

Sergiusz Maćkowiak, Wojciech Mueller, Jerzy Weres, Sebastian Kujawa
Instytut Inżynierii Rolniczej
Akademia Rolnicza w Poznaniu

SYSTEM INFORMATYCZNY WSPOMAGAJĄCY IDENTYFIKACJĘ LOSOWYCH ROZKŁADÓW PARAMETRÓW CIEPLNYCH KAMIENNEGO REGENERATORA

Streszczenie

Procesy pozyskiwania i gromadzenia energii cieplnej pochodzącej z niekonwencjonalnych źródeł, współpracujących z kamiennymi regeneratorami mają charakter probabilistyczny. Przyczynami sprawczymi tego zjawiska są z jednej strony losowa charakterystyka wspomnianych źródeł energii, a z drugiej stochastyczna struktura akumulatora. Probabilistyczny charakter tego zjawiska uwzględniony został przy budowie aplikacji odwzorowującej fazę ładowania kamiennego regeneratora. Wytworzony system informatyczny pozwala na realizację symulacji identyfikujących ilość energii zgromadzonej w kamiennym złożu, temperaturę powietrza oraz kamieni wzdłuż złoża. Z uwagi na konieczność przeprowadzenia dalszej analizy statystycznej, zmierzającej do określenia probabilistycznych cech wspomnianych wielkości dokonano niezbędnej rozbudowy systemu. Zaprojektowany i wytworzony system informatyczny umożliwia realizację określonej liczby powtórzeń symulacji, istotnych z punktu widzenia analizy statystycznej oraz zapis wyników obliczeń w postaci i formacie akceptowalnym przez program Statistica. Pozwoliło to na dokonanie identyfikacji rozkładów losowych parametrów termodynamicznych charakteryzujących proces ładowania kamiennego regeneratora.

Słowa kluczowe: regenerator kamienny, akumulator energii cieplnej, model probabilistyczny

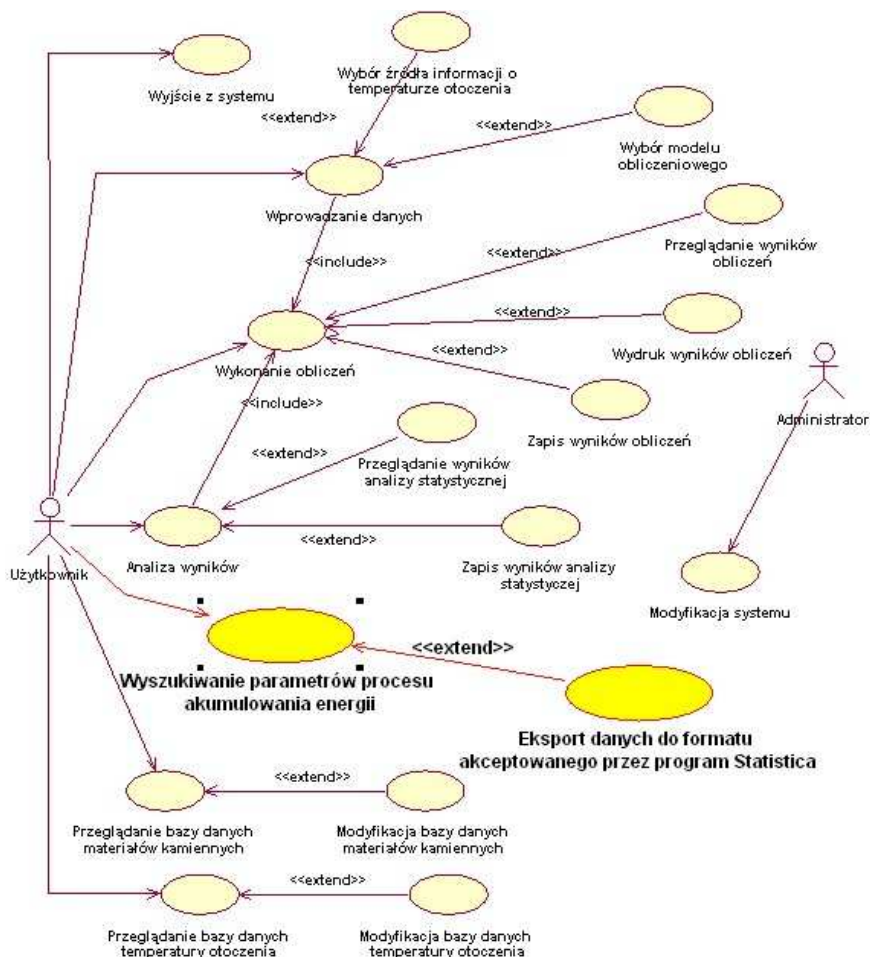
Probabilistyczny model przepływu ciepła stanowiący podstawę budowy systemu informatycznego

Akumulatory kamienne stosowane w systemach niekonwencjonalnych źródeł energii wykorzystywanych w rolnictwie z reguły współpracują z powietrznymi kolektorami słonecznymi. Złoża kamienne stanowiące wypełnienie tych regeneratorów mają strukturę losową, co znajduje odzwierciedlenie w probabilistycznym charakterze średnicy równoważnej kamieni. Podobny probabilistyczny charakter wykazuje energia pozyskiwana z kolektorów słonecznych, a dostarczana do akumulatora w trakcie fazy ładowania. Oznacza to, iż losowy charakter ma nie tylko średnica równoważna kamieni złoża, ale również temperatura powietrza zasilającego kamienny regenerator, jak i również temperatura otoczenia. Ów losowy charakter wielkości fizycznych istotnych z punktu widzenia przepływu ciepła przebiegającego w trakcie fazy ładowania regeneratora został uwzględniony w jednowymiarowy probabilistycznym modelu zbudowanym przez autorów i opisanym we wcześniejszej publikacji [Mueller, Kujawa, Weres 2003]. Stanowił on podstawę do zaprojektowania i wytworzenia systemu informatycznego Akterm.

Modelowanie obiektowe rozbudowywanego systemu informatycznego

Dotychczasowy system informatyczny Akterm 2003 pozwalał użytkownikowi na zapis wyników symulacji fazy ładowania regeneratora do formatów tekstowych, co utrudniało ich dalszą obróbkę statystyczną. Ponadto otrzymane wyniki temperatury powietrza i złoża dla poszczególnych sekcji i określonych kroków czasowych zestawiane były razem w jednym dokumencie, co z kolei wymuszało dalszą operację selekcji danych. Postawione dodatkowe wymagania skierowane pod adresem systemu, mające na celu przyspieszenie i usprawnienie analiz statystycznych danych uzyskanych z symulacji komputerowych wymusiły konieczność dokonania niezbędnych modyfikacji aplikacji. Na etapie projektowania uwzględnione wymagania spowodowały modyfikację zarówno diagramów przypadków użycia (rys. 1), obrazujących funkcjonalność systemu, jak i diagramów klas. Te ostatnie prezentują statyczną strukturę systemu.

Na bazie efektów modelowania obiektowego, czyli diagramów przystąpiono do implementacji systemu w wizualnym środowisku programistycznym, jakim jest C++Builder.



Rys. 1. Diagram UML przypadków użycia

Fig. 1. Diagram UML of use cases

Moduł systemu informatycznego udostępniający dane dla potrzeb analizy statystycznej

Wytworzony system informatyczny Akterm 2004 będący następcą wersji o roboczej nazwie Aktrem 2003 został wzbogacony o dodatkowy formularz pozwalający na precyzyjny wybór danych po kątem dalszej analizy statystycznej (rys. 2). Dane te to parametry termodynamiczne opisujące proces ładowania kamiennego regeneratora. Jednoznaczny ich wybór wymaga podania numeru sekcji, co jest

równoznaczne z określeniem położenia analizowanego przekroju oraz czasu trwania procesu ładowania regeneratora. Realizowane jest to indywidualnie dla temperatury powietrza i złoża, natomiast wspólnie precyzujemy liczbę zrealizowanych symulacji, czyli powtórzeń, tak istotnych z punktu widzenia analizy statystycznej. Efektem końcowym jest zapis pożądaných wyników do pliku w formacie akceptowalnym przez program Statistica, który jest narzędziem późniejszej analizy.

Główna	Dane	Monitoring	Temperatura powietrza	Temperatura kamienia
Pojemność cieplna		Analiza powietrza	Analiza kamienia	Wyszukiwanie
Wyszukiwanie temperatury powietrza		Wyszukiwanie temperatury kamienia		
Wybierz numer sekcji: 21		Wybierz numer sekcji: 21		
Wybierz godzinę ładowania [h]: 5		Wybierz godzinę ładowania [h]: 5		
Wyszukaj temperaturę powietrza		Wyszukaj temperaturę kamienia		
Temperatura dla wyszukiwanego punktu wynosi: 16,57		Temperatura dla wyszukiwanego punktu wynosi: 16,55		
Zapis		Oblicz & Zapisz		
Wskaż liczbę realizacji (1-1000): 1				
Wyszukiwanie temperatury powietrza i kamienia				
Wybierz numer poszukiwanej sekcji: 21				
Wybierz godzinę ładowania [h]: 5				
Temperatura powietrza: 16,57		Temperatura kamienia: 16,55		
Wyszukaj				

Rys. 2. Formularz dostarczający wybrane dane z symulacji komputerowych do analizy statystycznej

Fig. 2. Form feeding chosen data from computer simulations to the statistical analysis

Uniwersalnym formatem zapisu danych nie zawężającym listy programów pozwalających na dalszą obróbkę wyników wraz z ich wizualizacją jest standard .xls

Wyniki badań

Losowość procesu ładowania kamiennego regeneratora implikuje probabilistyczny charakter parametrów termodynamicznych opisujących przepływ ciepła występujący w tej fazie pracy akumulatora. Wcześniejsze wysiłki autorów [Mueller 2005] zmierzające do identyfikacji rozkładów opisujących temperaturę powietrza, kamieni i ilości energii cieplnej skumulowanej w złożu nie dały jednoznacznych rozstrzygnięć. Postawiono dwie różne hipotezy, iż rozkład wspomnianych wielkości ma charakter normalny oraz lognormalny. Za ich przyjęciem przemawiał fakt,

iz średnica równoważna kamieni to zmienna losowa o rozkładzie lognormalnym [Benjamin, Cornell 1977], a temperatura powietrza zasilającego złoża, jak i otoczenia opisana jest przez rozkład normalny. Przeprowadzone symulacje komputerowe w połączeniu z analizą statystyczną nie pozwalały jednak na odrzucenie żadnej z przyjętych hipotez.

Kontynuując badania postanowiono zwiększyć liczbę powtórzeń oraz wyeliminować z analizy statystycznej te wyniki, które nie spełniają przyjętych reguł. Powszechnie akceptowane reguły w analizie statystycznej prowadzące do eliminacji błędów grubych to:

- eliminacja tych danych, które nie spełniają poniższej nierówności [Machczyński 2001] $|x - x_{sr}| \geq 3 \cdot s$, gdzie: s – odchylenie standardowe,
- odrzucenie 5% wartości najmniejszych i największych z populacji [Kala 1999].

W wyniku przeprowadzonej symulacji komputerowej, przebiegającej przy zwiększonej liczbie powtórzeń, uzyskano dane temperaturowe dla wybranych sekcji akumulatora, których położenie ilustruje rys. 3. Następnie przeprowadzono operację selekcji wyników, polegającą na odrzuceniu wartości skrajnych zgodnie z przyjętymi regułami. Z uwagi na fakt, iż liczba odrzuconych wyników była zdecydowania większa przy stosowaniu drugiego kryterium oraz na podstawie wstępnie dokonanych analiz statystycznych postanowiono eliminować dane bazując tylko na wspomnianej wyżej regule. Otrzymane tym sposobem wyniki poddano dalszej analizie statystycznej, zmierzającej do identyfikacji ich rozkładów. Identyfikacyjną procedurę postępowania przeprowadzono w odniesieniu do wielkości energii cieplnej zgromadzonej w złożu w trakcie procesu ładowania.

Efekty symulacji i przeprowadzonej następnie analizy statystycznej przy zastosowaniu pakietu Statistica zamieszczono w tabelach 1 i 2. Kolorem szarym zaznaczono korzystniejsze wartości testu chi-kwadrat dla dwóch różnych, wspomnianych wyżej hipotez.

Graficzną ilustracją stopnia rozrzutu i dopasowania wyników temperatury złoża i wielkości energii cieplnej zgromadzonej w złożu dla wybranych sekcji prezentują rysunki rys. 3 i 4.

Tabela 1. Weryfikacja hipotez o rozkładzie normalnym i lognormalnym temperatury złoża, powietrza i energii zgromadzonej w złożu przy użyciu testu chi-kwadrat dla prób o liczebności 50 i 200

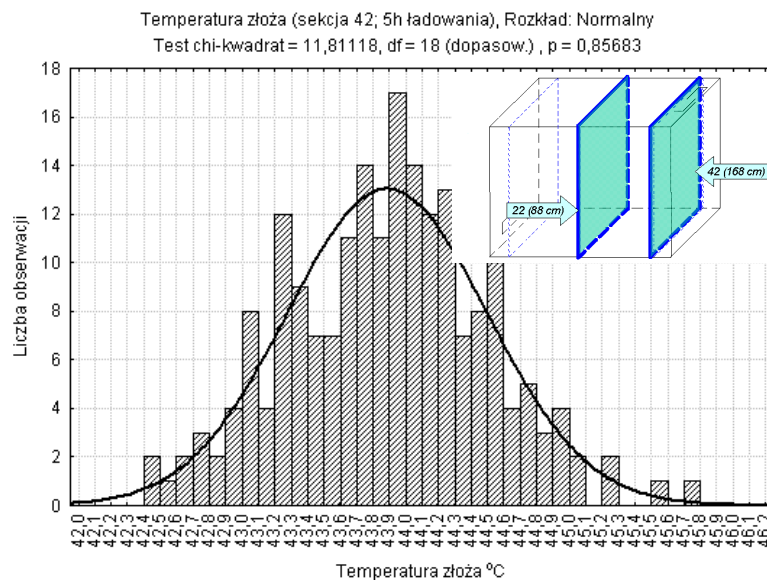
Table 1. Basic statistics of temperature rock-bed air and rock-bed thermal energy including matched distributions for 50 and 200 revisions

Wielkość fizyczna	Czas ładowania	Numer sekcji	Zestawienie rozkładów dla 50 powtórzeń				Zestawienie rozkładów dla 200 powtórzeń			
			Rozkład normalny		Rozkład lognormalny		Rozkład normalny		Rozkład lognormalny	
			χ^2	α	χ^2	α	χ^2	α	χ^2	α
T - pow.	2 h	42	7,02	0,071	7,06	0,133	6,01	0,423	6,21	0,400
T - pow.	5 h	42	2,54	0,111	2,71	0,100	1,93	0,588	1,89	0,596
T - złoża	2 h	22	2,15	0,341	2,3	0,317	34,6	0,218	38,47	0,090
T - złoża	5 h	22	4,5	0,479	4,78	0,444	0,48	0,924	0,49	0,922
Q - złoża	2 h		2,53	0,469	3,91	0,271	4,51	0,608	7,41	0,192
Q - złoża	5 h		2,58	0,630	5,17	0,270	14,93	0,011	10,37	0,065

Tabela 2. Weryfikacja hipotez o rozkładzie normalnym i lognormalnym temperatury złoża, powietrza i energii zgromadzonej w złożu przy użyciu testu chi-kwadrat dla prób o liczebności 200 oraz populacji powstałej po odrzuceniu 5% wartości najmniejszych i największych

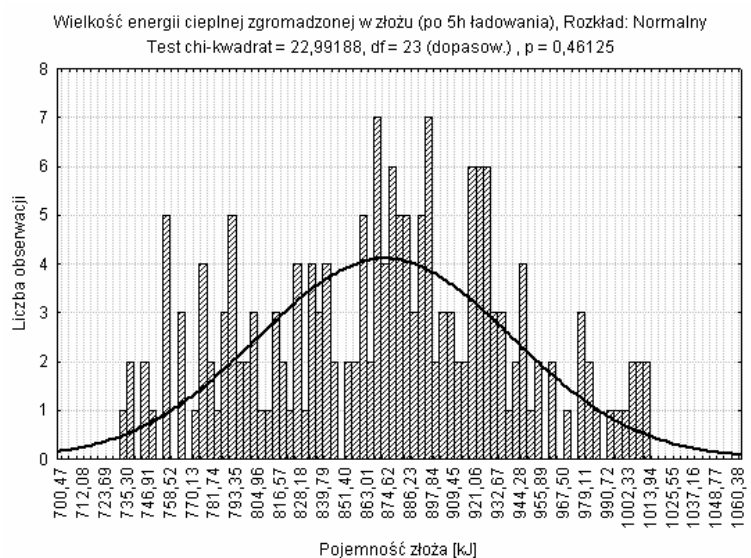
Table 2. Basic statistics of temperature rock-bed air and rock-bed thermal energy including matched distributions for 200 revisions and for rejecting 5% of smallest and biggest values

Wielkość fizyczna (ilość przedziałów)	Czas ładowania	Numer sekcji	Zestawienie rozkładów dla 200 powtórzeń				Zestawienie rozkładów dla 200 powtórzeń po odrzuceniu			
			Rozkład normalny		Rozkład lognormalny		Rozkład normalny		Rozkład lognormalny	
			χ^2	α	χ^2	α	χ^2	α	χ^2	α
T - pow. (9)	2 h	22	1,62	0,804	1,54	0,819	6,92	0,227	6,87	0,231
T - pow. (104)	5 h	22	23,65	0,700	17,08	0,947	22,55	0,658	22,65	0,652
T - złoża (11)	2 h	42	2,52	0,284	3,13	0,209	4,52	0,606	14,57	0,042
T - złoża (42)	5 h	42	11,81	0,857	12,78	0,804	19,97	0,713	14,50	0,805
Q - złoża (15)	2 h		4,28	0,639	9,14	0,166	10,35	0,323	12,59	0,182
Q - złoża (93)	5 h		33,32	0,187	36,52	0,130	22,99	0,461	31,12	0,150



Rys. 3. Histogram temperatury złoża 42 sekcji akumulatora wraz z dopasowanym rozkładem normalnym (5h procesu ładowania)

Fig. 3. Bar-chart of air temperature of 42 section rock-bed storage including matched lognormal distribution (5 hours charging)



Rys. 4. Histogram energii cieplnej złoża i dopasowany do niego rozkład normalny

Fig. 4. Bar-chart of rock-bed thermal energy with matched normal distribution

Podsumowanie

Symulacja komputerowa w połączeniu z przeprowadzoną analizą statystyczną pozwoliły na sformułowanie następujących uwag i wniosków:

1. Rozbudowa systemu informatycznego o moduł dostarczający dane do obróbki stochastycznej upraszcza i przyspiesza analizę statystyczną wielkości fizycznych opisujących proces ładowania kamiennego regeneratora.
2. Testowanie hipotez o prognozowanym rozkładzie normalnym lub lognormalnym temperatury powietrza, złoża i pojemności, po zwiększeniu liczebności prób do 200 przy użyciu testu chi-kwadrat, nadal nie dają podstaw (na poziomie istotności 0,05) do odrzucenia żadnej z nich.
3. Zbliżone wyniki testowania hipotez uzyskano przeprowadzając je na zbiorach, z których odrzucono 5% wartości najmniejszych i największych.

Bibliografia

Benjamin J. R., Cornell C. A. 1977. Rachunek prawdopodobieństwa, statystyka matematyczna i teoria decyzji dla inżynierów. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.

Mueller W. 2005. Identyfikacja losowych rozkładów parametrów cieplnych złoża, będących konsekwencją probabilistycznego charakteru procesu ładowania kamiennego akumulatora ciepła. Inżynieria Rolnicza 8 (68), Warszawa.

Mueller W., Kujawa S., Weres J. 2003. Losowość temperatury w procesie ładowania kamiennego akumulatora energii cieplnej. Inżynieria Rolnicza 12 (54), Warszawa.

Michczyński A. 2001. Metody analizy danych pomiarowych – http://www.carbon14.pl/~adam/Dydaktyka/MAT_FIZ/MADP/index_madp.html

Kala R. 1999. Elementy wnioskowania parametrycznego dla przyrodników. Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Poznań.

**COMPUTER SYSTEM ASSISTING IDENTIFICATION
OF RANDOM DISTRIBUTION OF THE THERMAL PARAMETERS
OF STONE REGENERATOR**

Summary

The processes of acquiring and collecting the thermal energy which comes from unconventional sources, cooperating with stone regenerators are probabilistic. The reasons for this phenomena are: the random characteristic of the mentioned energy sources on the one hand and a stochastic structure of the regenerator on the other. The probabilistic character of the phenomena was taken into account along with the construction of the application which projects the phase winding of loading of the stone regenerator. The produced computer system enables to conduct the simulation which identifies the amount of the energy collected in the stone bed, the temperature of air and of the stones along the bed. Because of the need to carry out a farther statistic analysis for the specification of the probabilistic features of the mentioned quantities, an indispensable expansion of the system was done. The designed and produced computer system allows for the specific number of the repetitions of the simulation, essential for the statistic analysis and record of the results in the form accepted by Statistica programme. That allowed for the identification of the distribution of the random thermodynamic parameters which characterise the process of loading the stone regenerator.

Key words: stone regenerator, thermal energy storage, probabilistic model