
KOMITET TECHNIKI ROLNICZEJ PAN
POLSKIE TOWARZYSTWO INŻYNIERII ROLNICZEJ

INŻYNIERIA ROLNICZA

Rok **XI**

4(92)

Kraków 2007

RADA PROGRAMOWA

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman – przewodniczący
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – wiceprzewodniczący
prof. dr hab. inż. Małgorzata Bzowska-Bakalarz
prof. dr hab. inż. Stanisław Pabis
prof. dr hab. inż. Robert Rowiński
prof. dr hab. inż. Józef Szlachta
prof. dr hab. inż. Zdzisław Wójcicki
prof. dr hab. inż. Jan Dawidowski
prof. dr hab. inż. Jerzy Weres

CZŁONKOWIE ZAGRANICZNI

prof. Gerard Wiliam Isaacs (USA) – czł. zagr. PAN
prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
prof. Jürgen Hahn (Niemcy)
prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
prof. Oleg Sidorcuk (Ukraina)

KOMITET REDAKCYJNY

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – redaktor naczelny
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman
prof. dr hab. inż. Janusz Laskowski
dr hab. inż. Sławomir Kurpaska – sekretarz

RECENZENCI

Prof. dr hab. inż. Jan Pabis – IBMER Warszawa
Prof. dr hab. inż. Andrzej Chochowski – SGGW Warszawa

Wydawca

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Praca wykonana

w Zakładzie Inżynierii Systemów Politechniki Warszawskiej

Druk i oprawa:

S.C. DRUKROL (Kraków, al. 29 Listopada 46)
Nakład: 150 egzemplarzy

Rozprawy habilitacyjne

Nr 25

Renata Walczak

**Metoda oceny efektywności energetycznej
suszarek rolniczych**

(rozprawa habilitacyjna)

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.....	7
OBJAŚNIENIA WAŻNIEJSZYCH POJĘĆ STOSOWANYCH W PRACY	10
1 WSTĘP.....	11
2 ANALIZA STANU WIEDZY.....	15
2.1. Problemy wykorzystania energii	15
2.2. Pojęcie energochłonności	16
2.3. Pojęcie efektywności	18
2.4. Uzasadnienie podjęcia pracy	21
3 SFORMUŁOWANIE PROBLEMU BADAWCZEGO.....	23
4 CEL, PRZEDMIOT I ZAKRES PRACY	25
5 MODEL FORMALNY PROCESU SUSZENIA.....	29
5.1. Procedura budowy modelu	29
5.2. Identyfikacja	30
5.3. Model koncepcyjny	32
5.4. Dekompozycja	37
5.5. Proces suszenia.....	37
5.5.1. Pojęcie procesu suszenia	37
5.5.2. Zmienne opisujące proces suszenia	38
5.6. Powietrze suszące.....	39
5.7. Materiał suszony.....	40
5.8. Kolumna susząca.....	41
5.9. Proces suszenia.....	44
5.10. Podgrzewacz powietrza	49
5.11. Przewody powietrzne	50
5.12. Węzły dystrybucyjne	50
5.12.1. Węzły mieszające powietrze	50
5.12.2. Węzły rozdzielające powietrze	52
5.13. Nagrzewanie instalacji suszącej	53
5.14. Sprawność instalacji suszącej.....	53
5.15. Algorytmizacja	58
5.16. Implementacja	63
6. MODEL NEURONOWY PROCESU SUSZENIA	65
6.1. Stan zagadnienia	65
6.2. Model neuronowy procesu suszenia	66

7. SFORMUŁOWANIE WSKAŹNIKÓW OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ	75
7.1. Ogólna koncepcja budowy miar efektywności energetycznej	75
7.2. Wskaźniki efektywności energetycznej dla systemu suszącego	77
7.2.1. Interpretacja wskaźników szczegółowych	79
7.2.1.1. Wskaźniki typu M/M	79
7.2.1.2. Wskaźniki typu G/G	80
7.2.1.3. Wskaźniki typu E/E	81
7.2.1.4. Wskaźniki typu M/G	82
7.2.1.5. Wskaźniki typu M/E	84
7.2.1.6. Wskaźniki typu G/M	86
7.2.1.7. Wskaźniki typu G/E	87
7.2.1.8. Wskaźniki typu E/M	88
7.2.1.9. Wskaźniki typu E/G	89
7.3. Wskaźniki efektywności energetycznej dla różnych konfiguracji suszących	90
7.3.1. Pojedyncza komora susząca	90
7.3.2. Suszarka bez recyrkulacji	91
7.3.3. Suszarka z recyrkulacją	93
8. OCENA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ SYSTEMU SUSZĄCEGO	97
8.1. Procedura oceny systemu suszącego	97
8.2. Procedura oceny efektywności energetycznej systemu suszącego	100
8.3. Graniczne wartości miar efektywności energetycznej	101
8.3.1. Wartości wskaźników typu E/E - wskaźnik E_u/E'	101
8.3.2. Wartości wskaźników typu G/G - wskaźnik G''/G'	104
8.3.3. Wartości wskaźników typu M/M - wskaźnik M''/M'	108
8.3.4. Wartości wskaźników typu G/M - wskaźnik G'/M'	109
8.3.5. Wartości wskaźników typu E/M - Wskaźnik E'/M'	111
8.3.6. Wartości wskaźników typu E/G - wskaźnik E'/G'	113
9. EGZEMPLIFIKACJA	115
9.1. Ocena projektowanej suszarki bez recyrkulacji	115
9.2. Ocena suszarki z recyrkulacją	120
9.3. Ocena suszarki oferowanej do sprzedaży przez producenta	126
9.4. Ocena suszarki eksploatowanej	132
9.5. Porównanie kilku suszarek	135
PODSUMOWANIE	145
BIBLIOGRAFIA	149
STRESZCZENIE	159
SUMMARY	160
ZAŁĄCZNIK - IMPLEMENTACJA	161

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	– stosunek powierzchni do objętości ziarna, $m^2 \cdot (m)^{-3}$,
B	– strumień wykorzystanego paliwa, $kg \cdot (s)^{-1}$,
c	– ciepło właściwe powietrza wilgotnego, $kJ \cdot (kg K)^{-1}$,
c_m	– ciepło właściwe materiału wilgotnego, $kJ \cdot (kg K)^{-1}$,
c_p	– ciepło właściwe powietrza suchego, $kJ \cdot (kg K)^{-1}$,
c_{pw}	– ciepło właściwe pary wodnej, $kJ \cdot (kg K)^{-1}$,
c_w	– ciepło właściwe wody, $kJ \cdot (kg K)^{-1}$,
d_i	– grubość i-tej warstwy przegrody, m,
d_{pz}	– szerokość daszka suszącego, m,
d_z	– średnica zastępcza ziarna, mm,
E	– ilość energii, kJ,
F	– pole powierzchni przekroju poprzecznego suszarki, m^2 ,
F_m	– pole powierzchni przepływu materiału, m^2 ,
F_s	– pole powierzchni komory suszarki w płaszczyźnie normalnej do kierunku przepływu ziarna, m^2 ,
F_z	– pole powierzchni ścianki zewnętrznej suszarki, m^2 ,
G	– natężenie przepływu czynnika suszącego, $kg \cdot (s)^{-1}$,
GM_s	– masa molowa powietrza suchego,
GM_w	– masa molowa wody,
Gtoe	– gigaton of oil equivalent, równoważnik oleju opałowego, $1 \text{ Gtoe} = 41.868 \cdot 10^9 \text{ kJ}$
H_1	– wysokość pierwszej sekcji suszającej, m,
H_2	– wysokość drugiej części suszającej, m,
H_{ch}	– wysokość części chłodzącej, m,
h_{pd}	– wysokość części prostokątnej daszka suszącego, m,
h_{sd}	– wysokość części ukośnej daszka suszącego, m,
i	– entalpia strumienia masy wilgotnego powietrza suszącego, kJ,
i'_{Md}	– entalpia wody zawartej w materiale suszonym, $kJ \cdot (kg)^{-1}$,
i''_{Gd}	– entalpia właściwa pary wodnej na wylocie z suszarki, $kJ \cdot (kg)^{-1}$,
i_m	– entalpia strumienia masy materiału wilgotnego, kJ,
i_{ms}	– entalpia strumienia masy materiału suchego, kJ,
i_s	– entalpia właściwa powietrza suchego odniesiona do jednego kilograma powietrza suchego, $kJ \cdot (kg)^{-1}$,
\dot{i}_s	– entalpia strumienia masy suchego powietrza suszącego, kJ,
i_w	– entalpia strumienia masy wody zawartej w materiale wilgotnym, kJ,
i_{pw}	– entalpia strumienia masy wody zawartej w powietrzu suszącym, kJ,
I	– ilość ciepła, kJ
k	– współczynnik przenikania ciepła, $W \cdot (m^2 K)^{-1}$,
K	– współczynnik suszarniczy, s^{-1} ,

l	– charakterystyczny wymiar liniowy, dla ziarna średnica zastępcza ziarna, m,
L	– obwód kolumny suszącej, m,
l_d	– długość daszka suszącego, m,
M	– natężenie przepływu materiału suszonego, $\text{kg}\cdot(\text{s})^{-1}$,
n_1	– liczba par daszków w pierwszej części suszącej,
n_2	– liczba par daszków w drugiej części suszącej,
n_{ch}	– liczba par daszków w części chłodzącej,
n_d	– liczba daszków suszących na jednym poziomie,
Nu	– liczba Nusselta, $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$
p_{at}	– ciśnienie atmosferyczne, hPa,
p_s	– ciśnienie nasycenia pary wodnej w określonej temperaturze i przy określonym ciśnieniu atmosferycznym, hPa,
p_w	– ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu, hPa,
Q	– ilość ciepła, kJ,
Q_i	– wartość opałowa paliwa, $\text{kJ}\cdot(\text{kg})^{-1}$,
r	– ciepło parowania wody, $\text{kJ}\cdot(\text{kg})^{-1}$
r_0	– ciepło parowania wody w temperaturze 0°C , $\text{kJ}\cdot(\text{kg})^{-1}$,
Re	– liczba Reynoldsa, $Re = \frac{v_p l}{\nu}$
R_i	– opór cieplny i-tej warstwy przewodzenia, $(\text{m}^2\text{K})\cdot(\text{W})^{-1}$,
r_z	– ciepło parowania wody z materiału suszonego, $\text{kJ}\cdot(\text{kg})^{-1}$,
s_{pn}	– odległość w pionie między daszkami suszącymi, m,
s_{pz}	– odległość w poziomie między daszkami suszącymi, m,
t	– temperatura powietrza suszącego, $^\circ\text{C}$,
t_m	– temperatura materiału suszonego, $^\circ\text{C}$,
t_s	– temperatura nasycenia powietrza suszącego, $^\circ\text{C}$,
u	– zawartość wody w materiale suszonym, $\text{kg}\cdot(\text{kg})^{-1}$,
u_r	– równowagowa zawartość wody w materiale suszonym, $\text{kg H}_2\text{O}\cdot(\text{kg s.m.})^{-1}$,
V	– objętość całkowita mieszaniny powietrza suchego i pary wodnej,
v_p	– prędkość powietrza, $\text{m}\cdot(\text{s})^{-1}$,
w	– wilgotność materiału suszonego, %,
x	– zawartość wody w powietrzu suszącym, $\text{kg}\cdot(\text{kg})^{-1}$,
z	– współrzędna mierzona wzdłuż drogi przepływu, m,
α	– współczynnik wnikania ciepła, $\text{kJ}\cdot(\text{m}^2\text{K h})^{-1}$,
α_i	– współczynnik przejmowania ciepła po wewnętrznej stronie przegrody, $\text{W}\cdot(\text{m}^2\text{K})^{-1}$,
α_e	– współczynnik przejmowania ciepła po zewnętrznej stronie przegrody, $\text{W}\cdot(\text{m}^2\text{K})^{-1}$,
$(\alpha\alpha)$	– objętościowy współczynnik wnikania ciepła, $\text{kJ}\cdot(\text{m}^3\text{K s})^{-1}$,
γ	– gęstość powietrza wilgotnego, $\text{kg}\cdot(\text{m})^{-3}$,
γ_m	– gęstość materiału wilgotnego, $\text{kg}\cdot(\text{m})^{-3}$,
γ_{ms}	– gęstość materiału suchego, $\text{kg}\cdot(\text{m})^{-3}$,

γ_s	– gęstość powietrza suchego, $\text{kg} \cdot (\text{m})^{-3}$,
ε	– porowatość warstwy ziarna,
φ	– wilgotność względna powietrza suszącego, %,
λ	– współczynnik przewodności cieplnej materiału suszonego, $\text{W} \cdot (\text{m K})^{-1}$,
λ_i	– współczynnik przewodzenia ciepła i-tej warstwy przegrody, $\text{W} \cdot (\text{m K})^{-1}$,
ν	– współczynnik lepkości kinematycznej powietrza, $\text{m}^2 \cdot (\text{s})^{-1}$,
η	– sprawność,
τ	– czas, s,

Objaśnienie indeksów przy oznaczeniach

'	– wejście,
”	– wyjście,
G	– powietrze suszące,
M	– materiał suszony,
N	– nakłady,
P	– wymiennik ciepła na podgrzewaczu powietrza,
R	– przewody powietrzne,
at	– atmosferyczne,
ch	– część chłodząca,
d	– kolumna susząca,
dop	– dopuszczalny,
el	– energia elektryczna,
h	– podgrzewacz,
inst	– element instalacji,
is	– instalacja susząca,
nagrz	– nagrzanie,
p	– powietrze,
pw	– para wodna,
s	– sucha masa,
susz	– część susząca,
u	– użyteczny, odniesione do uzyskanego efektu użytecznego, którym jest odparowanie wody z materiału suszonego.
zal	– założony, zalecany,
z	– zewnętrzny.

OBJAŚNIENIA WAŻNIEJSZYCH POJĘĆ STOSOWANYCH W PRACY

Cisnienie nasycenia – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, przy którym mieszanina osiąga stan nasycenia. Po przekroczeniu ciśnienia nasycenia z mieszaniny powietrza i pary wodnej zaczyna wykraplać się mgła wodna [Strumiłło 1995].

Efekt użyteczny – strumień masy wody odparowanej z materiału suszonego w jednostce czasu [Marecki 2000; Powierża 1981].

Efektywność – charakterystyka skuteczności transformacji poniesionych nakładów na efekty, czyli iloraz efektów użytecznych do poniesionych nakładów; pokrewna sprawności i produktywności [Marecki 2000; Powierża 1981].

Energia bezpośrednia – energia, którą użytkownicy nabywają w celu zaspokojenia potrzeb na energię użytkową, m.in. ciepło, energia elektryczna, paliwa [Bibrowski 1983].

Energia końcowa materiału suszonego – entalpia materiału suszonego opuszczającego suszarkę [Pawłow i in. 1963].

Energia końcowa powietrza suszącego – entalpia powietrza suszącego opuszczającego suszarkę [Pawłow i in. 1963].

Energia odzyskana – część energii końcowej powietrza suszącego lub materiału suszonego zaoszczędzona dzięki zastosowaniu recyrkulacji powietrza lub zastosowania urządzeń odzyskowych [Olesen 1987].

Energia użytkowa – energia wykorzystywana przez człowieka: ciepło, energia elektryczna, praca mechaniczna, światło, dźwięk, energia chemiczna żywności i paszy, energia chemiczna przedmiotów [Sala 1993].

Energia włożona bezpośrednia – energia chemiczna paliwa wykorzystana do odparowania określonej w jednym cyklu ilości wody [Pawłow i in. 1963; Bibrowski 1983].

Energia włożona całkowita – suma energii chemicznej paliwa i innych postaci energii (np. energii elektrycznej) bezpośrednio wykorzystanych w procesie technologicznym do odparowania określonej ilości wody [Pawłow i in. 1963].

Energia wyprowadzana z systemu suszącego – energia wyprowadzana z materiałem suszonym, powietrzem suszącym, powietrzem chłodzącym, przez przegrody zewnętrzne, przez nieszczelności instalacji [Pawłow i in. 1963].

Energochłonność – stosunek energii włożonej do efektu użytecznego [Sala 1993].

Energochłonność bezpośrednia – Stosunek energii włożonej bezpośredniej do efektu użytecznego [Bibrowski 1983].

Energochłonność całkowita – stosunek energii włożonej całkowitej do efektu użytecznego [Bibrowski 1983].

Entalpia materiału – ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury 1 kg materiału wilgotnego od zera stopni Celsjusza do temperatury materiału. Entalpia materiału wilgotnego jest sumą entalpii materiału suchego i entalpii zawartej w nim wody [Pabis 1964].

Entalpia powietrza wilgotnego – ilość ciepła potrzebna do podniesienia temperatury 1 kg mieszaniny powietrza suchego i pary wodnej od zera stopni Celsjusza do temperatury mieszaniny. Entalpia powietrza wilgotnego jest sumą entalpii powietrza suchego i pary wodnej. Przy wyznaczaniu entalpii pary wodnej należy uwzględnić ciepło parowania wody [Strumiłło 1995].

Moc cieplna suszarki – strumień ciepła, pochodzącego z energii chemicznej paliwa, konieczny do ogrzania powietrza suszącego wprowadzanego do suszarki [Pawłow i in. 1963].

Model – zastępująca oryginał formą jego reprezentacji adekwatna ze względu na cel rozważań. W zależności od punktu widzenia wyróżnia się różne modele [Powierża 1997].

Moduł – element, funkcjonalny składnik całości (systemu informatycznego) będący przedmiotowo zorientowaną całością funkcjonalną [Powierża 1997].

Sprawność bezpośrednia – stosunek efektu użytecznego do energii włożonej bezpośredniej [Strumiłło 1975; Marecki 2000; Szargut 2000; Pabis i in. 1973].

Sprawność całkowita – stosunek efektu użytecznego do energii włożonej całkowitej [Strumiłło 1975; Marecki 2000; Szargut 2000; Urbaniec i in. 1982].

Suszarka teoretyczna – suszarka, w której nie występują straty ciepła do otoczenia, nie występują straty ciepła na ogrzanie materiału suszonego i urządzeń suszących i transportowych, brak wewnętrznych źródeł ciepła. Ciepło dostarczone wykorzystywane jest tylko na podwyższenie entalpii powietrza odlotowego. Suszenie przebiega przy stałej entalpii powietrza [Pawłow i in. 1963; Strumiłło 1975].

Suszarka z recyrkulacją – suszarka w której odlotowe powietrze suszące zawracane jest do podgrzewacza powietrza, w którym jego temperatura podnoszona jest do temperatury określonej przez technologię procesu suszenia [Pawłow i in. 1963; Strumiłło 1975].

Temperatura punktu rosy – temperatura, w której mieszanina powietrza i pary wodnej pod stałym ciśnieniem osiąga stan nasycenia [Strumiłło 1975; Malicki 1980; Szargut 2000].

Wilgotność materiału – zawartość wody w materiale wilgotnym odniesiona do masy materiału suchego oraz zawartej w nim wody [Pawłow i in. 1963; Strumiłło 1975; Pabis i in. 1973].

Wilgotność równowagowa materiału – zawartość wody w materiale w stanie równowagi z parą wodną o określonym ciśnieniu cząstkowym i temperaturze. Minimalna wilgotność, do której teoretycznie można wysuszyć materiał [Strumiłło 1975; Pabis i in. 1973].

Wilgotność względna powietrza – stosunek ciśnienia cząstkowego pary wodnej w powietrzu do ciśnienia cząstkowego pary wodnej nasyconej w tej samej temperaturze [Pawłow i in. 1963; Strumiłło 1975; Malicki 1980; Pabis i in. 1973].

Zawartość wody – zwana wilgotnością bezwzględną masową, wilgotnością absolutną lub zawartością wilgoci, oznacza masę pary wodnej (w przypadku powietrza) lub masę wody (w przypadku suszonego materiału), przypadającą na jeden kilogram suchego powietrza lub jeden kilogram suchej masy materiału suszonego [Pawłow i in. 1963; Strumiłło 1975; Pabis i in. 1973].

STRESZCZENIE

Celem pracy jest opracowanie sformalizowanej, z informatyzowanej metody oceny efektywności energetycznej procesu suszenia realizowanego przez suszarki rolnicze przydatnej m.in. w trakcie projektowania nowych suszarek, porównywania różnych konfiguracji, oceny istniejących urządzeń technicznych. Do konkretyzacji i egzemplifikacji rozważań wykorzystano suszarkę daszkową traktując ją jako reprezentatywny ze względu na przedmiot rozważań model ogółu konwekcyjnych suszarek rolniczych. Przeprowadzono analizę stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie na podstawie dostępnych materiałów źródłowych dotyczących oceny efektywności systemów bioagrotechnicznych w aspekcie ich przydatności do oceny efektywności energetycznej suszarek rolniczych w szczególności konwekcyjnych. Omówiono wykorzystany model matematyczny. Podjęto próbę zastosowania modelu neuronowego do modelowania procesu suszenia. Zdefiniowano na użytek prowadzonych rozważań efektywność energetyczną suszarki jako iloraz wyrażonych różnymi wielkościami efektów suszenia do wyrażonych różnymi wielkościami nakładów na ich pozyskanie w ustalonym czasie. Dla sprawdzenia podatności metody na zmianę warunków oceny rozpatrzono różne konfiguracje (konstrukcyjne, technologiczne, użytkowe, eksploatacyjne) suszarek daszkowych w aspekcie efektywności energetycznej. Opracowano zestaw miar efektywności energetycznej suszarek oraz koncepcję dokonywania za ich pośrednictwem szczegółowych ocen przedmiotowych. Dla zapewnienia użytkowej przydatności metody opracowane modele zaimplementowano w środowisku informatycznym Symuneuron. Oceny poprawności merytorycznej i przydatności użytkowej dokonano na podstawie konfrontacji wyników uzyskanych z symulacji procesu suszenia z wynikami z badań eksploatacyjnych oraz danymi podawanymi przez producentów suszarek w handlowych materiałach informacyjnych. Egzemplifikacja metody potwierdziła jej przydatność użytkową w przewidywanym zakresie zastosowań.

Słowa kluczowe: efektywność energetyczna, metoda, suszenie, suszarka daszkowa

SUMMARY

The aim of the dissertation was presenting formal and programmable method evaluating energy efficiency of drying process performed in agriculture dryers. The method is going to be usefull during designing process, comparing different configurations and evaluating existing technical equipment. The counterflow cascade dryer was taken into consideration as the representative appliance of the majority of convective agriculture dryers. The present condition of knowledge regarding discussed topic was described according to available sources regarding agriculture systems energy evaluation in terms of their usefulness of energy efficiency evaluation of agriculture dryers, especially convective dryers. It was presented the mathematical model of the drying process used in the dissertation. The energy efficiency of the dryer was defined as the quotient of different values of drying effects and different costs of drying process in the set time. In order to check the sensitiveness of the method different evaluation conditions were taken into consideration different (construction, technological, exploitation) configurations of cascade dryers in terms of energy efficiency. The set of energy efficiency coefficients and the idea of dryer evaluation application was presented. The defined models were implemented in the Symuneuron environment. In order to check the usefulness and the propriety of the merits of the case there were considered the results of the mathematical models, exploitation tests and advertisement materials presented in commercial information materials. The exemplification of the method confirmed the usefulness of method in the given application range.

Key words: energy effectiveness, method, drying, cascade dryer

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 4.1.	Procedura oceny przydatności suszarki	26
Rys. 5.1.	Procedura budowy systemu ekspertowego	29
Rys. 5.2.	Schemat technologiczny suszarni zboża	31
Rys. 5.3.	Procedura budowy modelu procesu suszenia	33
Rys. 5.4.	Komora susząca suszarki daszkowej	34
Rys. 5.5.	Konfiguracja złożona z komory suszącej, podgrzewacza powietrza oraz przewodów powietrznych	34
Rys. 5.6.	Konfiguracja złożona z komory suszącej, komory chłodzącej, podgrzewacza powietrza oraz przewodów powietrznych	35
Rys. 5.7.	Konfiguracja złożona z dwóch komór suszących, komory chłodzącej, podgrzewacza powietrza oraz przewodów powietrznych umożliwiających recyrkulację powietrza	36
Rys. 5.8.	Wielkości opisujące proces suszenia	38
Rys. 5.9.	Schemat budowy suszarki daszkowej	42
Rys. 5.10.	Schemat zabudowy suszarki daszkowej	43
Rys. 5.11.	Schemat konstrukcji kanałów powietrznych	43
Rys. 5.12.	Schemat przepływów materiału suszonego i powietrza suszącego w suszarni daszkowej z uwzględnieniem przeciwprądu i prądu skrzyżowanego	44
Rys. 5.13.	Schemat przepływów powietrza suszącego w suszarce	45
Rys. 5.14.	Model elementarnej warstwy suszonego materiału	45
Rys. 5.15.	Bilans wody w procesie suszenia bez recyrkulacji	47
Rys. 5.16.	Bilans wody w procesie suszenia z recyrkulacją	48
Rys. 5.17.	Schemat węzła, w którym następuje mieszanie dwóch strumieni powietrza	51
Rys. 5.18.	Schemat węzła, w którym następuje podział powietrza	52
Rys. 5.19.	Bilans cieplny powietrza suszącego suszarki daszkowej bez recyrkulacji ..	54
Rys. 5.20.	Wykres Sankey'a dla wymiany ciepła w suszarce bez recyrkulacji	55
Rys. 5.21.	Wykres Sankey'a dla wymiany ciepła w suszarce z recyrkulacją	56
Rys. 5.22.	Schemat blokowy algorytmu doboru kroku przy całkowaniu numerycznym	60
Rys. 5.23.	Algorytm obliczeń instalacji suszącej	62
Rys. 6.1.	Schemat sieci złożonej z perceptronów wielowarstwowych	70
Rys. 6.2.	Schemat sieci realizującej regresję uogólnioną	70
Rys. 7.1.	Zestawienie strumieni doprowadzanych i wyprowadzanych z systemu suszącego	78
Rys. 7.2.	Zestawienie strumieni przecinających osłonę bilansową dla pojedynczej komory suszącej	90
Rys. 7.3.	Zestawienie strumieni wprowadzanych i wyprowadzanych z suszarki bez recyrkulacji	92
Rys. 7.4.	Zestawienie strumieni ciepła wprowadzanych i wyprowadzanych z suszarki z recyrkulacją	94

Rys. 8.1. Procedura ogólnej oceny systemu suszącego	97
Rys. 8.2. Procedura oceny efektywności energetycznej systemu suszącego	99
Rys. 8.3. Ilustracja klasyfikacji oceny suszarki na podstawie wartości dwóch wskaźników	101
Rys. 9.1. Suszarka daszkowa usytuowana przy magazynie zbożowym	127
Rys. 9.2. Suszarka LSO 21-504.18. Rzut pionowy	128
Rys. Z.1. Struktura budowy systemu Symuneuron	162
Rys. Z.2. Okno wyboru zestawu przykładowej konfiguracji suszarki	162
Rys. Z.3. Okno główne programu Symuneuron	163
Rys. Z.4. Okno wprowadzania danych wejściowych	164
Rys. Z.5. Okno zestawiające wymiary daszków	164
Rys. Z.6. Okno zestawiające wymiary sekcji suszącej	165
Rys. Z.7. Okno zestawiające podstawowe wyniki obliczeń suszarki	166
Rys. Z.8. Okno zestawiające szczegółowe parametry dotyczące powietrza suszącego	167
Rys. Z.9. Okno zestawiające szczegółowe parametry dotyczące materiału suszonego	168
Rys. Z.10. Okno zestawiające szczegółowe parametry dotyczące wymiany wody w procesie suszenia	169
Rys. Z.11. Schemat podstawowych parametrów procesu suszenia	169
Rys. Z.12. Okno zestawiające temperatury materiału na wejściu do suszarki, na końcu części suszącej i na wyjściu z suszarki	170
Rys. Z.13. Wykres Sankey'a dla wymiany wody w suszarce	171
Rys. Z.14. Wykres Sankey'a dla wymiany ciepła w suszarce	172
Rys. Z.15. Zestawienie końcowej zawartości wody w materiale suszonym wyznaczonej przez model matematyczny i modele neuronowe	172
Rys. Z.16. Wykres zestawiający końcową zawartość wody w materiale suszonym wyznaczonej przez model matematyczny i modele neuronowe	173
Rys. Z.17. Zestawienie końcowej temperatury materiału suszonego wyznaczonej przez model matematyczny i modele neuronowe	173
Rys. Z.18. Wykres zestawiający końcową temperaturę materiału suszonego wyznaczonej przez model matematyczny i modele neuronowe	174
Rys. Z.19. Okno umożliwiające wybór analizy doboru najlepszych parametrów procesowych	175
Rys. Z.20. Okno umożliwiające wyszukanie parametrów początkowych procesu suszenia	175
Rys. Z.21. Okno umożliwiające wyszukanie temperatury początkowej powietrza suszącego w zależności od żądanej końcowej wilgotności materiału	176
Rys. Z.22. Okno wprowadzania parametrów procesowych powietrza zewnętrznego dla rzeczywistego procesu suszenia	177
Rys. Z.23. Okno wprowadzania parametrów procesowych materiału suszonego dla rzeczywistego procesu suszenia	177
Rys. Z.24. Okno wprowadzania parametrów procesowych powietrza suszącego dla rzeczywistego procesu suszenia	178
Rys. Z.25. Okno wprowadzania parametrów suszarki dla rzeczywistego procesu suszenia ..	178
Rys. Z.26. Okno przedstawiające przykładowy arkusz oceny suszarki rzeczywistej....	179

Rys. Z.27. Okno przedstawiające porównanie ocen wygenerowanych dla kilku suszarek 180

SPIS TABEL

Tabela 6.1.	Zestawienie parametrów wejściowych dla modelu neuronowego	67
Tabela 6.2.	Zestawienie parametrów wyjściowych dla modelu neuronowego.....	67
Tabela 6.3.	Zestawienie wyników dla najlepszych przetestowanych sieci neuronowych dla procesu suszenia	69
Tabela 6.4.	Statystyki regresyjne dla sieci nr 11.....	72
Tabela 6.5.	Statystyki regresyjne dla sieci nr 16.....	72
Tabela 6.6.	Statystyki regresyjne dla sieci nr 17.....	73
Tabela 7.1.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy M/M.....	80
Tabela 7.2.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy G/G	81
Tabela 7.3.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy E/E	82
Tabela 7.4.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy M/G.....	83
Tabela 7.5.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy M/E.....	84
Tabela 7.6.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy G/M.....	86
Tabela 7.7.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy G/E.....	87
Tabela 7.8.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy E/M.....	88
Tabela 7.9.	Interpretacja wskaźników szczegółowych macierzy E/G	89
Tabela 8.1.	Zestawienie wartości granicznych dla klas sprawności systemu suszącego	104
Tabela 8.2.	Zestawienie wartości granicznych dla klas wskaźnika G''/G'	107
Tabela 8.3.	Zestawienie wartości granicznych dla klas wskaźnika M''/M'	109
Tabela 8.4.	Zestawienie wartości granicznych dla klas wskaźnika G'/M'	111
Tabela 8.5.	Zestawienie wartości granicznych dla klas wskaźnika E'/M'	112
Tabela 8.6.	Zestawienie wartości granicznych dla klas wskaźnika E'/G'	113
Tabela 9.1.	Parametry budowy projektowanej suszarki daszkowej	116
Tabela 9.2.	Parametry powietrza suszącego w projektowanej suszarce daszkowej bez recykulacji	116
Tabela 9.3.	Parametry materiału suszonego w projektowanej suszarce daszkowej bez recykulacji	116
Tabela 9.4.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej suszarki daszkowej bez recykulacji	117
Tabela 9.5.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej suszarki daszkowej bez recykulacji	119
Tabela 9.6.	Parametry powietrza w projektowanej suszarce daszkowej z recykulacją	120

Tabela 9.7.	Parametry materiału suszonego w projektowanej suszarce daszkowej z recykulacją	121
Tabela 9.8.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej suszarki daszkowej z recykulacją	121
Tabela 9.9.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej suszarki daszkowej z recykulacją	122
Tabela 9.10.	Parametry budowy projektowanej, poprawionej suszarki daszkowej	123
Tabela 9.11.	Parametry powietrza suszącego w projektowanej suszarce daszkowej z recykulacją	123
Tabela 9.12.	Parametry materiału suszonego w projektowanej, poprawionej suszarce daszkowej z recykulacją	124
Tabela 9.13.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej, poprawionej suszarki daszkowej z recykulacją	124
Tabela 9.14.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla projektowanej, poprawionej suszarki daszkowej z recykulacją	125
Tabela 9.15.	Zestawienie danych dotyczących suszarki LSO 21-504.18, podawanych przez producenta, czeską firmę TMS Pardubice	130
Tabela 9.16.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki LSO 21-504.18	131
Tabela 9.17.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki LSO 21-504.18	131
Tabela 9.18.	Zestawienie danych dotyczących suszarki SD 10 uzyskanych w trakcie badań eksploatacyjnych	133
Tabela 9.19.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki SD 10	133
Tabela 9.20.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki SD 10	134
Tabela 9.21.	Dane techniczne suszarki A1	135
Tabela 9.22.	Zestawienie danych dotyczących suszarki A1	136
Tabela 9.23.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki A1	136
Tabela 9.24.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki A1	137
Tabela 9.25.	Dane techniczne suszarki A2	137
Tabela 9.26.	Zestawienie danych dotyczących suszarki A2	138
Tabela 9.27.	Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki A2	138
Tabela 9.28.	Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki A2	139
Tabela 9.29.	Dane techniczne suszarki B1	140
Tabela 9.30.	Zestawienie danych dotyczących suszarki B1	141

Metoda oceny efektywności energetycznej...

Tabela 9.31. Zestawienie zmiennych procesowych wykorzystywanych do wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki B1	141
Tabela 9.32. Zestawienie wartości wskaźników efektywności energetycznej dla suszarki B1	142