 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{Tpow/Tn}$ w modelu M_{Tpow}

Okres	b_{11}			b_{12}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,041	0,036	0,034	0,041	0,036	0,034
	2	0,063	0,031	0,024	0,063	0,031	0,024
	3	0,038	0,036	0,065	0,038	0,036	0,065
	4	0,050	0,023	0,024	0,050	0,023	0,024
	5	0,019	0,050	0,009	0,019	0,050	0,009
	6	0,011	0,040	0,023	0,011	0,040	0,023
	7	0,027	0,033	0,015	0,027	0,033	0,015
	8	0,042	0,028	0,033	0,042	0,028	0,033
	9	0,028	0,032	0,022	0,028	0,032	0,022
	10	0,018	0,032	0,022	0,018	0,032	0,022
B	1	0,016	0,028	0,003	0,016	0,028	0,003
	2	0,027	0,017	0,022	0,027	0,017	0,022
	3	0,020	0,010	0,000	0,020	0,010	$-4,4 \cdot 10^{-4}$

	4	0,025	0,016	0,000	0,025	0,016	$-2 \cdot 10^{-5}$
	5	0,081	0,057	0,056	0,081	0,057	0,056
	6	0,037	0,011	0,047	0,037	0,011	0,047
C	1	0,027	0,010	0,024	0,027	0,010	0,024
	2	0,028	0,019	0,014	0,028	0,019	0,014
	3	0,013	0,017	0,032	0,013	0,017	0,032
	4	0,031	0,016	0,035	0,031	0,016	0,035
	5	0,010	0,012	0,014	0,010	0,012	0,014
	6	0,018	0,004	0,007	0,018	0,004	0,007
	7	0,012	0,014	0,016	0,012	0,014	0,016
	8	0,034	0,028	0,034	0,034	0,028	0,034
D	1	0,040	0,027	0,048	0,040	0,027	0,048
	2	0,041	0,036	0,034	0,041	0,036	0,034
	3	0,063	0,031	0,024	0,063	0,031	0,024
	4	0,038	0,036	0,065	0,038	0,036	0,065

Tabela Z.14 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{Tpow/Tpod}$ w modelu M_{Tpow}

Okres	b_{21}			b_{22}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-0,050	-0,326	0,196	0,028	0,057	-0,318
	2	-0,139	-0,230	0,152	0,133	0,224	-0,133
	3	-0,029	0,053	-0,128	0,026	-0,069	0,383
	4	0,079	-0,094	-0,056	-0,080	0,083	0,308
	5	0,036	-0,446	-0,137	-0,073	0,322	-0,058
	6	0,041	-0,102	0,100	-0,041	0,115	0,059
	7	-0,058	-0,446	-0,176	0,101	0,449	0,171
	8	0,114	0,385	-0,530	-0,105	-0,379	0,412
	9	0,014	-0,120	0,018	-0,014	0,239	0,041
	10	0,099	-0,120	0,018	-0,096	0,239	0,041
B	1	0,000	-0,009	0,365	0,004	0,008	-0,340
	2	0,124	0,300	0,064	-0,123	-0,299	-0,042
	3	-0,072	-0,212	0,021	0,071	0,415	-0,044
	4	0,109	-0,012	0,049	-0,107	0,013	-0,049
	5	0,047	0,342	0,786	-0,047	-0,348	-1,059
	6	0,053	0,468	-0,367	-0,052	-0,467	0,418
C	1	0,107	-0,016	-0,139	-0,108	0,017	0,177
	2	0,026	-0,066	0,090	-0,023	0,069	-0,086
	3	-0,029	-0,084	0,206	0,031	0,085	-0,196
	4	0,033	0,206	0,422	-0,029	-0,194	-0,427
	5	0,347	0,119	-0,141	-0,341	-0,116	0,149
	6	-0,133	-0,095	0,392	0,136	0,093	-0,377

	7	-0,137	-0,077	-0,052	0,137	0,076	0,037
	8	0,204	-0,027	0,363	-0,204	0,026	-0,363
D	1	0,982	0,013	0,008	-0,970	-0,011	-0,009
	2	0,178	0,483	0,334	-0,177	-1,048	-0,336
	3	0,618	0,215	0,323	-0,612	-0,214	-0,058
	4	0,459	1,507	0,112	-0,454	0,223	-0,113

Tabela Z.15 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{Tpow/RH}$ w modelu M_{Tpow}

Okres	b_{31}			b_{32}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,048	0,007	-0,012	-0,0647	0,0264	0,0003
	2	0,026	-0,023	-0,014	-0,0217	0,0262	0,0009
	3	-0,003	0,037	-0,023	0,0061	-0,0219	-0,0143
	4	0,012	0,033	-0,010	-0,0126	-0,0299	0,0230
	5	-0,004	-0,021	0,032	-0,0123	0,0370	-0,0030
	6	0,021	-0,002	-0,013	-0,0216	0,0032	0,0103
	7	0,004	0,024	0,031	-0,0032	-0,0254	-0,0289
	8	-0,024	0,002	0,020	0,0285	-0,0036	-0,0109
	9	-0,004	-0,001	0,008	0,0043	0,0029	-0,0077
	10	-0,001	-0,001	0,008	0,0003	0,0029	-0,0077
B	1	0,047	-0,011	0,002	-0,0933	0,0123	-0,0002
	2	0,008	0,029	0,005	-0,0078	-0,0299	-0,0085
	3	0,006	0,036	0,020	-0,0044	-0,0766	-0,0166
	4	0,043	0,030	0,014	-0,0419	-0,0301	-0,0133
	5	-0,011	-0,038	-0,055	0,0116	0,0386	0,0714
	6	-0,007	-0,002	-0,020	0,0064	0,0030	0,0014
C	1	0,027	-0,002	0,000	-0,0248	0,0016	-0,0013
	2	0,009	-0,001	-0,020	-0,0091	0,0006	0,0203
	3	0,024	-0,013	-0,013	-0,0240	0,0128	0,0088
	4	0,011	-0,033	-0,031	-0,0064	0,0313	0,0135
	5	-0,001	0,012	-0,021	0,0016	-0,0127	0,0167
	6	0,024	0,000	-0,015	-0,0243	-0,0007	-0,0030
	7	0,026	-0,002	0,005	-0,0264	0,0020	-0,0053
	8	0,015	-0,005	-0,011	-0,0124	0,0055	0,0107
D	1	0,008	-0,008	-0,029	-0,0084	0,0076	0,0257
	2	0,024	0,031	-0,024	-0,0238	-0,0381	0,0266
	3	0,029	0,047	0,040	-0,0253	-0,0525	0,0100
	4	0,028	-0,005	-0,007	-0,0285	-0,0234	0,0088

Tabela Z.16 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{Tpow}

Okres	K_0									
	$G_{Tpow/Tn}$			$G_{Tpow/Tpod}$			$G_{Tpow/RH}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-0,043	-0,086	-0,108	0,233	0,833	-2,969	-0,018	-0,062	0,064
	2	-0,066	-0,080	-0,019	0,146	0,609	-0,377	-0,025	0,066	0,023
	3	-0,040	-0,030	-0,100	0,030	-0,105	0,388	0,005	-0,023	0,025
	4	-0,124	-0,030	-0,080	-0,206	0,123	-0,451	-0,032	-0,044	0,011
	5	-0,015	-0,058	-0,007	0,042	0,290	0,052	0,010	-0,055	-0,023
	6	-0,007	-0,049	-0,020	-0,028	0,145	-0,131	-0,015	0,004	0,009
	7	-0,014	-0,023	-0,009	0,012	0,314	0,102	-0,002	-0,017	-0,018
	8	-0,045	-0,026	-0,025	-0,129	-0,382	0,434	0,031	-0,003	-0,014
	9	-0,021	-0,018	-0,019	-0,011	0,028	0,011	0,003	-0,008	-0,007
	10	-0,028	-0,043	-0,027	-0,193	-1,500	0,204	0,016	0,009	-0,004
B	1	-0,027	-0,029	-0,001	-0,007	0,009	-0,232	-0,009	0,012	-0,001
	2	-0,061	-0,015	-0,021	-0,284	-0,291	-0,059	-0,018	-0,029	-0,008
	3	-0,018	-0,011	$-3 \cdot 10^{-5}$	0,068	-0,018	-0,034	-0,005	-0,012	-0,019
	4	-0,054	-0,035	$25 \cdot 10^{-6}$	-0,253	0,029	-0,043	-0,100	-0,069	-0,012
	5	-0,121	-0,071	-0,059	-0,071	-0,433	-0,555	0,017	0,048	0,051
	6	-0,085	-0,020	-0,064	-0,123	-0,910	0,574	0,015	0,004	0,025
C	1	-0,034	-0,007	-0,013	-0,139	0,011	0,098	-0,033	0,001	$-4 \cdot 10^{-4}$
	2	-0,022	-0,014	-0,009	-0,019	0,051	-0,061	-0,007	0,001	0,014
	3	-0,014	-0,012	-0,027	0,033	0,064	-0,174	-0,027	0,010	0,009
	4	-0,043	-0,014	-0,029	-0,044	-0,196	-0,408	-0,013	0,032	0,022
	5	-0,020	-0,010	-0,012	-0,682	-0,105	0,141	0,003	-0,011	0,018
	6	-0,025	-0,002	-0,003	0,190	0,060	-0,312	-0,034	$-3 \cdot 10^{-4}$	0,005
	7	-0,013	-0,009	-0,009	0,144	0,050	0,026	-0,028	0,001	-0,003
	8	-0,033	-0,017	-0,035	-0,200	0,016	-0,370	-0,014	0,003	0,011
D	1	-0,058	-0,008	-0,017	-1,562	-0,008	-0,017	-0,013	0,005	0,055
	2	-0,024	-0,018	-0,462	-0,134	-0,018	-0,462	-0,018	-0,039	0,035
	3	-0,008	-0,282	-0,136	-0,665	-0,282	-0,136	-0,029	-0,065	-0,030
	4	-0,119	0,023	-0,059	-0,552	0,023	-0,059	-0,034	0,004	0,004

Tabela Z.17 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	k_1									
	$G_{Tpow/Tn}$			$G_{Tpow/Tpod}$			$G_{Tpow/RH}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,042	0,090	0,126	-0,230	-0,878	3,690	0,017	0,064	-0,075
	2	0,061	0,081	0,073	-0,134	-0,616	0,150	0,023	-0,068	-0,020

	3	0,037	0,027	0,123	-0,027	0,095	-0,489	-0,005	0,020	-0,029	
	4	0,126	0,029	0,229	0,209	-0,120	0,583	0,032	0,042	0,103	
	5	0,012	0,046	0,013	-0,036	-0,236	-0,405	-0,008	0,045	0,048	
	6	0,005	0,056	0,003	0,018	-0,179	-0,095	0,010	-0,005	-0,001	
	7	0,105	0,012	0,137	-1,186	-0,163	-0,922	1,186	0,009	0,556	
	8	0,040	0,023	0,033	0,117	0,341	-0,068	-0,029	0,003	0,032	
	9	0,011	0,013	0,051	0,005	-0,020	0,676	-0,002	0,006	-0,005	
	10	0,083	0,058	0,102	0,192	2,126	0,084	-0,618	-0,013	0,038	
	B	1	0,027	0,026	0,024	0,007	-0,008	-0,020	0,008	-0,011	0,026
		2	0,060	0,013	0,103	0,282	0,256	0,382	0,018	0,025	-0,074
3		0,016	0,009	0,0002	-0,059	0,015	0,035	0,004	0,010	0,017	
4		0,054	0,035	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,255	-0,029	0,032	0,100	0,069	0,009	
5		0,119	0,072	0,044	0,070	0,440	0,263	-0,017	-0,049	-0,014	
6		0,085	0,021	0,070	0,122	0,946	-0,661	-0,015	-0,005	-0,027	
C	1	0,033	0,004	-0,041	0,136	-0,007	1,161	0,032	-0,001	-0,015	
	2	0,017	0,010	0,020	0,015	-0,036	0,298	0,006	0,000	0,048	
	3	0,013	0,009	0,021	-0,031	-0,046	0,133	0,025	-0,007	-0,006	
	4	0,043	0,011	0,012	0,043	0,170	-0,593	0,012	-0,027	-0,077	
	5	0,023	0,008	0,010	0,771	0,087	-0,124	-0,003	0,009	-0,015	
	6	0,024	-0,001	0,014	-0,184	0,049	-0,482	0,033	$-4 \cdot 10^{-4}$	-0,046	
	7	0,012	0,004	-0,006	-0,134	-0,022	0,016	0,026	-0,001	-0,002	
	8	0,029	0,002	0,031	0,177	-0,002	0,333	0,011	0,000	-0,010	
D	1	0,100	0,006	0,017	2,826	0,006	0,017	0,024	-0,004	-0,054	
	2	0,016	0,016	0,445	0,091	0,016	0,445	0,012	0,036	-0,034	
	3	0,008	0,273	0,090	0,688	0,273	0,090	0,029	0,064	0,019	
	4	0,136	-0,018	-0,002	-0,030	-0,018	-0,002	-0,054	-0,003	0,0001	

Tabela Z.18 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	T_1			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,021	0,020	0,012
	2	0,036	0,011	1,427
	3	0,029	0,027	0,031
	4	0,011	0,024	3,170
	5	0,047	0,050	0,360
	6	0,050	0,040	0,371
	7	31,94	0,062	26,85
	8	0,033	0,042	0,733
	9	0,067	0,046	3,276
	10	15,85	0,037	2,956

B	1	0,020	0,033	2,313
	2	0,011	0,042	3,363
	3	0,034	0,043	0,031
	4	0,013	0,011	0,059
	5	0,020	0,033	1,811
	6	0,011	0,018	0,037
C	1	0,027	0,052	0,318
	2	0,042	0,048	11,00
	3	0,029	0,046	0,049
	4	0,025	0,041	0,753
	5	0,022	0,038	0,043
	6	0,021	0,100	0,360
	7	0,041	0,064	0,103
	8	0,037	0,079	0,033
D	1	0,043	0,049	0,015
	2	0,052	0,023	0,021
	3	0,053	0,024	0,051
	4	13,91	0,038	0,084

Tabela Z.19 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	k_2									
	$G_{Tpow/Tn}$			$G_{Tpow/Tpod}$			$G_{Tpow/RH}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	26,2	3,10	-0,02	-143	-30,1	-0,87	11,3	2,29	0,01
	2	1,78	1,32	$3 \cdot 10^{-4}$	-3,94	-9,96	0,01	0,68	-1,08	-0,001
	3	3,07	7,34	0,07	-2,25	25,6	-0,25	-0,41	5,51	-0,02
	4	0,61	0,74	0,002	1,00	-3,07	0,02	0,15	1,08	-0,001
	5	0,47	3,45	$2 \cdot 10^{-4}$	-1,35	-17,4	0,01	-0,30	3,30	0,001
	6	4,49	0,27	0,002	17,6	-0,75	0,02	9,27	-0,02	-0,001
	7	0,00	1,22	0,002	0,00	-17,1	-0,02	0,00	0,96	0,003
	8	0,02	0,26	0,003	0,05	3,80	-0,06	-0,01	0,03	0,001
	9	3,30	3,44	0,001	1,69	-5,42	-0,003	-0,50	1,51	$4 \cdot 10^{-4}$
	10	0,002	0,02	0,003	0,02	0,36	-0,03	0,00	0,00	$2 \cdot 10^{-4}$
B	1	0,91	1,96	$-2 \cdot 10^{-5}$	0,22	-0,62	0,03	0,30	-0,85	$-1 \cdot 10^{-4}$
	2	1,79	0,25	0,003	8,40	4,93	0,01	0,54	0,49	0,001
	3	2,24	187	0,02	-8,42	301	5,89	0,57	201	3,01
	4	0,24	0,96	$-5 \cdot 10^{-4}$	1,11	-0,79	0,77	0,44	1,90	0,22
	5	9,24	2,93	0,01	5,42	17,9	0,07	-1,32	-1,98	-0,01
	6	3,72	0,16	0,09	5,38	7,07	-0,78	-0,67	-0,03	-0,04

C	1	0,60	0,74	0,008	2,49	-1,31	-0,14	0,60	-0,12	0,002
	2	4,30	2,04	0,002	3,69	-7,28	0,01	1,40	-0,08	-0,004
	3	1,29	1,61	0,15	-3,04	-8,47	0,93	2,42	-1,29	-0,05
	4	0,21	0,10	0,004	0,22	1,51	0,07	0,06	-0,24	-0,002
	5	0,14	0,29	0,03	4,61	3,18	-0,38	-0,02	0,34	-0,05
	6	2,76	0,05	$-3 \cdot 10^{-4}$	-21,5	-2,88	0,05	3,84	0,02	0,001
	7	36,9	1,05	0,42	-405	-5,92	-1,11	77,5	-0,15	0,16
	8	0,84	3,35	1,53	5,05	-3,05	16,3	0,33	-0,64	-0,49
D	1	-0,09	1,22	0,26	-3,05	1,22	0,26	-0,03	-0,81	-0,84
	2	1,58	8,34	7,63	9,02	8,34	7,63	1,21	18,5	-0,58
	3	0,04	13,9	5,86	3,54	13,9	5,86	0,16	3,23	1,25
	4	0,01	-22,1	16,1	0,04	-22,1	16,1	0,00	-3,52	-1,26

Tabela Z.20 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	k_3									
	$G_{Tpow/Tn}$			$G_{Tpow/Tpod}$			$G_{Tpow/RH}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	3,95	0,96	0,10	-34,0	-4,97	-0,59	26,0	2,70	-0,06
	2	0,49	0,42	0,02	-1,02	-1,50	0,45	0,64	0,83	-0,03
	3	0,23	0,09	0,05	-1,40	2,45	0,26	1,37	-0,54	-0,08
	4	0,23	0,71	0,08	-0,14	-2,11	0,48	-0,04	0,53	-0,01
	5	0,17	1,37	0,01	1,06	-1,08	-0,01	0,07	-0,28	0,03
	6	0,25	0,37	0,03	0,59	0,84	0,25	-0,21	0,05	-0,02
	7	0,05	0,19	0,03	-0,04	0,54	-0,37	$-4 \cdot 10^{-3}$	-0,24	0,06
	8	0,02	0,19	0,05	0,04	0,39	-0,94	0,01	-0,09	0,03
	9	0,89	0,46	0,03	0,06	-0,26	-0,03	0,47	0,20	0,01
	10	0,05	0,18	0,05	0,36	-0,39	-0,44	-0,03	0,05	0,01
B	1	0,24	0,28	0,00	-0,44	-0,59	0,63	0,74	0,56	$4 \cdot 10^{-4}$
	2	0,34	0,29	0,03	0,29	0,14	0,09	0,12	-0,05	0,02
	3	0,67	-2,50	-0,91	-0,77	-159	-22,1	0,79	112	3,32
	4	0,25	0,31	0,00	0,13	0,47	0,03	0,08	-0,11	0,09
	5	0,84	0,41	0,10	-0,06	-1,72	0,99	0,25	0,29	-0,09
	6	0,25	0,13	0,13	1,12	0,02	0,19	-0,17	0,14	-0,06
C	1	0,17	0,15	0,09	-0,08	0,55	-1,07	0,30	0,02	0,01
	2	0,51	0,28	0,03	2,31	1,59	0,19	-0,40	-0,19	-0,05
	3	0,16	0,32	0,03	0,85	0,73	0,30	0,21	-0,30	-0,10
	4	0,05	0,16	0,06	0,17	0,54	0,98	0,22	-0,08	-0,03
	5	0,06	0,25	0,04	0,68	0,46	0,10	0,03	-0,07	-0,06
	6	0,56	0,33	0,00	2,73	-0,35	0,83	-0,53	-0,06	$-4 \cdot 10^{-3}$
	7	-9,21	0,42	0,22	-3,12	-0,58	-1,97	-5,24	-0,04	0,02

	8	-0,01	0,09	-0,15	0,13	-0,85	0,17	0,43	0,45	-0,18
D	1	0,12	0,92	-0,13	-0,96	0,92	-0,13	-0,03	0,02	-0,63
	2	0,33	5,61	-0,32	0,25	5,61	-0,32	-0,02	-1,48	0,36
	3	0,03	0,24	-0,07	0,20	0,24	-0,07	0,12	-2,11	1,15
	4	0,18	2,36	-0,88	0,82	2,36	-0,88	0,05	0,30	1,44

Tabela Z.21 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	T			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	14,3	3,75	0,34
	2	2,24	3,29	0,04
	3	4,20	7,92	0,56
	4	1,75	2,67	0,02
	5	2,06	2,76	0,07
	6	9,29	1,14	0,07
	7	0,14	2,31	0,14
	8	0,28	1,24	0,09
	9	3,64	5,32	0,06
	10	0,08	0,70	0,09
B	1	3,37	3,73	0,11
	2	4,24	1,62	0,08
	3	4,93	50,0	5,83
	4	1,57	4,22	1,33
	5	5,14	2,96	0,08
	6	5,16	1,79	0,57
C	1	2,14	3,79	0,17
	2	5,58	4,45	0,12
	3	4,60	4,40	0,83
	4	1,18	1,11	0,09
	5	1,77	2,34	0,62
	6	6,12	1,46	0,10
	7	21,4	3,42	1,59
	8	2,11	3,83	2,97
D	1	0,63	4,53	2,67
	2	2,90	12,0	2,30
	3	0,84	3,73	2,37
	4	0,06	13,3	4,59

Tabela Z.22 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpow}

Okres	ζ			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	18,9	10,12	3,07
	2	3,82	4,34	0,48
	3	2,98	1,68	2,83
	4	2,41	3,91	0,76
	5	3,55	5,83	0,70
	6	1,29	5,13	0,67
	7	0,96	2,80	0,80
	8	0,40	2,48	0,81
	9	8,19	2,10	0,41
	10	0,52	4,14	0,68
B	1	3,26	4,03	0,63
	2	2,70	2,89	0,99
	3	3,30	58,8	5,43
	4	2,09	1,30	3,80
	5	4,98	7,60	0,82
	6	3,92	4,12	2,35
C	1	3,24	1,67	0,75
	2	2,49	2,42	0,99
	3	3,75	1,81	1,39
	4	2,18	1,86	0,84
	5	7,16	1,42	1,18
	6	4,44	3,36	0,54
	7	48,4	2,89	2,56
	8	2,66	4,20	2,94
D	1	4,40	1,72	3,46
	2	2,66	1,45	1,62
	3	3,45	3,94	1,19
	4	0,61	0,65	1,61

Tabela Z.23 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{RH}

Okres	a_1			a_2			a_3			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-1,59	-1,32	-1,21	-1,59	-1,32	-1,21	0,26	-0,30	-0,25
	2	-1,48	-1,53	-1,21	-1,48	-1,53	-1,21	-0,07	0,05	-0,12
	3	-1,59	-1,35	-1,29	-1,59	-1,35	-1,29	0,12	0,03	-0,02
	4	-1,59	-1,56	-0,91	-1,59	-1,56	-0,91	0,18	-0,29	-0,34

	5	-1,56	-0,88	-0,92	-1,56	-0,88	-0,92	0,23	-0,61	-0,34
	6	-1,05	-1,24	-0,86	-1,05	-1,24	-0,86	0,00	-0,09	-0,23
	7	-1,75	-1,74	-1,07	-1,75	-1,74	-1,07	0,03	-0,21	-0,40
	8	-1,96	-1,71	-1,46	-1,96	-1,71	-1,46	-0,15	-0,34	-0,04
	9	-1,56	-1,30	-1,79	-1,56	-1,30	-1,79	0,08	-0,28	0,17
	10	-0,88	-1,14	-1,53	-0,88	-1,14	-1,53	-0,08	0,00	-0,28
B	1	-1,49	-1,81	-1,23	-1,49	-1,81	-1,23	0,39	0,05	-0,16
	2	-1,48	-2,00	-1,60	-1,48	-2,00	-1,60	0,15	-0,06	0,24
	3	-1,58	-1,53	-1,94	-1,58	-1,53	-1,94	0,20	0,30	-0,19
	4	-1,62	-2,20	-2,00	-1,62	-2,20	-2,00	0,07	-0,60	-0,59
	5	-1,58	-2,22	-2,04	-1,58	-2,22	-2,04	0,09	-0,58	-0,60
	6	-1,31	-1,68	-1,40	-1,31	-1,68	-1,40	0,06	-0,02	0,16
C	1	-0,94	-1,54	-1,59	-0,94	-1,54	-1,59	-0,20	0,03	-0,02
	2	-1,24	-1,61	-1,51	-1,24	-1,61	-1,51	0,00	0,31	0,20
	3	-0,70	-1,48	-1,52	-0,70	-1,48	-1,52	0,02	0,17	0,15
	4	-0,93	-1,74	-1,71	-0,93	-1,74	-1,71	0,22	-0,09	0,17
	5	-1,21	-1,35	-1,62	-1,21	-1,35	-1,62	-0,18	0,18	0,11
	6	-0,97	-0,99	-1,29	-0,97	-0,99	-1,29	0,14	-0,06	-0,02
	7	-0,83	-0,98	-1,07	-0,83	-0,98	-1,07	0,04	0,33	0,19
	8	-1,21	-1,50	-1,99	-1,21	-1,50	-1,99	-0,21	0,19	-0,08
D	1	-0,62	-1,23	-1,29	-0,62	-1,23	-1,29	0,03	0,17	0,03
	2	-0,53	-0,81	-1,11	-0,53	-0,81	-1,11	-0,21	0,09	0,06
	3	0,10	0,13	-0,24	0,10	0,13	-0,24	-0,07	-0,24	0,06
	4	-0,28	-0,99	-1,54	-0,28	-0,99	-1,54	-0,25	0,26	-0,05

Tabela Z.24 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{RH/TPow}$ w modelu M_{RH}

Okres	b_{11}			b_{12}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,18	1,55	0,54	0,18	1,55	0,54
	2	-0,16	0,09	1,51	-0,16	0,09	1,51
	3	-0,04	-0,32	0,85	-0,04	-0,32	0,85
	4	-0,32	0,16	2,02	-0,32	0,16	2,02
	5	-0,01	-0,20	0,61	-0,01	-0,20	0,61
	6	0,94	-0,60	0,86	0,94	-0,60	0,86
	7	0,50	-0,29	-0,88	0,50	-0,29	-0,88
	8	0,53	-0,08	2,16	0,53	-0,08	2,16
	9	1,13	-0,75	1,91	1,13	-0,75	1,91
	10	-0,44	-0,78	0,01	-0,44	-0,78	0,01
B	1	0,20	-0,02	-2,71	0,20	-0,02	-2,71
	2	1,27	0,06	1,16	1,27	0,06	1,16
	3	0,14	-0,15	-0,85	0,14	-0,15	-0,85

	4	0,06	1,08	0,71	0,06	1,08	0,71
	5	0,01	0,99	0,75	0,01	0,99	0,75
	6	0,59	0,06	0,10	0,59	0,06	0,10
C	1	0,47	-0,49	1,40	0,47	-0,49	1,40
	2	0,12	-0,06	-2,15	0,12	-0,06	-2,15
	3	-0,18	-0,15	-1,82	-0,18	-0,15	-1,82
	4	-0,14	-0,77	-0,66	-0,14	-0,77	-0,66
	5	0,58	-0,33	-2,03	0,58	-0,33	-2,03
	6	-0,94	-1,31	-0,75	-0,94	-1,31	-0,75
	7	-1,72	-1,85	-2,85	-1,72	-1,85	-2,85
	8	0,46	0,62	0,37	0,46	0,62	0,37
D	1	0,07	-0,41	2,35	0,07	-0,41	2,35
	2	-0,15	-0,19	0,85	-0,15	-0,19	0,85
	3	0,56	-0,09	-0,71	0,56	-0,09	-0,71
	4	0,53	-0,94	-0,56	0,53	-0,94	-0,56

Tabela Z.25 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{RH/Uosu}$ w modelu M_{RH}

Okres	b_{21}			b_{22}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,001	-0,037	-0,051	-0,001	0,037	0,048
	2	-0,017	-0,044	-0,055	0,017	0,044	0,054
	3	0,000	0,002	-0,017	0,000	-0,002	0,018
	4	-0,014	-0,019	-0,091	0,014	0,018	0,081
	5	-0,007	0,018	-0,018	0,008	-0,019	0,019
	6	-0,019	0,005	-0,013	0,013	-0,005	0,012
	7	-0,012	-0,023	-0,023	0,013	0,023	0,022
	8	-0,010	-0,018	-0,043	0,010	0,018	0,042
	9	-0,016	-0,058	-0,047	0,016	0,055	0,046
	10	-0,013	-0,011	-0,032	0,012	0,010	0,033
B	1	-0,004	-0,004	-0,032	0,005	0,005	0,032
	2	-0,008	-0,009	-0,012	0,008	0,009	0,012
	3	-0,012	0,001	-0,003	0,012	-0,001	0,003
	4	-0,006	-0,005	-0,009	0,006	0,005	0,006
	5	-0,007	-0,007	-0,010	0,007	0,007	0,007
	6	-0,022	-0,001	-0,011	0,022	-0,001	0,012
C	1	-0,037	-0,005	-0,030	0,034	0,004	0,030
	2	-0,010	-0,011	-0,006	0,010	0,011	0,006
	3	-0,012	0,008	-0,005	0,012	-0,008	0,004
	4	-0,004	0,008	-0,046	0,002	-0,007	0,047
	5	-0,007	0,003	-0,017	0,007	-0,003	0,017
	6	-0,014	-0,004	-0,006	0,012	0,004	0,006

	7	-0,019	0,003	0,047	0,018	-0,003	-0,048
	8	-0,038	0,009	-0,013	0,035	-0,008	0,013
D	1	0,008	-0,007	0,037	-0,009	0,007	-0,039
	2	0,004	-0,019	0,002	-0,003	0,017	-0,002
	3	0,036	0,006	0,021	-0,029	-0,011	-0,025
	4	-0,024	-0,013	-0,058	0,022	0,012	0,058

Tabela Z.26 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{RH/U_{naw}}$ w modelu M_{RH}

Okres	b_{31}			b_{32}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,009	0,071	-0,016	-0,010	-0,070	0,011
	2	0,019	0,200	0,097	-0,019	-0,170	-0,082
	3	0,009	0,040	0,000	-0,009	-0,034	0,000
	4	-0,002	0,323	0,000	0,002	-0,366	0,000
	5	0,009	-0,001	0,008	-0,009	0,004	0,022
	6	0,021	0,004	0,006	-0,020	-0,001	-0,008
	7	0,012	-0,001	0,114	-0,012	0,003	-0,115
	8	0,005	-0,058	0,000	-0,005	0,061	0,000
	9	0,006	0,165	1,071	-0,006	0,058	-1,742
	10	-0,005	0,066	0,014	0,005	-0,065	-0,0005
B	1	-0,002	0,019	0,072	0,002	-0,017	-0,077
	2	0,036	0,000	0,000	-0,035	0,000	0,000
	3	0,032	0,020	0,000	-0,031	-0,021	0,000
	4	0,037	0,026	0,357	-0,037	-0,021	-0,351
	5	0,034	0,040	0,342	-0,034	-0,027	-0,346
	6	0,062	0,110	0,096	-0,059	-0,116	-0,094
C	1	0,023	0,045	0,106	-0,021	-0,046	-0,097
	2	0,007	0,092	0,185	-0,007	-0,081	-0,097
	3	0,014	0,026	0,043	-0,010	-0,026	-0,050
	4	-0,017	0,038	0,061	0,017	-0,035	-0,058
	5	0,022	0,085	0,296	-0,023	-0,072	-0,310
	6	0,043	0,074	0,124	-0,043	-0,070	-0,122
	7	0,002	0,044	0,083	-0,004	-0,041	-0,087
	8	0,020	0,143	0,230	-0,015	-0,117	-0,235
D	1	0,002	0,059	0,000	0,033	-0,053	0,000
	2	0,013	0,069	0,027	-0,011	-0,067	-0,026
	3	-0,001	-0,002	-0,003	-0,003	0,0005	0,001
	4	0,019	0,000	0,000	0,0005	0,000	0,000

Tabela Z.27 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{RH}

Okres	K_0									
	$G_{RH/tpow}$			$G_{RH/Uosu}$			$G_{RH/Unaw}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-0,139	-0,958	-0,450	-0,001	0,023	0,034	-0,007	-0,043	0,009
	2	0,101	-0,063	-1,199	0,011	0,030	0,041	-0,012	-0,125	-0,068
	3	0,024	0,234	-0,574	0,000	-0,002	0,013	-0,006	-0,028	0,000
	4	0,230	-0,095	-1,604	0,010	0,010	0,068	0,002	-0,187	0,000
	5	0,007	0,126	-0,583	0,005	-0,012	0,014	-0,007	0,002	0,006
	6	-0,894	0,456	-0,800	0,015	-0,004	0,011	-0,020	-0,002	-0,006
	7	-0,288	0,155	0,550	0,007	0,012	0,015	-0,007	0,001	-0,078
	8	-0,220	0,032	-1,504	0,005	0,009	0,029	-0,002	0,029	0,000
	9	-0,769	0,461	-1,223	0,011	0,035	0,029	-0,004	-0,034	-0,866
	10	0,427	0,685	0,050	0,013	0,009	0,018	0,005	-0,057	-0,004
B	1	-0,178	0,016	1,789	0,004	0,003	0,023	0,002	-0,010	-0,053
	2	-0,951	-0,029	-0,858	0,006	0,004	0,009	-0,026	0,000	0,000
	3	-0,102	0,127	0,393	0,009	-0,001	0,001	-0,023	-0,017	0,000
	4	-0,037	-0,386	-0,255	0,004	0,002	0,003	-0,024	-0,008	-0,136
	5	-0,007	-0,355	-0,277	0,005	0,003	0,003	-0,023	-0,012	-0,130
	6	-0,465	-0,013	-0,117	0,018	0,0002	0,009	-0,048	-0,067	-0,076
C	1	-0,419	0,325	-0,904	0,031	0,003	0,019	-0,019	-0,030	-0,063
	2	-0,094	0,049	1,665	0,008	0,008	0,005	-0,006	-0,066	-0,107
	3	0,270	0,118	1,265	0,018	-0,006	0,003	-0,018	-0,020	-0,034
	4	0,231	0,420	0,435	0,004	-0,004	0,030	0,024	-0,020	-0,039
	5	-0,371	0,277	1,270	0,005	-0,003	0,011	-0,016	-0,067	-0,200
	6	1,108	1,243	0,280	0,016	0,003	0,004	-0,051	-0,068	-0,092
	7	2,079	2,828	3,080	0,023	-0,005	-0,053	-0,004	-0,064	-0,096
	8	-0,133	-0,483	-0,179	0,024	-0,006	0,006	-0,011	-0,099	-0,112
D	1	-0,080	0,387	-1,852	-0,013	0,007	-0,030	0,024	-0,053	0,000
	2	0,205	0,248	-0,793	-0,005	0,025	-0,002	-0,016	-0,094	-0,025
	3	-1,103	2,102	2,102	-0,102	-0,032	-0,066	-0,003	0,004	0,006
	4	-0,920	1,262	0,346	0,041	0,017	0,036	-0,017	0,000	0,000

Tabela Z.28 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{RH}

Okres	k_1									
	$G_{RH/tpow}$			$G_{RH/Uosu}$			$G_{RH/Unaw}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,102	-3,229	-98	0,000	-0,052	-1,408	0,005	-0,020	-1,935
	2	-31	0,024	-79	0,379	-0,011	-0,297	-0,140	0,043	6,907

	3	-0,012	-0,078	-0,447	0,000	0,001	0,012	0,003	0,009	0,000	
	4	-0,147	-69	-2,227	-0,006	-2,431	-0,138	-0,001	-136	0,000	
	5	-0,005	-1,182	-5,777	-0,004	-0,062	0,045	0,005	0,208	0,546	
	6	0,438	3,244	-2,967	-0,006	1,518	-0,081	0,010	9,898	-0,128	
	7	0,043	3,702	-66	-0,001	0,035	-0,648	0,001	0,378	-0,682	
	8	-0,248	-14	-2,470	0,007	-0,245	0,044	-0,004	2,021	0,000	
	9	0,347	-9,208	0,639	-0,005	-0,866	-0,015	0,002	66	0,514	
	10	-5,6	0,746	4,377	-0,160	0,010	0,073	0,001	-0,062	0,258	
	B	1	0,151	-0,004	-7,508	-0,004	-0,001	0,027	-0,001	0,002	-0,232
		2	0,620	-0,010	0,603	-0,004	0,001	-0,006	0,017	0,000	0,000
3		0,069	-0,101	1,542	-0,006	0,001	0,005	0,015	0,013	0,000	
4		0,014	-3,687	27	-0,001	-0,008	-0,767	0,009	0,795	1,177	
5		0,004	-4,109	49	-0,002	0,057	-3,578	0,010	3,039	-5,972	
6		0,276	0,001	0,099	-0,011	0,000	-0,007	0,028	-0,013	0,054	
C	1	-2,4	-0,074	-0,280	-0,199	-0,001	0,006	0,165	0,007	-0,018	
	2	0,010	-0,039	-1,190	-0,001	-0,006	-0,003	0,001	0,049	0,062	
	3	-0,374	-0,081	-0,765	-0,024	0,004	-0,002	0,022	0,013	0,022	
	4	-0,246	0,543	-0,244	-0,004	-0,005	-0,017	-0,024	-0,025	0,021	
	5	2,8	-0,217	-0,577	0,016	0,002	-0,005	-0,039	0,051	0,096	
	6	-1,1	0,682	-0,179	-0,015	0,022	0,011	0,052	0,493	-0,219	
	7	-2,4	-2,841	-2,909	-0,027	0,005	0,052	0,005	0,064	0,093	
	8	1,7	0,340	-0,084	0,068	0,004	0,003	-0,018	0,065	-0,052	
D	1	0,089	-0,332	0,815	0,018	-0,006	0,014	-0,048	0,045	0,000	
	2	2,6	-0,275	0,663	0,278	-0,028	0,001	1,864	0,106	0,021	
	3	1,8	0,161	-2,487	0,199	-0,022	0,079	0,010	-0,003	-0,007	
	4	0,481	-1,257	0,253	-0,029	-0,017	0,026	0,444	0,000	0,000	

Tabela Z.29 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{RH}

Okres	T_1			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,045	16	73
	2	446	0,070	69
	3	0,060	0,074	0,000
	4	0,053	386	0,000
	5	0,047	20	3,991
	6	0,080	554	20
	7	0,078	12	116
	8	0,123	62	0,000
	9	0,066	48	0,059
	10	24	0,089	2,082
B	1	0,034	0,074	3,836

	2	0,054	0,095	0,000
	3	0,051	0,041	0,000
	4	0,069	9,7	26
	5	0,065	14	118
	6	0,063	0,089	0,051
	C	1	17	0,076
2		0,081	0,042	0,049
3		0,040	0,052	0,055
4		0,027	0,113	0,057
5		3,968	0,046	0,063
6		0,037	20	0,103
7		0,045	0,022	0,036
8		0,322	0,050	0,100
D	1	0,037	0,043	0,000
	2	364	0,035	0,056
	3	0,028	1,092	0,018
	4	7,245	0,027	0,000

Tabela Z.30 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{RH}

Okres	k_2									
	$G_{RH/Upow}$			$G_{RH/Uosu}$			$G_{RH/Uaw}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	180	0,116	0,076	0,754	-0,003	-0,004	9,266	0,005	-0,001
	2	-0,025	5,222	0,215	-0,003	-2,400	-0,007	0,003	9,607	0,009
	3	-102	-12	4,575	1,085	0,088	-0,116	27	1,416	0,000
	4	-81	0,020	0,130	-3,573	-0,001	-0,005	-0,560	0,039	0,000
	5	-1,650	-0,004	0,065	-1,274	0,000	-0,001	1,550	0,000	-0,002
	6	83	-0,082	0,078	-1,324	0,001	-0,001	1,838	0,000	0,001
	7	131	-0,056	-0,033	-3,376	-0,003	-0,001	3,194	-0,001	0,006
	8	41	0,001	219	-1,159	-0,001	-3,924	0,603	-0,006	0,000
	9	137	-0,052	487	-1,926	-0,004	-11	0,724	-0,021	391
	10	-0,052	-81	-0,062	-0,002	-1,088	-0,004	-0,001	6,731	-0,002
B	1	35	-0,888	-0,241	-0,818	-0,127	-0,004	-0,312	0,476	0,009
	2	337	58	157	-2,109	-8,301	-1,597	9,326	0,000	0,000
	3	40	-19	-238	-3,516	0,172	-0,776	8,927	2,526	0,000
	4	147	0,087	-0,010	-15	0,000	0,001	93	-0,003	0,014
	5	3,134	0,087	0,016	-1,833	-0,001	0,001	8,987	-0,011	0,017
	6	493	-4,291	1,861	-19	0,375	-0,134	51	69	1,062
C	1	0,046	-60	287	-0,003	-0,475	-5,751	0,002	5,588	19
	2	14	-5,440	-66796	-1,230	-0,891	-186	0,823	6,880	3651

	3	-0,671	-73	-24	-0,048	3,789	-0,063	0,063	12	0,677	
	4	-2,595	-281	-151	-0,048	2,652	-10	-0,271	13	13	
	5	0,042	-40	-28	-0,001	0,387	-0,253	0,002	9,545	4,568	
	6	-242	-0,182	0,162	-3,393	-0,001	-0,100	11	0,010	2,040	
	7	-14	-165	-68	-0,158	0,276	1,188	0,020	3,747	2,130	
	8	-0,109	22	258	-0,009	0,278	-8,985	0,003	4,265	161	
	D	1	0,069	-463	26	0,006	-8,072	0,420	0,014	63	0,000
		2	-0,016	-12	13	0,000	-1,212	0,025	0,001	4,522	0,398
3		-0,161	-0,023	-0,123	-0,027	0,002	0,003	-0,002	0,000	-0,001	
4		0,057	-21	-2,014	-0,003	-0,283	-0,209	0,001	0,000	0,000	

Tabela Z.31 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{RH}

Okres	k_3									
	G_{RH}/T_{pow}			G_{RH}/U_{osu}			G_{RH}/U_{naw}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-24	2,58	1,24	0,27	-0,06	-0,08	-0,62	0,12	-0,02
	2	-0,35	-2,07	3,15	-0,04	0,09	-0,10	0,05	8,31	0,15
	3	-67	-3,72	4,34	0,00	0,07	-0,01	1,23	1,18	0,00
	4	-0,28	0,36	3,11	0,06	-0,03	-0,13	0,00	0,71	0,00
	5	-1,15	-0,23	1,24	0,95	0,02	-0,03	-0,06	0,00	-0,02
	6	2,63	-1,17	1,46	-2,07	0,01	-0,02	0,39	0,00	0,01
	7	11	-0,91	-1,12	0,76	-0,06	-0,03	0,48	-0,01	0,16
	8	76	-0,10	-52	0,06	-0,04	-0,36	-0,27	-0,13	0,00
	9	-11	-1,18	-225	-0,12	-0,09	-0,48	0,14	-0,08	-948
	10	-0,75	-1,63	-0,51	-0,02	-0,18	-0,07	-0,01	0,37	0,00
B	1	4,27	1,36	-4,36	0,17	0,04	-0,06	-0,30	0,37	0,15
	2	-3,80	-1,87	-16	-0,03	-0,08	-0,21	1,43	0,00	0,00
	3	-5,36	4,42	-22	-0,14	-0,23	-0,61	0,14	-0,13	0,00
	4	-26	3,25	1,27	-0,86	-0,01	-0,01	3,63	0,06	0,74
	5	-5,90	3,24	1,54	-0,21	-0,02	-0,01	0,29	0,07	0,75
	6	26	193	-5,56	0,09	-5,72	0,04	16	-16	0,16
C	1	0,82	1,18	-96	-0,06	-0,45	-0,28	0,04	-0,59	7,27
	2	1,69	4,67	13571	-0,08	-0,03	-45	0,10	5,51	15017
	3	1,21	18	-12	0,02	-1,01	-0,09	0,24	1,00	-0,59
	4	3,99	-14	18	-0,14	0,55	0,46	-0,06	4,66	3,22
	5	0,84	-3,03	-18	-0,01	-0,35	0,00	0,04	8,93	-1,02
	6	-42	-2,48	-28	-1,98	-0,01	0,00	-0,64	0,13	0,38
	7	-8,17	11	-37	-0,07	-0,11	-0,15	-0,16	1,78	-0,61
	8	0,11	-4,07	-29	-0,10	0,23	-0,70	0,05	5,07	-19
D	1	0,45	-60	1,85	-0,01	-3,91	-0,11	0,47	37	0,00

	2	-0,30	-7,91	1,66	0,01	-0,73	0,03	0,02	1,34	0,09
	3	-0,06	-0,46	0,51	-0,09	0,04	-0,03	-0,01	0,00	0,00
	4	1,18	-5,07	-0,54	-0,05	-0,22	-0,05	0,02	0,00	0,00

Tabela Z.32 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{RH}

Okres	T			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	13,9	0,11	0,10
	2	0,14	2,61	0,10
	3	21,6	1,97	0,57
	4	6,62	0,13	0,08
	5	5,68	0,08	0,08
	6	2,36	0,10	0,08
	7	6,08	0,17	0,09
	8	3,29	0,15	2,15
	9	4,07	0,11	6,72
	10	0,08	1,89	0,14
B	1	6,36	2,09	0,11
	2	6,42	11,8	5,07
	3	7,13	5,01	4,19
	4	18,7	0,22	0,18
	5	6,14	0,24	0,18
	6	9,84	7,96	1,32
C	1	0,08	3,72	4,16
	2	2,86	4,18	72,8
	3	1,15	8,73	1,49
	4	1,71	5,35	6,39
	5	0,10	4,50	1,50
	6	6,44	0,08	0,74
	7	1,18	4,28	2,04
	8	0,14	2,42	9,64
D	1	0,50	13,39	1,02
	2	0,06	3,42	1,32
	3	0,14	0,03	0,26
	4	0,04	2,06	0,53

Tabela Z.33 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{RH}

Okres	ζ			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	5,09	0,55	0,61

	2	0,97	3,71	0,81
	3	17,9	4,89	1,99
	4	4,01	0,61	0,48
	5	3,05	0,24	0,48
	6	12,2	0,86	0,63
	7	4,26	0,83	0,43
	8	2,61	0,58	6,25
	9	4,60	0,57	0,74
	10	0,86	9,15	0,61
	B	1	1,62	0,82
2		7,06	2,50	2,04
3		4,18	1,98	5,44
4		18,6	0,38	0,33
5		6,46	0,41	0,33
6		22,4	10,36	1,65
C	1	0,66	5,80	7,40
	2	10,2	0,73	55,9
	3	6,21	8,64	1,37
	4	3,98	8,40	2,00
	5	0,70	5,87	1,21
	6	18,4	0,88	2,87
	7	5,29	7,14	4,43
	8	0,54	2,05	3,07
D	1	2,70	23,6	2,74
	2	0,71	13,4	4,11
	3	1,49	0,89	1,41
	4	0,70	4,07	1,03

Tabela Z.34 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{CO_2}

Okres	a_1			a_2			a_3			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-1,75	-1,61	-1,75	-1,75	-1,61	-1,75	-1,75	-1,61	-1,75
	2	-1,77	-1,64	-1,88	-1,77	-1,64	-1,88	-1,77	-1,64	-1,88
	3	-1,80	-0,92	-1,65	-1,80	-0,92	-1,65	-1,80	-0,92	-1,65
	4	-1,79	-1,70	-1,70	-1,79	-1,70	-1,70	-1,79	-1,70	-1,70
	5	-0,82	-0,91	-1,79	-0,82	-0,91	-1,79	-0,82	-0,91	-1,79
	6	-0,92	-1,75	-1,87	-0,92	-1,75	-1,87	-0,92	-1,75	-1,87
	7	-1,74	-1,36	-1,92	-1,74	-1,36	-1,92	-1,74	-1,36	-1,92
	8	-0,90	-0,87	-1,53	-0,90	-0,87	-1,53	-0,90	-0,87	-1,53
	9	-1,62	-1,58	-1,96	-1,62	-1,58	-1,96	-1,62	-1,58	-1,96

	10	-0,92	-0,88	-1,86	-0,92	-0,88	-1,86	-0,92	-0,88	-1,86
B	1	-1,78	-1,81	-1,87	-1,78	-1,81	-1,87	-1,78	-1,81	-1,87
	2	-1,79	-1,85	-1,81	-1,79	-1,85	-1,81	-1,79	-1,85	-1,81
	3	-1,65	-1,90	-1,91	-1,65	-1,90	-1,91	-1,65	-1,90	-1,91
	4	-1,66	-1,81	-1,74	-1,66	-1,81	-1,74	-1,66	-1,81	-1,74
	5	-1,86	-1,87	-1,84	-1,86	-1,87	-1,84	-1,86	-1,87	-1,84
	6	-1,75	-1,83	-1,82	-1,75	-1,83	-1,82	-1,75	-1,83	-1,82
C	1	-1,63	-1,68	-1,86	-1,63	-1,68	-1,86	-1,63	-1,68	-1,86
	2	-1,61	-1,83	-1,85	-1,61	-1,83	-1,85	-1,61	-1,83	-1,85
	3	-1,71	-0,97	-1,65	-1,71	-0,97	-1,65	-1,71	-0,97	-1,65
	4	-0,96	-1,83	-1,83	-0,96	-1,83	-1,83	-0,96	-1,83	-1,83
	5	-1,79	-1,73	-1,80	-1,79	-1,73	-1,80	-1,79	-1,73	-1,80
	6	-1,68	-1,68	-1,77	-1,68	-1,68	-1,77	-1,68	-1,68	-1,77
	7	-1,63	-1,73	-1,69	-1,63	-1,73	-1,69	-1,63	-1,73	-1,69
D	1	-1,70	-1,65	-0,83	-1,70	-1,65	-0,83	-1,70	-1,65	-0,83
	2	-1,96	-0,92	-1,71	-1,96	-0,92	-1,71	-1,96	-0,92	-1,71
	3	-1,98	-1,71	-1,60	-1,98	-1,71	-1,60	-1,98	-1,71	-1,60
	4	-0,82	-1,77	-1,86	-0,82	-1,77	-1,86	-0,82	-1,77	-1,86

Tabela Z.35 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{CO_2/U_{km}}$ w modelu M_{CO_2}

Okres	b_{11}			b_{12}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-1,75	-1,61	-1,75	-1,75	-1,61	-1,75
	2	-1,77	-1,64	-1,88	-1,77	-1,64	-1,88
	3	-1,80	-0,92	-1,65	-1,80	-0,92	-1,65
	4	-1,79	-1,70	-1,70	-1,79	-1,70	-1,70
	5	-0,82	-0,91	-1,79	-0,82	-0,91	-1,79
	6	-0,92	-1,75	-1,87	-0,92	-1,75	-1,87
	7	-1,74	-1,36	-1,92	-1,74	-1,36	-1,92
	8	-0,90	-0,87	-1,53	-0,90	-0,87	-1,53
	9	-1,62	-1,58	-1,96	-1,62	-1,58	-1,96
	10	-0,92	-0,88	-1,86	-0,92	-0,88	-1,86
B	1	-1,78	-1,81	-1,87	-1,78	-1,81	-1,87
	2	-1,79	-1,85	-1,81	-1,79	-1,85	-1,81
	3	-1,65	-1,90	-1,91	-1,65	-1,90	-1,91
	4	-1,66	-1,81	-1,74	-1,66	-1,81	-1,74
	5	-1,86	-1,87	-1,84	-1,86	-1,87	-1,84
	6	-1,75	-1,83	-1,82	-1,75	-1,83	-1,82
C	1	-1,63	-1,68	-1,86	-1,63	-1,68	-1,86
	2	-1,61	-1,83	-1,85	-1,61	-1,83	-1,85
	3	-1,71	-0,97	-1,65	-1,71	-0,97	-1,65

	4	-0,96	-1,83	-1,83	-0,96	-1,83	-1,83
	5	-1,79	-1,73	-1,80	-1,79	-1,73	-1,80
	6	-1,68	-1,68	-1,77	-1,68	-1,68	-1,77
	7	-1,63	-1,73	-1,69	-1,63	-1,73	-1,69
D	1	-1,70	-1,65	-0,83	-1,70	-1,65	-0,83
	2	-1,96	-0,92	-1,71	-1,96	-0,92	-1,71
	3	-1,98	-1,71	-1,60	-1,98	-1,71	-1,60
	4	-0,82	-1,77	-1,86	-0,82	-1,77	-1,86

Tabela Z.36 Współczynniki licznika transmitancji dyskretnej $G_{CO_2/T_{pod}}$ w modelu M_{CO_2}

Okres	b_{21}			b_{22}			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	7	56	205	-5	-44	-216
	2	112	116	30	-111	-108	-36
	3	-16	143	231	17	-113	-233
	4	-11	156	98	11	-151	-105
	5	-35	-13	82	104	84	-83
	6	42	70	60	-21	-70	-59
	7	-20	-49	45	21	139	-45
	8	-20	76	17	33	-44	-14
	9	151	53	-12	-148	-31	11
	10	35	310	-39	-46	-284	42
B	1	57	103	21	-56	-102	-22
	2	-21	40	85	22	-39	-86
	3	62	33	10	-60	-32	-10
	4	94	44	55	-94	-40	-57
	5	15	80	137	-14	-79	-134
	6	62	44	35	-62	-40	-35
C	1	86	47	14	-85	-44	-15
	2	113	109	41	-109	-109	-42
	3	57	19	45	-58	-8	-46
	4	14	78	46	-5	-78	-47
	5	3	53	55	-3	-45	-56
	6	108	75	93	-109	-40	-98
	7	62	115	29	-62	-112	-32
D	1	132	68	1152	-132	-68	-1147
	2	67	406	-155	-67	-383	153
	3	110	231	51	-108	-226	-54
	4	197	104	32	-136	-103	-32

Tabela Z.37 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{CO_2}

Okres		K_0					
		$G_{CO_2/Ukm}$			$G_{CO_2/Tpod}$		
		Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III
A	1	3,47	-0,17	2,60	-4	-24	-128
	2	4,53	1,90	1,82	-57	-56	-17
	3	1,53	-4,33	2,77	10	-102	-124
	4	2,67	3,25	1,81	6	-73	-66
	5	-1,96	-6,42	1,67	72	45	-49
	6	3,57	5,45	2,21	-32	-34	-32
	7	3,06	-3,00	1,51	12	58	-23
	8	6,15	8,27	2,05	31	-69	-9
	9	7,14	0,67	0,73	-101	-21	6
	10	6,59	-30,6	0,59	-41	-336	20
B	1	3,37	1,40	0,69	-31	-51	-12
	2	2,03	-0,59	1,23	13	-20	-51
	3	4,56	0,49	0,38	-42	-17	-6
	4	5,10	0,97	3,70	-65	-22	-35
	5	1,00	1,00	1,34	-8	-40	-72
	6	3,69	-0,13	1,69	-38	-21	-21
C	1	5,47	3,67	0,78	-58	-28	-8
	2	3,65	1,98	1,44	-76	-57	-23
	3	3,17	14,3	1,90	-34	-15	-30
	4	3,38	0,87	1,02	-10	-41	-26
	5	2,88	1,03	1,69	-2	-27	-32
	6	2,58	2,27	1,75	-69	-31	-55
	7	3,60	3,51	2,13	-40	-63	-19
D	1	2,51	2,45	0,15	-79	-41	-1338
	2	4,68	-0,16	2,53	-32	-429	85
	3	4,69	2,17	2,61	-52	-125	-34
	4	-0,92	2,49	1,08	-199	-56	-17

Tabela Z.38 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres		k_1					
		$G_{CO_2/Ukm}$			$G_{CO_2/Tpod}$		
		Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III
A	1	-1,48	-47,1	-1,08	1,38	352	54,9
	2	-40,4	-18,8	0,06	-99,5	82,4	-0,66
	3	-0,50	-18,4	-86,8	-3,35	107	-740
	4	-1,06	-13,0	-1,00	-2,53	-38,7	36,9
	5	-100	-16,6	-0,72	1162	505,13	21,8

	6	-17,8	-33,3	-0,30	204	-69,5	4,34
	7	-0,47	-1,42	0,20	-1,97	26,1	-3,10
	8	-5,33	-8,32	-36,4	-38,3	56,8	449
	9	-3,94	-4,92	0,33	57,1	128	2,48
	10	-79,9	27,4	1,03	-375	305	42,7
B	1	1,72	-25,4	0,08	-15,9	-172	-1,34
	2	-0,54	-3,63	-0,53	-3,57	-122	22,2
	3	-2,82	0,20	-0,08	26,2	-7,20	1,11
	4	-3,28	2,01	-1,90	42,4	-46,8	18,5
	5	-0,21	1,34	0,46	1,75	-56,6	-25,9
	6	-1,64	-0,16	-0,72	16,8	-20,0	8,75
C	1	-3,22	-1,39	0,46	34,6	10,6	-4,83
	2	-2,07	1,13	-0,37	44,4	-33,2	6,05
	3	-0,54	-13,8	-0,99	5,95	11,1	15,7
	4	-2,73	0,41	-0,11	5,17	-19,6	2,90
	5	-1,30	1,33	-0,49	0,84	-36,4	9,56
	6	-1,14	2,50	-0,39	31,6	-21,1	12,6
	7	-1,23	2,62	-0,57	13,9	-47,6	5,27
D	1	-0,54	-0,01	1,49	18,3	0,20	1497
	2	5,88	0,92	3,04	-41,1	409	115
	3	3,84	4,25	-0,57	-44,2	-283	8,31
	4	2,22	1,72	0,04	184	-39,2	-0,64

Tabela Z.39 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres	T_1			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,064	4,62	0,065
	2	9,15	3,38	0,085
	3	0,069	1,37	13,4
	4	0,065	4,20	0,057
	5	3,11	0,784	0,063
	6	1,69	43,8	0,078
	7	0,077	0,095	0,088
	8	0,044	0,041	15,6
	9	0,057	0,831	0,099
	10	5,34	0,042	0,128
B	1	0,099	7,97	0,088
	2	0,072	0,160	0,063
	3	0,052	0,098	0,075
	4	0,051	0,130	0,059
	5	0,074	0,120	0,096

	6	0,063	0,112	0,064
C	1	0,055	0,067	0,102
	2	0,056	0,101	0,072
	3	0,077	0,044	0,060
	4	0,073	0,099	0,079
	5	0,062	0,119	0,071
	6	0,063	0,116	0,074
	7	0,069	0,104	0,073
D	1	0,074	0,083	0,053
	2	0,120	0,051	0,114
	3	0,111	0,126	0,074
	4	0,045	0,103	0,085

Tabela Z.40 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres		k_2					
		$G_{CO_2/Ukm}$			$G_{CO_2/Topod}$		
		Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III
A	1	-210	0,26	-147	199	0,57	7459
	2	-1,34	-0,15	-258	19,5	8,39	2693
	3	-131	0,59	-0,45	-868	8,35	30,80
	4	-562	-0,39	-790	-1345	11,2	29172
	5	0,63	1,26	-1501	-13,1	-15,8	45136
	6	-0,45	-0,98	-1239	3,69	6,20	18149
	7	-133	3,37	-1052	-556	-61,9	16414
	8	-23,3	-4,93	-0,31	-108	39,7	0,84
	9	-126	0,08	-292	1817	-1,64	-2204
	10	-0,76	17,1	-33,9	6,87	188	-1373
B	1	-238	-0,40	-159	2190	21,17	2803
	2	-102	83,0	-215	-666	2778	8939
	3	-145	-58,8	-298	1344	2092	4306
	4	-269	-38,7	-1853	3466	896	17991
	5	-187	-73,8	-57,9	1533	3094	3251
	6	-1600	2,68	-2161	16434	334	26299
C	1	-160	-91,3	-56,3	1716	699	592
	2	-75	-367	-287	1604	10725	4648
	3	-110	-23,34	-491	1211	23,47	7762
	4	-13,0	-190	-218	36,08	9075	5557
	5	-270	-10,34	-247	176	281	4794
	6	-116	-6,57	-117	3214	59,7	3756
	7	-105	-57,13	-96,9	1182	1037	884
D	1	-106	-23,84	-0,63	3554	437	1348

	2	-773	0,29	-38,8	5401	557	-1440
	3	-179	-34,33	-26,4	2059	2237	378
	4	0,60	-109	-246	150	2477	3979

Tabela Z.41 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres	k_3						
	$G_{CO_2/Ukm}$			$G_{CO_2/Tpod}$			
	Etap I	Etap II	Etap III	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	-50	2	-27	338	77	-2153
	2	-25	-7	-14	339	225	-2601
	3	-23	10	-11	266	202	556
	4	-26	-13	38	124	310	-10909
	5	7	17	-305	-172	-183	-2756
	6	-6	-25	-43	46	153	874
	7	-59	-8	-149	198	128	185
	8	-106	7	-7	388	130	26
	9	-60	-2	-30	229	73	-1100
	10	-10	15	-28	88	116	383
B	1	-47	-8	-61	333	356	-530
	2	-42	10	-30	259	218	-162
	3	-59	-36	-46	385	226	620
	4	-48	-26	-269	126	348	-2351
	5	-42	-34	-36	395	240	474
	6	-95	-3	-105	113	220	771
C	1	-36	-21	-17	100	290	-221
	2	-49	-19	-21	326	62	-589
	3	-34	-1	22	-120	120	-1285
	4	-26	-22	-3	209	25	-307
	5	-41	-15	-32	121	285	-604
	6	-55	-8	10	-250	327	-885
	7	-36	-19	-23	32	233	-319
D	1	-93	-29	-32	179	35	-123
	2	-119	-20	-36	117	203	-267
	3	-89	-34	-38	273	583	-70
	4	-21	-17	-29	331	186	-310

Tabela Z.42 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres	T			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	2,53	0,13	2,42
	2	0,18	0,15	3,30

	3	2,90	0,09	0,15	
	4	4,65	0,15	7,11	
	5	0,07	0,09	9,89	
	6	0,08	0,16	6,93	
	7	1,90	0,22	7,23	
	8	0,78	0,30	0,13	
	9	1,43	0,15	5,12	
	10	0,08	0,29	1,58	
	B	1	2,03	0,20	4,18
		2	2,17	1,71	4,35
3		2,04	2,83	8,49	
4		2,66	1,25	7,60	
5		4,15	1,87	1,70	
6		6,78	0,91	11,74	
C	1	1,88	1,55	2,08	
	2	1,57	3,27	4,31	
	3	1,69	0,49	5,27	
	4	0,59	3,64	4,19	
	5	3,21	0,70	3,70	
	6	2,17	0,38	2,39	
	7	1,63	0,92	1,99	
D	1	1,94	0,86	0,38	
	2	2,86	0,41	0,85	
	3	1,51	0,78	0,94	
	4	0,34	1,54	4,17	

Tabela Z.43 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}

Okres	ζ			
	Etap I	Etap II	Etap III	
A	1	0,94	0,38	0,91
	2	0,91	0,55	1,31
	3	0,90	0,54	0,77
	4	1,22	0,50	2,56
	5	0,79	0,82	2,02
	6	0,98	0,58	1,98
	7	1,39	0,21	2,50
	8	2,95	0,79	0,67
	9	0,89	0,44	2,13
	10	0,91	0,73	1,99
B	1	2,19	0,98	2,02

	2	0,93	3,09	0,70
	3	0,72	1,71	0,92
	4	0,81	1,83	2,00
	5	1,06	2,02	1,28
	6	2,34	0,91	1,59
	C	1	0,98	1,05
2		0,94	2,97	1,07
3		1,36	1,43	3,34
4		3,12	3,11	1,98
5		0,65	1,06	1,39
6		1,31	0,48	1,36
7		1,52	1,22	1,62
D	1	1,55	0,99	1,76
	2	2,10	1,48	1,36
	3	0,72	1,43	1,09
	4	1,23	1,79	2,00

6. Bibliografia

- [1] Advanced Mushroom Research, *Katalog AMR Smart Harvest*.
- [2] Afram, A., Janabi-Sharifi, F., *Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)* [w:] „Building and Environment” t. 72 nr 2, 2014.
- [3] Aldrich, R. A., Bartok, J. W., *Greenhouse engineering*, Ithaca, Natural Resources, Agriculture, and Engineering Service, 1994.
- [4] Awtoniuk, M., *Dostrajanie regulatora z pominięciem eksperymentu identyfikacji obiektu przy użyciu Imperialist Competitive Algorithm* [w:] „Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania” t. 53 nr 12, 2012.
- [5] Biswas, S., Datta, M., Ngachan, S. V., *Mushrooms: A Manual for Cultivation*, New Delhi, PHI Learning Private Limited, 2012.
- [6] Bonaventura Cunha, J., Couto, C., Ruano, A. E., *Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control* [w:] „Control Engineering Practice” t. 5 nr 10, 1997.
- [7] Boyd, S., Vandenberghe, L., *Convex Optimization*, Cambridge, Cambridge University Press, 2009.
- [8] Brzózka, J., *Regulatory i układy automatyki*, Warszawa, MIKOM, 2004.
- [9] Chang, S.-T., Miles, P. G., *Mushrooms Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, and Environmental Impact*, Boca Raton, CRC Press, 2004.
- [10] Cooman, A., Schrevens, E., *A Monte Carlo Approach for estimating the Uncertainty of Predictions with the Tomato Plant Growth Model, Tomgro* [w:] „Biosystems Engineering” t. 94 nr 4, 2006.
- [11] Cooman, A., Schrevens, E., *Sensitivity of the Tomgro Model to Solar Radiation Intensity, Air Temperature and Carbon Dioxide Concentration* [w:] „Biosystems Engineering” t. 96 nr 2, 2007.
- [12] Daskalov, P. I., *Prediction of Temperature and Humidity in a Naturally Ventilated Pig Building* [w:] „Journal of Agricultural Engineering Research” t. 68 nr 4, 1997.
- [13] De Brabanter, K., Dressen, P., Karsmakers, P., i in., *Fixed-Size LS-SVM applied to the Wiener-Hammerstein benchmark* [w:] 15th IFAC Symposium on System Identification, Saint-Malo, 2009.
- [14] Denisenko, V. V., *Modifications of PID Regulators* [w:] „Automation and Remote Control” t. 71 nr 7, 2010.
- [15] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, *Norma dla pieczarek hodowlanych (Agaricus)*, 2004.
- [16] Finney, K. N., Ryu, C., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., *The reuse of spent mushroom compost and coal tailings for energy recovery: comparison of thermal treatment technologies*. [w:] „Bioresource technology” t. 100 nr 1, 2009.

-
- [17] Finney, K. N., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., *Combustion of spent mushroom compost and coal tailing pellets in a fluidised-bed* [w:] „Renewable Energy” t. 34 nr 3, 2009.
- [18] Gaohong, Y., Jianmin, L., Zhao, Y., *Region marking technique based on sequential scan and segmentation method of mushroom images* [w:] „Transactions of the CSAE” t. 22 nr 4, 2006.
- [19] Gapiński, M., Gnus, R., *Wpływ sposobu zbioru pieczarek (Agaricus bisporus (Lange) Sing.) z uprawy na podłożu fazy czwartej na plonowanie. Część I. Wielkość plonu* [w:] „Nauka Przyroda Technologie” t. 6 nr 4, 2012.
- [20] Gapiński, M., Gnus, R., *Wpływ sposobu zbioru pieczarek (Agaricus bisporus (Lange) Sing.) z uprawy na podłożu fazy czwartej na plonowanie. Część II. Jakość plonu* [w:] „Nauka Przyroda Technologie” t. 6 nr 4, 2012.
- [21] Gapiński, M., Woźniak, W., *Pieczarka. Technologia uprawy i przetwarzania*, Poznań, PWRiL, 1999.
- [22] Gaze, R., *The large world of global mushrooms* [w:] „The Mushroom Journal” nr 670, 2005.
- [23] Gielen, J., *The influence of air circulation on growth* [w:] *Pieczarkalia 2015*, Siedlce 2015.
- [24] Gielen, J., *The influence of climate on mushroom quality and energy conservation* [w:] *Pieczarkalia 2015*, Siedlce 2015.
- [25] Grzywnowicz, K., *Biologia grzybów* [w:] Kalbarczyk, J. (red.), „Mykologia Przemysłowa”, Lublin, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2012.
- [26] Gutenbaum, J., *Modelowanie matematyczne systemów*, Warszawa, Exit, 2003.
- [27] Han, J.-H., Kwon, H.-J., Yoon, J.-Y., i in., *Analysis of the thermal environment in a mushroom house using sensible heat balance and 3-D computational fluid dynamics* [w:] „Biosystems Engineering” t. 104 nr 3, 2009.
- [28] Huyck, B., De Brabanter, K., Logist, F., i in., *Identification of a Pilot Scale Distillation Column: A Kernel Based Approach* [w:] 18th World Congress of the IFAC, Milano, 2011.
- [29] Janiszowski, K., *Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach*, Warszawa, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2015.
- [30] Jaros, M., Pabis, S., *Inżynieria systemów*, Warszawa, Wydawnictwo SGGW, 2007.
- [31] Jarvis, R., *Sensor-based robotic automation of mushroom farming – Preliminary considerations* [w:] Sattar, A. (red.), „Advanced Topics in Artificial Intelligence”, Perth, Springer Berlin Heidelberg, 1997.

- [32] Kabza, Z., Kostyrko, K., Zator, S., i in., *Regulacja mikroklimatu pomieszczenia*, Warszawa, Agenda Wydawnicza Pomiary Automatyka Kontrola, 2005.
- [33] Kaczorek, T., Dzieliński, A., Dąbrowski, W., Łopatka, R., *Podstawy teorii sterowania*, Warszawa, WNT, 2014.
- [34] Kalbarczyk, J., *Uprawa grzybów saprofitycznych* [w:] Kalbarczyk, J. (red.), „Mykologia Przemysłowa”, Lublin, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2012.
- [35] Kalbarczyk, J., *Zasady i warunki produkcji grzybów* [w:] Kalbarczyk, J. (red.), „Mykologia Przemysłowa”, Lublin, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2012.
- [36] Koc, G., Rak, J., Gąsiorowska, B., i in., *Hydrożele w uprawie pieczarki dwuzarodnikowej* [w:] „Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich” nr 6, 2011.
- [37] Konieczny, W., *Dużo zbieraczek - to niższy plon* [w:] „Pieczarki – Biuletyn Producenta Pieczarek” t. 41 nr 1, 2013.
- [38] Koronacki, J., Mielniczuk, J., *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Warszawa, WNT, 2001.
- [39] Kowalski, P., *Wpływ rosyjskiego embarga na handel zagraniczny i krajowy rynek owocowo-warzywny* [w:] *Pieczarkalia 2015*, Siedlce, 2015.
- [40] Kurpaska, S., *Szklarnie i tunele foliowe. Inżynieria i procesy*, Poznań, PWRiL, 2007.
- [41] Li, Y., Ang, K. H., Chong, G. C. Y., *Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art* [w:] „IEEE Control System Magazine” t. 26 nr 1, 2006.
- [42] Lind, I., Ljung, L., *Regressor and structure selection in NARX models using a structured ANOVA approach* [w:] „Automatica” t. 44 nr 2, 2008.
- [43] Little, J., *The Impact of Model-Based Design on Controls Today and in the Future* [w:] 19th World Congress of the IFAC, Cape Town, 2014.
- [44] Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1999.
- [45] Lysenko, V., Dudnyk, A., *Automation of biotechnological objects* [w:] 13th International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, Lviv, 2016.
- [46] McCarty, T., *Mushrooms: Industry and Trade Summary*, United States International Trade Commission, Washington, 2010.
- [47] Michałkiewicz, M., *Pomiar CO₂ - centralny czy indywidualny* [w:] „Pieczarki - Biuletyn Producenta Pieczarek” t. 43 nr 3, 2015.
- [48] Mustafaraj, G., Chen, J., Lowry, G., *Development of room temperature and relative humidity linear parametric models for an open office using BMS data* [w:] „Energy and Buildings” t. 42 nr 3, 2010.

-
- [49] Nosecka, B., *Rynek owoców i warzyw*, Instytut Ekonomiki Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej, Warszawa, 2015.
- [50] O'Dwyer, A., *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, London, Imperial College Press, 2009.
- [51] Pabis, S., *Metodologia nauk empirycznych: 15 wykładów*, Koszalin, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2009.
- [52] Panesar, P. S., Marwaha, S. S., *Biotechnology in Agriculture and Food Processing Opportunities and Challenges*, Boca Raton, CRC Press, 2014.
- [53] Patil, S. L., Tantau, H. J., Salokhe, V. M., *Modelling of tropical greenhouse temperature by auto regressive and neural network models* [w:] „Biosystems Engineering” t. 99 nr 3, 2008.
- [54] Peeters, J., *New developments in the production of Agaricus* [w:] *Pieczarkalia 2014*, Siedlce, 2014.
- [55] Pełech, A., *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy*, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [56] Piotrowska, E., Chochowski, A., *Application of parametric identification methods for the analysis of the heat exchanger dynamics* [w:] „International Journal of Heat and Mass Transfer” t. 55 nr 23-24, 2012.
- [57] Piroddi, L., Seghezza, V., Bonin, M., *NARX model selection based on simulation error minimisation and LASSO* [w:] „IET Control Theory & Applications” t. 4 nr 7, 2010.
- [58] Płaska, S., *Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi*, Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2000.
- [59] PN-EN 12792:2006, *Wentylacja budynków - Symbole, terminologia i oznaczenia na rysunkach*.
- [60] PROMONT PWPO-T Sp. z o.o., *Katalog agregatów pieczarkarskich AGEP*.
- [61] Raczek, A., Wachowicz, E., *Heat and mass exchange model in the air inside a greenhouse* [w:] „Agricultural Engineering” t. 1 nr 149, 2014.
- [62] Reed, J. N., Tillett, R. D., *Initial experiments in robotic mushroom harvesting* [w:] „Mechatronics” t. 4 nr 3, 1994.
- [63] Rinehart, R. R., Shinskey, F. G., Wade, H. L., *Control modes – PID variations* [w:] Liptak, B. (red.), „Process control and optimization”, Boca Raton, Taylor and Francis, 2006.
- [64] Rowley, J. H., *Developing flexible automation for mushroom harvesting (Agaricus bisporus)*, Praca doktorska, University of Warwick, Department of Engineering, 2009.
- [65] Ryu, C., Finney, K., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., *Pelletised fuel production from coal tailings and spent mushroom compost – Part I Identification of pelletisation parameters* [w:] „Fuel Processing Technology” t. 89 nr 3, 2008.

- [66] Ryu, C., Khor, A., Sharifi, V. N., Swithenbank, J., *Pelletised fuel production from coal tailings and spent mushroom compost – Part II. Economic feasibility based on cost analysis* [w:] „Fuel Processing Technology” t. 89 nr 3, 2008.
- [67] Sakson, N., *Nowe idee i technologie a rozwój polskiego pieczarkarstwa* [w:] Pieczarkalia 2014, Siedlce, 2014.
- [68] Sakson, N., *Pieczarka Uprawa Intensywna*, Poznań, PWRiL, 2013.
- [69] Sakson, N., *Produkcja pieczarki na podłożu fazy III*, Poznań, PWRiL, 2008.
- [70] Sakson, N., *Produkcja podłoża do uprawy pieczarek*, Poznań, PWRiL, 2007.
- [71] Sałat, R., Awtoniuk, M., *Black box modeling of PIDs implemented in PLCs without structural information: a support vector regression approach* [w:] „Neural Computing and Applications” t. 26 nr 3, 2015.
- [72] Sałat, R., Awtoniuk, M., *Odwzorowanie dynamiki pracy regulatora PID zaimplementowanego w sterowniku PLC za pomocą Least Squares-Support Vector Machines* [w:] „Przegląd Elektrotechniczny” t. 88 nr 5a, 2012.
- [73] Sałat, R., Awtoniuk, M., Korpysz, K., *Black-Box system identification by means of Support Vector Regression and Imperialist Competitive Algorithm* [w:] „Przegląd Elektrotechniczny” t. 89 nr 9, 2013.
- [74] Sałat, R., Winiczenko, R., Awtoniuk, M., *Dobór nastaw regulatora PID zaimplementowanego w sterowniku PLC przy wykorzystaniu algorytmów genetycznych* [w:] „Pomiary Automatyka Kontrola” t. 58 nr 5, 2012.
- [75] Siwulski, M., Sas-Golak, I., *Pieczarka Agaricus: gatunki, uprawa, właściwości prozdrowotne*, Poznań, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, 2014.
- [76] Skoczowski, S., Osypiuk, R., Pietruszewicz, K., *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*, Warszawa, PWN, 2006.
- [77] Smuts, J. F., *Process Control for Practitioners*, League City, OptiControls Inc, 2011.
- [78] Söderström, T., Stoica, P., *Identyfikacja systemów*, Warszawa, PWN, 1997.
- [79] Stączek, P., Płaska, S., *Identyfikacja właściwości dynamicznych zespołu uplastyczniającego preformy z PET w maszynach rozdmuchowych* [w:] „Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji” t. 30 nr 1, 2010.
- [80] Stączek, P., Płaska, S., *Sterowanie uplastycznianiem preform w procesie wytwarzania pojemników z PET. Cz. II. Identyfikacja właściwości dynamicznych obiektu sterowania* [w:] „Polimery” t. 58 nr 2, 2013.
- [81] Szarek, S., Koc, G., *Efektywność intensyfikacji produkcji pieczarek w warunkach produkcji towarowej w Polsce* [w:] „Roczniki Naukowe Stowarzyszenia Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu” t. 14 nr 1, 2012.
- [82] Szarek, S., Koc, G., *Uwarunkowania ekonomiczne produkcji pieczarek w Polsce* [w:] „Zagadnienia Ekonomiki Rolnej” t. 2011 nr 3, 2011.

- [83] Szudyga, K., *Uprawa pieczarki*, Warszawa, Hortpress Sp. z o.o., 2005.
- [84] Toker, H., Baysal, E., Yigitbasi, O., i in., *Cultivation of Agaricus bisporus on wheat straw and waste tea leaves based composts using poplar leaves as activator material* [w:] „African Journal of Biotechnology” t. 6 nr 3, 2010.
- [85] Uchida Frausto, H., Pieters, J. G., *Modelling greenhouse temperature using system identification by means of neural networks* [w:] „Neurocomputing” t. 56 nr 1, 2004.
- [86] Uchida Frausto, H., Pieters, J. G., Deltour, J. M., *Modelling Greenhouse Temperature by means of Auto Regressive Models* [w:] „Biosystems Engineering” t. 84 nr 2, 2003.
- [87] Vedder, P. J. C., *Nowoczesna uprawa pieczarki*, Warszawa, PWRiL, 1980.
- [88] Vetter, J., *Chemical composition of fresh and conserved Agaricus bisporus mushroom* [w:] „European Food Research and Technology” t. 217 nr 1, 2003.
- [89] Vorontsov, L., Wachowicz, E., *Modelowanie przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych pieczarkarni* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 10 nr 108, 2008.
- [90] Wachowicz, E., *Problemy modelowania procesów w przechowalni ziemniaków* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 9 nr 97, 2007.
- [91] Wachowicz, E., *System sterowania czynnikami wzrostu roślin w szklarni* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 6 nr 115, 2009.
- [92] Wachowicz, E., *Zbiory rozmyte w sterowaniu mikroklimatem w budynkach rolniczych* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 6 nr 131, 2011.
- [93] Wachowicz, E., Grudziński, P., *Sterowanie adaptacyjne wybranej klasy procesów inżynierii rolniczej* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 11 nr 109, 2008.
- [94] Wachowicz, E., Woroncow, L., *Comprehensive Model of Processes Proceeding at a Mushroom-Growing Cellar* [w:] „Technical Sciences” nr 13, 2010.
- [95] Wang, S., Deltour, J., *Studies on thermal performances of a new greenhouse cladding material* [w:] „Agronomie” t. 19 nr 6, 1999.
- [96] Williams, B. C., McMullan, J. T., McCahey, S., *An initial assessment of spent mushroom compost as a potential energy feedstock* [w:] „Bioresource Technology” t. 79 nr 3, 2001.
- [97] Woroncow, L., Wachowicz, E., *Optymalizacja sterowania mikroklimatem w pieczarkarni* [w:] „Inżynieria Rolnicza” t. 6 nr 131, 2011.
- [98] Zawada, B., *Układy sterowania w systemach wentylacji i klimatyzacji*, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [99] Zhu, S., Deltour, J., Wang, S., *Modeling the thermal characteristics of greenhouse pond systems* [w:] „Aquacultural Engineering” t. 18 nr 1998.
- [100] Лисенко, В. П., Решетюк, В. М., Цигульов, І. Т., *Основи автоматики: теорія і практика*, Кнів, Освіта України, 2012.

7. Wykaz tabel

Tabela 1.1 Wymagania związane z temperaturą powietrza w hali produkcyjnej wybranych gatunków grzybów	32
Tabela 1.2 Zawartość składników nawozowych w podłożu pieczarkarskim z okrywą.....	33
Tabela 3.1 Parametry charakterystyczne uprawy	46
Tabela 3.2 Charakterystyka pomiarowej bazy danych	48
Tabela 3.3 Rozkład wielkości plonu na trzy rzuty	89
Tabela 3.4 Stałe czasowe uzyskane w wyniku regresji liniowej	90
Tabela 3.5 Współczynniki transmitancji modelu M_{Tpod} w zależności od powierzchni uprawy S	93
Tabela 3.6 Współczynniki transmitancji modelu M_{Tpow} w zależności od kubatury V	94
Tabela 3.7 Współczynniki transmitancji modelu M_{RH} w zależności od kubatury V	94
Tabela 3.8 Współczynniki transmitancji modelu M_{CO2} w zależności od kubatury V	95
Tabela Z.1 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{Tpod}	99
Tabela Z.2 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpod/Tpow}$ w modelu M_{Tpod}	99
Tabela Z.3 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretniej $G_{Tpod/RH}$ w modelu M_{Tpod}	100
Tabela Z.4 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpod/CO2}$ w modelu M_{Tpod}	101
Tabela Z.5 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{Tpod}	102
Tabela Z.6 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpod}	103
Tabela Z.7 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpod}	103
Tabela Z.8 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{Tpod}	104
Tabela Z.9 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}	105
Tabela Z.10 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}	106

Tabela Z.11 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpod}	107
Tabela Z.12 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{Tpow}	107
Tabela Z.13 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpow/Tn}$ w modelu M_{Tpow}	108
Tabela Z.14 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpow/Tpod}$ w modelu M_{Tpow}	109
Tabela Z.15 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{Tpow/RH}$ w modelu M_{Tpow}	110
Tabela Z.16 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{Tpow}	111
Tabela Z.17 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpow} ..	111
Tabela Z.18 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{Tpow} ..	112
Tabela Z.19 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{Tpow} ..	113
Tabela Z.20 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{Tpow} ..	114
Tabela Z.21 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpow}	115
Tabela Z.22 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{Tpow}	116
Tabela Z.23 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{RH}	116
Tabela Z.24 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{RH/Tpow}$ w modelu M_{RH}	117
Tabela Z.25 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{RH/Uosu}$ w modelu M_{RH}	118
Tabela Z.26 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{RH/Uhaw}$ w modelu M_{RH}	119
Tabela Z.27 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{RH}	120
Tabela Z.28 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{RH}	120
Tabela Z.29 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{RH}	121
Tabela Z.30 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{RH}	122
Tabela Z.31 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{RH}	123
Tabela Z.32 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{RH}	124

Tabela Z.33 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{RH}	124
Tabela Z.34 Współczynniki mianownika transmitancji dyskretnych w modelu M_{CO_2}	125
Tabela Z.35 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{CO_2/U_{km}}$ w modelu M_{CO_2}	126
Tabela Z.36 Współczynniki licznika transmitancji dyskretniej $G_{CO_2/T_{pod}}$ w modelu M_{CO_2}	127
Tabela Z.37 Współczynniki członu proporcjonalnego K_0 modelu M_{CO_2}	128
Tabela Z.38 Wzmocnienie k_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{CO_2}	128
Tabela Z.39 Stała czasowa T_1 transmitancji cząstkowej $G_1(s)$ modelu M_{CO_2} ...	129
Tabela Z.40 Wzmocnienie k_2 transmitancji cząstkowej $G_2(s)$ modelu M_{CO_2}	130
Tabela Z.41 Wzmocnienie k_3 transmitancji cząstkowej $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}	131
Tabela Z.42 Wspólna stała czasowa T transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}	131
Tabela Z.43 Wspólny współczynnik tłumienia ζ transmitancji cząstkowych $G_2(s)$ i $G_3(s)$ modelu M_{CO_2}	132

8. Wykaz rysunków

Rys. 1.1 Współdziałanie pomiędzy czynnikami plonotwórczymi	10
Rys. 1.2 Procesy zachodzące w szklarni.....	11
Rys. 1.3 Bloki klimatyzacyjne przygotowujące powietrze do czterech osobnych hal uprawowych.....	13
Rys. 1.4 Schemat standardowego bloku klimatyzacyjnego	14
Rys. 1.5 Rękaw nawiewowy zawieszony pod sufitem hali uprawowej.....	15
Rys. 1.6 Koncepcja układ regulacji temperatury powietrza w hali produkcyjnej	16
Rys. 1.7 Przykładowe regulatory mikroklimatu dedykowane do pieczarkarni...	17
Rys. 1.8 Ekran systemu SCADA procesu klimatyzacji współpracujący z regulatorem firmy AEM.....	17
Rys. 1.9 Struktury układów regulacji: a – IMC, b – MFC, c – z predyktorem Smitha	19
Rys. 1.10 Koncepcja układu regulacji temperatury powietrza wewnątrz hali produkcyjnej o strukturze kaskadowej.....	20
Rys. 1.11 Wielkość eksportu i importu pieczarek w Polsce w latach 2005–2015	21
Rys. 1.12 Wartość eksportu pieczarek w porównaniu z innymi warzywami świeżymi	22
Rys. 1.13 Powierzchnia upraw oraz wielkość zbioru pieczarek w latach 2003–2015.....	23
Rys. 1.14 Hala uprawowa z czterema regałami po sześć półek.....	25
Rys. 1.15 Wpływ temperatury podłoża na rozrastanie się grzybni.....	27
Rys. 1.16 Zalecane wartości parametrów mikroklimatu na przestrzeni całego cyklu produkcyjnego	28
Rys. 1.17 Przykładowy przebieg zmierzonych wartości maksymalnej i minimalnej temperatury podłoża po założeniu uprawy	29
Rys. 1.18 Podłoże z widoczną warstwą okrywy oraz całkowicie przerośnięte ..	30
Rys. 1.19 Mikroklimat jako symboliczny przełącznik fazy wegetatywnej i generatywnej.....	31
Rys. 1.20 Wpływ stężenia dwutlenku węgla na cechy morfologiczne owocników pieczarki	35

Rys. 1.21 Próba przesunięcia terminu zbioru w czasie poprzez zmianę warunków mikroklimatycznych.....	36
Rys. 1.22 Obiekt identyfikacji jako obiekt sterowania	38
Rys. 3.1 Budynek pieczarkarni A1	46
Rys. 3.2 Zmiany parametrów mikroklimatu w czasie całego cyklu produkcyjnego z wydzielonymi etapami	49
Rys. 3.3 Przykład usunięcia wartości średniej z sygnału.....	50
Rys. 3.4 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarkarni o strukturze MIMO.....	51
Rys. 3.5 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarkarni zbudowany z modeli MISO.....	52
Rys. 3.6 Schemat blokowy mikroklimatu pieczarkarni	54
Rys. 3.7 Porównanie prostych regresji wyznaczonych przy pomocy dwóch estymatorów	58
Rys. 3.8 Wykresy funkcji Hubera, kwadratowej oraz funkcji wartości bezwzględnej.....	59
Rys. 3.9 Schemat blokowy modelu $M_{T_{pod}}$	59
Rys. 3.10 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu $M_{T_{pod}}$	61
Rys. 3.11 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli $M_{T_{pod}}$ o największej i najmniejszej wartości współczynnika fit	61
Rys. 3.12 Struktura transmitancji G zbudowanej z transmitancji składowych K_0 , G_1 , G_2 i G_3	62
Rys. 3.13 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{T_{pod}/T_{pow}}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych	62
Rys. 3.14 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{T_{pod}/T_{pow}}$ od powierzchni uprawy	63
Rys. 3.15 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{T_{pod}/RH}$ od powierzchni uprawy.....	64
Rys. 3.16 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu G_{T_{pod}/CO_2} od powierzchni uprawy	65
Rys. 3.17 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu $M_{T_{pod}}$ od powierzchni uprawy	65
Rys. 3.18 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu $M_{T_{pod}}$ od powierzchni uprawy	66

Rys. 3.19 Schemat blokowy modelu M_{Tpow}	67
Rys. 3.20 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu M_{Tpow}	68
Rys. 3.21 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli M_{Tpow} o największej i najmniejszej wartości współczynnika fit	68
Rys. 3.22 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{Tpow/Tn}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych	69
Rys. 3.23 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{Tpow/Tn}$ od kubatury hali	70
Rys. 3.24 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{Tpow/Tpod}$ od kubatury hali	71
Rys. 3.25 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{Tpow/RH}$ od kubatury hali	71
Rys. 3.26 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{Tpow} od kubatury hali	72
Rys. 3.27 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{Tpow} od kubatury hali	73
Rys. 3.28 Wpływ współczynnika tłumienia na właściwości dynamiczne modelu	73
Rys. 3.29 Schemat blokowy modelu M_{RH}	74
Rys. 3.30 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu M_{RH}	75
Rys. 3.31 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli M_{RH} o największej i najmniejszej wartości współczynnika fit	75
Rys. 3.32 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{RH/Uosu}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych	76
Rys. 3.33 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/Tpow}$ od kubatury hali	77
Rys. 3.34 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/Uosu}$ od kubatury hali	78
Rys. 3.35 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{RH/U_{naw}}$ od kubatury hali	78
Rys. 3.36 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{RH} od kubatury hali	79

Rys. 3.37 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{RH} od kubatury hali	80
Rys. 3.38 Odpowiedź na wymuszenie jednostkowe transmitancji w postaci G_3 przy współczynnikach: $T=2,3$ h, $\zeta=5,6$ dla pieczarkarni C oraz $T=4,1$ h, $\zeta=3,1$ dla pieczarkarni D.....	80
Rys. 3.39 Schemat blokowy modelu M_{CO_2}	81
Rys. 3.40 Wykres skrzynkowy wartości wskaźnika dopasowania fit dla modelu M_{CO_2}	82
Rys. 3.41 Porównanie przebiegów sygnałów wyjściowych modeli M_{CO_2} o największej i najmniejszej wartości współczynnika fit	82
Rys. 3.42 Przykład odpowiedzi na wymuszenie jednostkowe modelu $G_{CO_2/U_{km}}$ w porównaniu z charakterystykami skokowymi transmitancji cząstkowych	83
Rys. 3.43 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{CO_2/U_{km}}$ od kubatury hali	84
Rys. 3.44 Zależność współczynnika wzmocnienia k_3 transmitancji cząstkowej G_3 modelu $G_{CO_2/T_{pod}}$ od kubatury hali.....	85
Rys. 3.45 Zależność stałej czasowej T transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{CO_2} od kubatury hali	85
Rys. 3.46 Zależność współczynnika tłumienia ζ transmitancji cząstkowej G_3 modelu M_{CO_2} od kubatury hali.....	86
Rys. 3.47 Zmiana aktywności podłoża w kolejnych etapach.....	91

