

## **AUTOMATYZACJA OBLICZEŃ PARAMETRÓW SYSTEMU WYKORZYSTUJĄCEGO CYKLICZNOŚĆ PRACY URZĄDZENIA**

Maciej Sporysz, Sławomir Kurpaska

*Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** W pracy zaprezentowano narzędzie umożliwiające pełną automatyzację obliczeń parametrów pracy systemu ogrzewania tunelu foliowego za pomocą pompy ciepła. Dane były monitorowane i archiwizowane przez Komputerowy System Pomiarowy zainstalowany w obiekcie doświadczalnym mieszczącym się na terenie Wydziału Agrotechnologii Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Aplikacja pozwala na wyznaczenie długości cyklu pracy pompy ciepła, tj. czasu ładowania i rozładowywania zbiornika buforowego, ilości ciepła pozyskanej z poziomych i pionowych wymienników ciepła w każdej z zainstalowanych konfiguracji, a także na określenie średniej temperatury wewnątrz tunelu foliowego, temperatury otoczenia, prędkości wiatru i natężenia promieniowania słonecznego.

**Słowa kluczowe:** tunel foliowy, pompa ciepła, automatyzacja obliczeń, gruntowe wymienniki ciepła

### **Wstęp**

Jednym z najważniejszych czynników plonotwórczych w produkcji szklarniowej jest temperatura wewnątrz obiektu. To ona wpływa na właściwy rozwój uprawianych roślin, a co za tym idzie na ilość, jakość oraz termin zbioru. Na zmiany temperatury powietrza wewnątrz szklarni wpływ ma wiele czynników klimatycznych – natężenie promieniowania słonecznego, wilgotność powietrza, prędkość wiatru. Aby zapewnić optymalną temperaturę dla rozwoju roślin, w okresie zapotrzebowania na ciepło, w niektórych obiektach ogrodniczych instaluje się systemy ogrzewania umożliwiające sterowanie mikroklimatem szklarni. Przykładem tego typu rozwiązań jest instalowanie pompy ciepła wraz z regulatorami przepływu czynnika roboczego w układzie ogrzewania. W literaturze istnieje szereg doniesień wyników badań omawiające efekty energetyczne oraz efektywność pracy pompy ciepła. Xu i wsp. [2006] analizowali efekty energetyczne pompy ciepła, w której jako dolne źródło ciepła wykorzystano powietrze atmosferyczne podgrzewane w płaskich kolektorach cieczowych. Huang i Lee [2004] na podstawie wieloletnich badań określili zużycie energii elektrycznej wykorzystywanej do napędu pompy ciepła. Wyliczenia zostały przeprowadzone w odniesieniu do jednostkowego przyrostu temperatury cieczy zgromadzonej w zbiorniku buforowym pompy ciepła.

Kaygusuz i Ayhan [1999] opisali i analizowali system współpracy pompy ciepła (jako dolne źródło wykorzystane zostało powietrze atmosferyczne) z górnym, w którym energia magazynowana była w akumulatorze wypełnionym ciałem podlegającym przemianie fazowej. Określili współczynnik efektywności pracy (COP) systemu. Nagano i in. [2006] opracowali nowatorski system do wizualizacji i analizy efektywności pracy pompy ciepła, w której jako dolne źródło wykorzystano wymiennik gruntowy.

Kaygusuz [1995] przeprowadził badania symulacyjne dla systemu, w którym dolne źródło ciepła pobierało energię powstałą z konwersji promieniowania słonecznego w powietrznych kolektorach słonecznych, zaś pompa ciepła współpracowała z akumulatorem wypełnionym ciałem stałym podlegającym przemianie fazowej.

Przeprowadzenie całościowej analizy pracy pompy ciepła wymaga przeanalizowania poszczególnych cykli jej pracy, bowiem istota jej działania składa się z występujących po sobie naprzemian etapów: cyklu ładowania zbiornika magazynującego ciepło oraz cyklu jego rozładowania. Zmiany w długości każdego z nich mają charakter stochastyczny, zależą od wielu różnych czynników, zatem trudno jest przewidzieć jego długość. Określenie zależności pomiędzy długością pełnego cyklu pracy pompy ciepła (łącznie czas ładowania i rozładowywania pompy) a warunkami otoczenia pozwoli na właściwy dobór pompy ciepła (mocy grzewczej) do obiektu. Do określenia takich zależności niezbędne są specjalistyczne stanowiska badawcze. Jednym z nich jest obiekt zlokalizowany na terenie Wydziału Agrotechnologii Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, szczegółowo opisany w pracy Kurpaski i Sporysza [2007].

Rozwój nowoczesnych technologii pozwala na monitorowanie procesów zachodzących w środowisku z dowolną częstotliwością. Ten ciągły odczyt i zapis danych powoduje jednakże, dzięki nagromadzeniu ogromnej ilości danych, problem z ich dalszą analizą. Istnieje, więc konieczność wypracowania mechanizmów i efektywnych narzędzi służących do automatyzacji obliczeń wybranych parametrów. Stąd głównym celem pracy jest opracowanie efektywnego narzędzia służącego do automatycznej analizy pracy pompy ciepła ogrzewającej powietrze w tunelu foliowym.

## **Materiał i metoda**

Przedmiotem analizy był system ogrzewania, w którym zainstalowano pompę ciepła w ogrzewanym obiekcie (tunel foliowy) zlokalizowanym w obiektach Wydziału Agrotechnologii UR w Krakowie. Dzięki komputerowemu systemowi monitorowania i archiwizacji danych możliwe było śledzenie zmian kilkudziesięciu parametrów pracy pompy ciepła w sposób niemalże ciągły (częstotliwość zapisu została ustalona zgodnie z twierdzeniem Shanonna na 30s - w ciągu doby dysponowano 2880 pomiarami). Mierzonymi i zapisywanymi wielkościami były m.in.:

- parametry otaczającego klimatu i mikroklimatu wewnątrz obiektu (temperatura, natężenie promieniowania słonecznego, prędkość wiatru);
- temperatura czynników obiegowych (woda w instalacji systemu ogrzewania, czynnik obiegowy w elementach dolnego i górnego źródła ciepła pompy ciepła);
- strumienie przepływających czynników (woda, powietrze) w instalacji doprowadzającej ciepło do wnętrza obiektu;

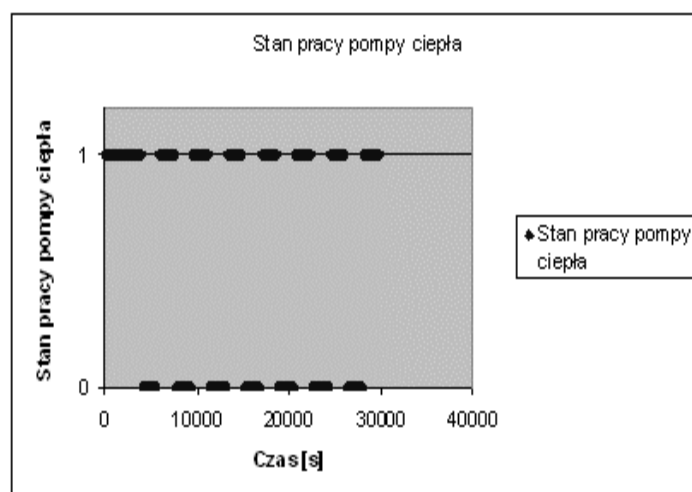
- stan pracy pompy ciepła;
- temperatury gruntu w zróżnicowanej konfiguracji przestrzennej.

Zainstalowane w obiekcie czujniki monitorujące stan pracy pompy ciepła (ładowanie, rozładowanie zbiornika buforowego), współpracujące z Komputerowym Systemem Pomiarowym (KSP) generowały zróżnicowaną wartość napięcia prądu. Napięcie  $U_1$  oznaczało pracę pompy ciepła, natomiast napięcie  $U_2$  utożsamiało czas przerwy między kolejnymi cyklami pracy (regeneracja ośrodka). Oczywiście napięcia te ulegały wahaniom, zatem by program komputerowy mógł odczytać i właściwie określić stan pracy pompy ciepła przyjęto zasadę, iż napięcie większe niż  $U_1$  określa stan spoczynku (0), w przeciwnym wypadku pompa ciepła pracowała (1). W implementacji komputerowej zapisano to w postaci:

```

Public Function stan_pompy(i)
  If napiecie(i) > U1 Then
    stan_pompy = 0
  Else
    stan_pompy = 1
  End If
End Function

```



Rys. 1. Stan pracy pompy ciepła w poszczególnych jednostkach czasowych  
 Fig. 1. Heat pump operating status in individual time units

Okres pracy pompy jak i jej rozładowania w ciągu doby był zróżnicowany (rys. 1). Wobec tego kolejnym zadaniem aplikacji było określenie długości cykli pracy pompy ciepła. W tym celu program porównuje różnicę stanów pracy pompy ciepła w kolejnych krokach czasowych.

```

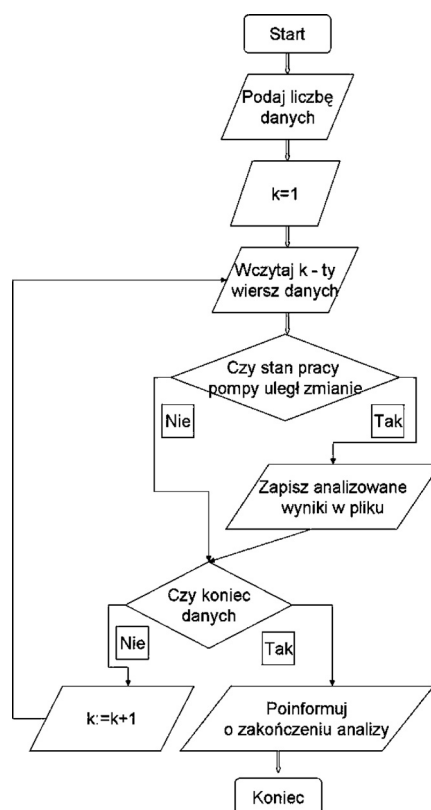
Public Function koniec_cyklus(i)
    koniec_cyklus = stan_pompy(i - 1) - stan_pompy(i)
End Function

```

Tak określona zmienna „koniec\_cyklus” może przyjąć jedną spośród trzech wartości:

- 1 – pompa ciepła zaczyna pobierać ciepło z gruntu;
- 0 – pompa jest w tym samym stanie co poprzednio;
- 1 – pompa przechodzi w stan rozładowania.

Do momentu zakończenia pełnego cyklu pracy pompy ciepła program sumuje liczbę jednostek ładowania i rozładowywania zbiornika buforowego, ilości ciepła pozyskanej z pionowych oraz poziomych wymienników ciepła w każdej z badanych konfiguracji. Informuje także o średniej temperaturze wewnątrz i na zewnątrz obiektu, średniej prędkości wiatru oraz średnim natężeniu promieniowania słonecznego. Schemat jego działania przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Algorytm programu do automatyzacji obliczeń  
 Fig. 2. Algorithm of an application for computing automation

## Automatyzacja obliczeń parametrów...

Ilość odebranego ciepła w kroku czasowym jest wyznaczona na podstawie standardowej zależności w postaci:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (t_z - t_p) dt \quad (1)$$

gdzie:

- $m$  – strumień przepływającego czynnika [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ],
- $t_z, t_p$  – temperatura zasilania i powrotu czynnika grzejjego [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- $dt$  – krok czasowy [s].

## Wyniki i dyskusja

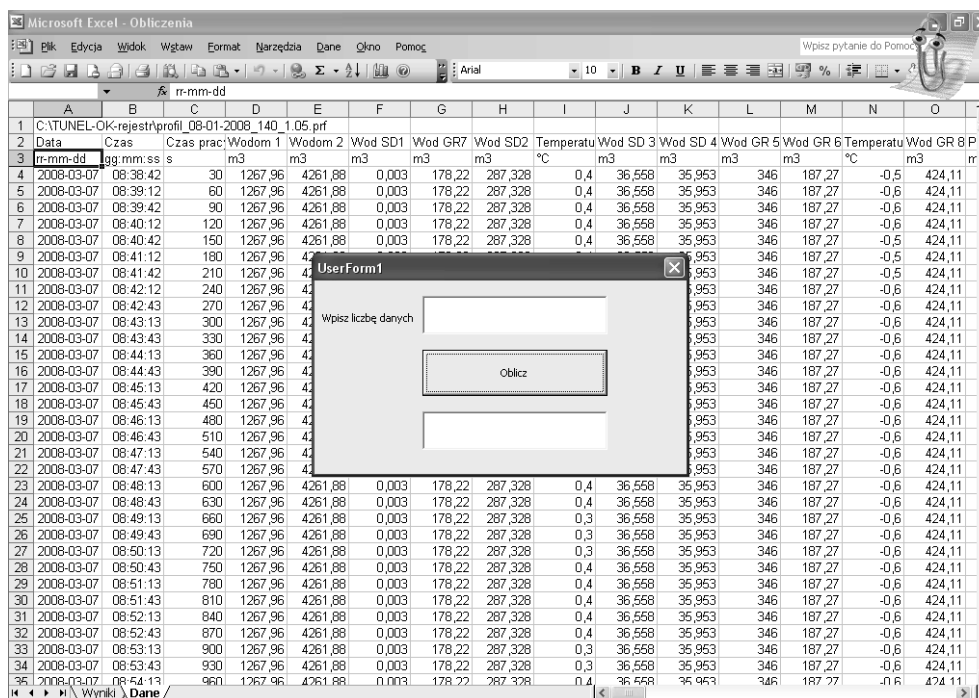
Na rys. 3. przedstawiono przykładowy plik z danymi zapisanymi przez Komputerowy System Pomiarowy. W tym pliku rejestrowano i archiwizowano parametry mierzone w dniach 7-10 marca 2008 roku. Łącznie w pliku zarchiwizowanych zostało 8702 wierszy reprezentujących kolejne kroki czasowe. Każdy wiersz składał się z kilkudziesięciu wielkości, m.in. wskazań wodomierzy oraz temperatury czynników roboczych, temperatury powietrza zewnętrznego, wewnętrznego, temperatury gruntu w różnych punktach pomiarowych, natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru, stanu pracy pompy itp.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
2	Data	Czas	Czas prac	Wodom 1	Wodom 2	Wod SD1	Wod GR7	Wod SD2	Temperatu	Wod SD 3	Wod SD 4	Wod GR 5	Wod GR 6	Temperatu	Wod GR 8 P
3	rr-mm-dd	gg:mm:ss	s	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	°C	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	°C	m <sup>3</sup>
4	2008-03-07	08:38:42	30	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,5	424,11
5	2008-03-07	08:39:12	60	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
6	2008-03-07	08:39:42	90	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
7	2008-03-07	08:40:12	120	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
8	2008-03-07	08:40:42	150	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,5	424,11
9	2008-03-07	08:41:12	180	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,5	424,11
10	2008-03-07	08:41:42	210	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,5	424,11
11	2008-03-07	08:42:12	240	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
12	2008-03-07	08:42:43	270	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
13	2008-03-07	08:43:13	300	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
14	2008-03-07	08:43:43	330	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
15	2008-03-07	08:44:13	360	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
16	2008-03-07	08:44:43	390	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
17	2008-03-07	08:45:13	420	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
18	2008-03-07	08:45:43	450	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
19	2008-03-07	08:46:13	480	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
20	2008-03-07	08:46:43	510	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
21	2008-03-07	08:47:13	540	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
22	2008-03-07	08:47:43	570	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
23	2008-03-07	08:48:13	600	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
24	2008-03-07	08:48:43	630	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
25	2008-03-07	08:49:13	660	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
26	2008-03-07	08:49:43	690	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
27	2008-03-07	08:50:13	720	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
28	2008-03-07	08:50:43	750	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
29	2008-03-07	08:51:13	780	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
30	2008-03-07	08:51:43	810	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
31	2008-03-07	08:52:13	840	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
32	2008-03-07	08:52:43	870	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
33	2008-03-07	08:53:13	900	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
34	2008-03-07	08:53:43	930	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,3	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11
35	2008-03-07	08:54:13	960	1267,96	4261,88	0,003	178,22	287,328	0,4	36,558	35,953	346	187,27	-0,6	424,11

Rys. 3. Plik danych poddanych analizie

Fig. 3. File containing data subject to analysis

Po uruchomieniu aplikacji należy podać liczbę wierszy do wczytania, a następnie wciśnąć przycisk "Oblicz" (rys. 4). Program tworzy arkusz „Wyniki”, w którym zapisuje obliczone parametry pracy systemu ogrzewania tunelu foliowego za pomocą pompy ciepła.



Rys. 4. Okno programu  
Fig. 4. Application window

O zakończeniu obliczeń program informuje nas w oknie dialogowym (rys. 5). Na rys. 5. w kolumnie „A” przedstawiona jest długość ładowania pompy ciepła, „B” – rozładowywania zbiornika buforowego. W analizowanym przypadku otrzymano 47 cykli pracy. Średnia długość ładowania zbiornika buforowego pompy ciepła to 52 (26 min), zaś średnia długość rozładowywania to 132 (66 min). Można zauważyć, że w przedstawionym okresie pracowały tylko wymienniki poziome (w czterech różnych konfiguracjach - GR5, GR6, GR7, GR8 – kolumny „C-F”), natomiast wymienniki pionowe (SD1, SD2, SD3, SD4 – kolumny „G-J”) pozostawały wyłączone.

## Automatyzacja obliczeń parametrów...

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	Ladowanie pompy	Rozładowanie	GR5	GR6	GR7	GR8	SD1	SD2	SD3	SD4	WODOM1	WODOM2	Pierwotne	Wtórne	Śr wiatr	Śr prc	
2		93	184800	115500	269500	111650	0	0	0	0	0	0	14387450	19458360	0,758065	245,84	
3	62	690	1070300	865500	1513050	1232000	0	0	0	0	0	0	14196800	15892670	0,925315	358,58	
4	138	53	1951950	1035650	1466850	2594900	0	0	0	0	0	0	28513100	38351070	0,375393		
5	64	80	446600	369600	806500	656350	0	0	0	0	0	0	15900500	22093670	0,262903		
6	61	64	392700	450450	970200	523600	0	0	0	0	0	0	15365350	21658110	0,4384		
7	61	63	373450	411950	843150	515900	0	0	0	0	0	0	15136200	21461180	0,521774		
8	62	62	269600	481250	877800	404250	0	0	0	0	0	0	15142050	21402520	0,367742		
9	62	62	331100										0	15434650	21691630	0,231452	
10	62	61	458150										0	15484700	21431850	0,119512	
11	64	59	458150										0	15750350	21582690	0,10813	0,004
12	63	59	569600										0	15500100	21364810	0,102459	
13	64	58	600600										0	15996750	22056160	0,131148	
14	64	59	646800										0	16104550	22005680	0,24878	
15	64	58	666050										0	15796550	21905320	0,117213	
16	65	59	635250										0	16431800	22072920	0,104839	10,72
17	62	64	331100										0	15769600	20841060	0,45	76,6
18	59	801	1074150										0	14626150	9930300	1,543837	203,2
19	74	91	9740500										0	27165600	2136900	0,656897	14,93
20	52	93	6776000										0	23958550	1780750	0,386897	
21	50	97	6564250										0	24335850	1851980	0,152381	
22	47	98	6352500										0	23958550	1709520	0,1	
23	48	97	6564250	423500	6699000	931700	0	0	0	0	0	0	0	24147200	1923210	0,1	
24	48	96	6352500	331100	6699000	889350	0	0	0	0	0	0	0	23769900	1780750	0,10625	
25	49	98	6564250	346500	6922300	827750	0	0	0	0	0	0	0	24335850	1780750	0,1	
26	49	90	6564250	442750	6699000	469700	0	0	0	0	0	0	0	23015300	1994440	0,100719	
27	54	94	7199500	592900	7592200	369600	0	0	0	0	0	0	0	24713150	2066670	0,100676	
28	55	90	7199500	793100	7592200	450450	0	0	0	0	0	0	0	23958550	2208130	0,112414	
29	60	88	8046500	820050	8262100	639100	0	0	0	0	0	0	0	24335850	2350590	0,1	0,137
30	61	86	8046500	989450	8485400	712250	0	0	0	0	0	0	0	24335850	2350590	0,1	0,006
31	40	414	5293750	700700	5805800	519750	0	0	0	0	0	0	0	65838850	925990	0,210793	144,0
32	36	827	4893350	646800	4916450	839300	0	0	0	0	0	0	0	16239300	385480	1,178563	343,1
33	62	78	9159150	1012500	8858850	1443750	0	0	0	0	0	0	0	53545800	3276580	1,135714	0,304
34	61	88	8924300	338800	8631700	820050	0	0	0	0	0	0	0	57057000	3469320	0,512081	
35	58	88	8454600	323400	8177400	600600	0	0	0	0	0	0	0	55740300	3652060	0,404795	

Rys. 5. Plik z wynikami analizy

Fig. 5. File with analysis results

## Podsumowanie

Opracowany program komputerowy oblicza w sposób szybki i efektywny długość ładowania i rozładowywania pompy oraz ilość ciepła odzyskanego z poszczególnych wymienników ciepła w każdym z cykli. Ponadto, wylicza również inne istotne wielkości, przykładowo: średnią temperaturę na zewnątrz obiektu oraz wewnątrz tunelu foliowego, a także średnie natężenie promieniowania słonecznego i średnią prędkość wiatru. Po zastosowaniu pewnych modyfikacji może również służyć obliczaniu innych parametrów, jak chociażby wydajności cieplnej grzejników w ogrzewanych obiektach, analizy kotłów w tradycyjnych systemach grzewczych, czy systemów chłodniczych w przechowalniach.

## Bibliografia

- Huang B. J., Lee C. P. 2004. Long-term performance of solar-assisted heat pump water heater. Renewable Energy 29(4). s. 633-639.
- Kaygusuz K. 1995. Performance of solar-assisted heat-pump systems. Applied Energy 51(2). s. 93-109.
- Kaygusuz K., Ayhan T. 1999. Experimental and theoretical investigation of combined solar heat pump system for residential heating. Energy Conversion and Management 40(13). s. 1377-1396.

- Kurpaska S., Sporysz M.** 2007. Stanowisko do analizy pracy pomp ciepła wykorzystywanych do ogrzewania tuneli foliowych. Inżynieria Rolnicza. Nr 9(97). Kraków. s. 119-125.
- Nagano K., Katsura T., Takeda S.** 2006. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system. Applied Thermal Engineering 26(14-15). s. 1578-1592.
- Xu G., Zhang A., Deng S.** 2006. Simulation study on the operating performance of a solar-air source heat pump water heater. Applied Thermal Engineering 26 (11-12). s. 1257-1265.

## **AUTOMATION OF COMPUTING PARAMETERS IN A SYSTEM USING EQUIPMENT OPERATION PERIODICITY**

**Abstract.** The paper presents the tool allowing to fully automate computing of work parameters for foil tunnel heating system using heat pump. The data was monitored and archived by the Computer Measuring System installed in an experimental facility at the Faculty of Agricultural Engineering, University of Agriculture in Krakow. The application allows to determine heat pump work cycle duration, that is time required for buffer tank filling and discharge, heat volume acquired from horizontal and vertical heat exchangers in each of the installed configurations, and to specify average temperature inside foil tunnel, ambient temperature, wind velocity and solar radiation intensity.

**Key words:** foil tunnel, heat pump, computing automation, ground heat exchangers

**Adres do korespondencji:**

Maciej Sporysz; e-mail: sporysz\_mac@poczta.onet.pl  
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 116B  
30-149 Kraków