



## Symulacja pracy systemów z kolektorami słonecznymi dla rzeczywistych danych meteorologicznych

WIKTOR OLCHOWIK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych,  
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, wiktur.olchowik@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Artykuł dotyczy analizy efektywności energetycznej systemów z kolektorami solarnymi stosowanymi do podgrzewania ciepłej wody użytkowej. Nowatorskie podejście polega na analizie wartości chwilowych przepływu ciepła dla rzeczywistych nieuśrednionych danych meteorologicznych. Daje to możliwość uzyskania bardziej dokładnych wyników oraz dodatkowo informacji wynikających z przebiegów czasowych parametrów roboczych. W artykule omówiono metodologię analizy oraz zależności matematyczne i algorytm zastosowany do obliczeń. W końcowej części przedstawiono przykładowe wyniki analizy dla danych z lat 2013-2015 uzyskanych przez stację meteorologiczną położoną w centrum województwa mazowieckiego.

**Słowa kluczowe:** energia z zasobów odnawialnych, kolektory słoneczne, efektywność energetyczna  
**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.1888

### 1. Wstęp

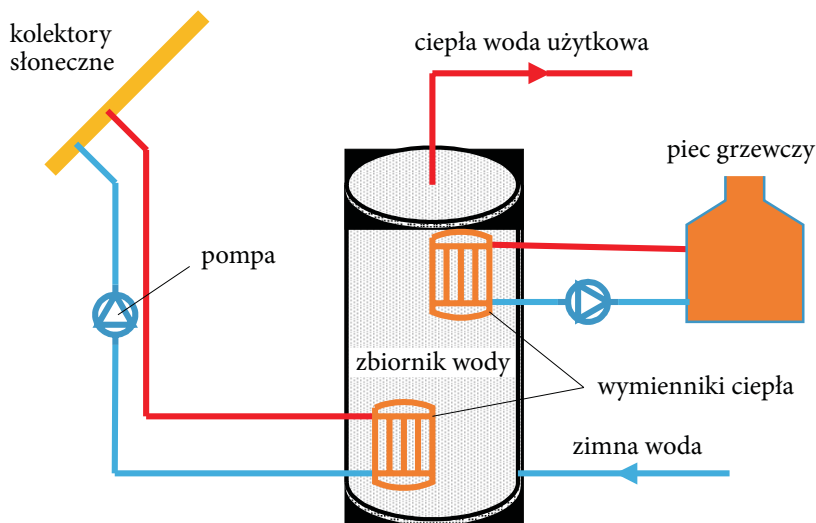
Systemy solarne do podgrzewania ciepłej wody użytkowej są efektywnym i powszechnie stosowanym odnawialnym źródłem energii. Dostarczane ciepło zmniejsza odpowiednio konieczność jego wytwarzania z innych źródeł, co przyczynia się także do obniżenia zanieczyszczenia środowiska. Dlatego instalacja kolektorów słonecznych często jest dotowana z funduszy publicznych. Powstało więc zapotrzebowanie na wspomaganie decyzji w procesie inwestycyjnym i w efekcie pojawiło się dużo źródeł literaturowych i internetowych poświęconych tej tematyce, (np. [2, 3, 4]) oraz programy komputerowe. Najbardziej zaawansowane [6] realizują bardzo dużo funkcji przydatnych dla inwestorów i projektantów, w tym szacowanie efektywności energetycznej i ekonomicznej dla różnych lokalizacji. Programy te bazują jednak na

uśrednionych w skali miesięcy danych meteorologicznych i eksploatacyjnych. Przy znaczących wahaniami wartości tych parametrów powstają istotne niedokładności w obliczeniach. Można to wyeliminować poprzez zastosowanie symulacji pracy systemów solarnych dla rzeczywistych historycznych danych meteorologicznych. Ponadto symulacja w funkcji czasu pozwala uzyskać przebiegi procesów zachodzących w systemie solarnym dające nowe możliwości analizy.

## 2. System solarny

Podstawowe elementy zestawu solarnego do podgrzewania wody użytkowej (rys. 1):

- kolektory słoneczne,
- zbiornik ciepłej wody z wymiennikami ciepła,
- orurowanie z płynem roboczym do wymiany ciepła,
- pompy i urządzenie sterujące,
- dopływ zimnej wody i ujęcie ciepłej wody.



Rys. 1. Podstawowy schemat systemu solarnego do podgrzewania ciepłej wody

Dodatkowo na ogół występuje piec dogrzewający wodę wraz z orurowaniem oraz inne urządzenia wspomagające.

Działanie systemu solarnego do podgrzewania wody polega na nagrzewaniu płynu w kolektorach słonecznych i podgrzewaniu wody w zbiorniku za pośrednictwem wymiennika ciepła (np. węzownicy). Do procesu wymiany ciepła niezbędny

jest wymuszony za pomocą pompy obieg płynu, przy czym pompa jest włączana i wyłączana w zależności od relacji pomiędzy temperaturą płynu i temperaturą wody w zbiorniku. Woda ciepła ze zbiornika jest pobierana przez użytkowników z określoną intensywnością. Jeśli temperatura wody pobieranej w zbiorniku jest niższa niż zadana, to jest ona dodatkowo podgrzewana przez piec. Na miejsce wody pobranej dopływa zimna woda z sieci wodociągowej.

### 3. Procesy zachodzące w systemie solarnym

Podstawowe procesy fizyczne zachodzące w systemach solarnych do podgrzewania wody istotne z punktu widzenia efektywności energetycznej to:

- podgrzewanie płynu w kolektorach przez promieniowanie słoneczne — absorpcja energii słonecznej w kolektorach,
- przenikanie ciepła pomiędzy płynem w kolektorach i otoczeniem — straty ciepła w kolektorach,
- przenikanie ciepła pomiędzy płynem w rurach łączących kolektor ze zbiornikiem i otoczeniem — straty ciepła w orurowaniu,
- przenikanie ciepła pomiędzy płynem i wodą w zbiorniku ciepłej wody — podgrzewanie ciepłej wody za pomocą wymiennika ciepła (na ogół tzw. węzownica),
- przenikanie ciepła pomiędzy ciepłą wodą i otoczeniem — straty ciepła w zbiorniku,
- wymiana ciepłej wody pobieranej przez użytkowników na zimną z sieci wodociągowej.

W celu wykonania symulacji numerycznej każdy z powyższych procesów musi być opisany zależnością matematyczną. Ponieważ oznaczenia we wzorach powtarzają się wielokrotnie, dla ułatwienia przedstawione zostaną na wstępie:

- $I_s$  — natężenie całkowite promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora ( $W/m^2$ ),
- $I_b$  — natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektora ( $W/m^2$ ),
- $I_{bp}$  — natężenie bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni ziemi ( $W/m^2$ ),
- $I_r$  — uogólnione natężenie rozproszonego promieniowania słonecznego ( $W/m^2$ ),
- $I_{ri}$  — natężenie rozproszonego izotropowego promieniowania słonecznego ( $W/m^2$ ),
- $I_{ro}$  — natężenie rozproszonego okołosłonecznego promieniowania słonecznego ( $W/m^2$ ),

- $I_{rh}$  — natężenie rozproszonego jaśniejącego horyzontu promieniowania słonecznego ( $W/m^2$ ),  
 $I_o$  — natężenie odbitego promieniowania słonecznego ( $W/m^2$ ),  
 $I_{sp}$  — pomierzone natężenie całkowite promieniowania słonecznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni ziemi ( $W/m^2$ ),  
 $I_{spt}$  — teoretyczne natężenie promieniowania na płaszczyznę równoległą docierające do powierzchni ziemi przy bezchmurnym niebie ( $W/m^2$ ),  
 $\beta$  — kąt nachylenia kolektorów do powierzchni ziemi ( $^\circ$ ),  
 $\phi$  — szerokość geograficzna ( $^\circ$ ),  
 $\delta$  — deklinacja,  
 $\omega$  — azymut słońca ( $^\circ$ ),  
 $D$  — liczba dni liczona od przesilenia zimowego,  
 $\Delta Q_s$  — energia optyczna uzyskana z apertury kolektora w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_n$  — energia wymiany ciepła w węzownicy w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_a$  — ciepło tracone w aperturze kolektorów w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_r$  — ciepło tracone w orurowaniu w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_z$  — energia strat w zbiorniku w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_p$  — zmiana ciepła płynu chłodzącego w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_w$  — zmiana ciepła wody w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_{wc}$  — przyrost energii wody ciepłej użytkowej pobranej ze zbiornika w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $\Delta Q_g$  — ciepło dostarczone przez piec w czasie  $\Delta t$  (J),  
 $P_s$  — moc optyczna apertury kolektora (W),  
 $P_n$  — moc cieplna węzownicy (W),  
 $P_a$  — moc strat w aperturze kolektorów (W),  
 $P_r$  — moc strat w rurach (W),  
 $P_z$  — moc strat zbiornika (W),  
 $\Delta t$  — okres czasu (s),  
 $S_a$  — powierzchnia apertury kolektora ( $m^2$ ),  
 $S_r$  — powierzchnia rur ( $m^2$ ),  
 $S_z$  — powierzchnia zbiornika ( $m^2$ ),  
 $\eta_a$  — sprawność energetyczna apertury kolektora,  
 $\alpha_n$  — współczynnik przepływu ciepła w węzownicy (W/K),  
 $\alpha_{a1}$  — współczynnik strat ciepła w aperturze kolektorów (liniowy) ( $W/m^2K$ ),  
 $\alpha_{a2}$  — współczynnik strat ciepła w aperturze kolektorów (kwadratowy) ( $W/m^2K^2$ ),  
 $\alpha_r$  — współczynnik strat ciepła w rurach ( $W/m^2K$ ),  
 $\alpha_z$  — współczynnik strat ciepła w zbiorniku ( $W/m^2K$ ),  
 $T_p$  — temperatury płynu roboczego ( $^\circ C$ ),

- $T_w$  — temperatura wody w zbiorniku ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_o$  — temperatury otoczenia zewnętrznego ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{oz}$  — temperatura otoczenia zbiornika ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{wc}$  — ustalona temperatura wody ciepłej pobranej ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_{wz}$  — temperatura wody zimnej wpływającej do zbiornika ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $\Delta T_p$  — zmiana temperatury płynu chłodzącego (K),  
 $\Delta T_w$  — zmiana temperatury wody (K),  
 $T_p(t)$  — temperatura płynu roboczego w chwili  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_p(t + \Delta t)$  — temperatura płynu roboczego po czasie  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_w(t)$  — temperatura wody w zbiorniku w chwili  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $T_w(t + \Delta t)$  — temperatura wody w zbiorniku po czasie  $\Delta t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),  
 $m_p$  — masa płynu roboczego (kg),  
 $m_w$  — masa wody w zbiorniku (kg),  
 $m_{wc}$  — masa wody ciepłej pobranej (kg),  
 $c_p$  — ciepło właściwe płynu roboczego (J/kg K),  
 $c_w$  — ciepło właściwe wody (J/kg K),  
 $X_n$  — wskaźnik włączenia pompy,  
 $X_{wc}$  — wskaźnik temperatury wody,  
 $Q_g(t)$  — ciepło uzyskane z pieca do czasu  $t$  (kWh),  
 $Q_g(t+\Delta t)$  — ciepło uzyskane z pieca do czasu  $t+\Delta t$  (kWh),  
 $Q_{wc}(t)$  — ciepło uzyskane z systemu solarnego do czasu  $t$  (kWh),  
 $Q_{wc}(t+\Delta t)$  — ciepło uzyskane z systemu solarnego do czasu  $t+\Delta t$  (kWh).

Przy opracowaniu zależności matematycznych wykorzystane zostały literaturowe materiały źródłowe, szczególnie [1, 2, 5], oraz opracowania własne.

Proces absorpcji energii słonecznej w kolektorach można opisać równaniem (1):

$$\Delta Q_s = P_s \cdot \Delta t = I_s \cdot \eta_a \cdot S_a \cdot \Delta t. \quad (1)$$

Procesy przenikania ciepła na ogół są złożone i odbywają się z jednoczesnym ruchem płynów. Ponadto przenikanie ciepła pomiędzy płynem w kolektorach i otoczeniem może występować przy znacznej różnicy temperatur i zauważalna jest nieliniowa zależność. Straty ciepła w kolektorach można w przybliżeniu określić zależnością (2):

$$\Delta Q_a = P_a \cdot \Delta t = S_a \cdot \left[ \alpha_{a1} \cdot (T_p - T_o) + \alpha_{a2} \cdot (T_p - T_o)^2 \right] \cdot \Delta t. \quad (2)$$

Straty ciepła w rurach w uproszczeniu opisujemy równaniem (3).

$$\Delta Q_r = P_r \cdot \Delta t = \alpha_r \cdot S_r \cdot (T_2 - T_1) \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Przy czym tracone ciepło w orurowaniu będzie dla czterech wariantów temperatur  $T_2$  i  $T_1$ . Płyn roboczy przepływający w rurze od apertury do zbiornika będzie miał temperaturę  $T_2 = T_p$ , a w rurze powrotnej w przybliżeniu równą temperaturze wody  $T_2 = T_w$ . Natomiast temperatura otoczenia rury  $T_1$  będzie równa temperaturze otoczenia  $T_o$  na odcinku otwartym na zewnątrz budynku, a w przybliżeniu równa  $T_{oz}$  wewnątrz budynku.

Wymianę ciepła w wężownicy określa wyrażenie (4)

$$\Delta Q_n = P_n \cdot \Delta t \cdot X_n = \alpha_n \cdot (T_p - T_w) \cdot \Delta t \cdot X_n. \quad (4)$$

Istotną rolę odgrywa wskaźnik włączenia pompy  $X_n$ , który przyjmuje wartość 1 przy włączonej pompie płynu roboczego lub 0 przy wyłączonej. Zakłada się, że wymiana ciepła za pomocą wężownicy odbywa się tylko przy wymuszonym przepływie płynu. Straty ciepła w zbiorniku przedstawia wyrażenie (5).

$$Q\Delta_z = P_z \cdot \Delta t = \alpha_z \cdot S_z \cdot (T_w - T_{oz}) \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Efektom przenikania ciepła jest zmiana temperatury mediów (płynu roboczego lub wody w zbiorniku). Związane jest to ze zmianą ciepła, którą można opisać odpowiednio równaniami (6) i (7).

$$\Delta Q_p = m_p \cdot c_p \cdot \Delta T_p, \quad (6)$$

$$\Delta Q_w = m_w \cdot c_w \cdot \Delta T_w. \quad (7)$$

Kolejny proces jest związany z poborem wody ciepłej. Założono, że ciepło wody pobranej nie zależy od temperatury. Jeśli temperatura wody w zbiorniku jest wyższa lub równa zadanej temperaturze wody ciepłej  $T_w \geq T_{wc}$ , to woda ciepła pobierana jest automatycznie mieszana z wodą zimną w celu uzyskania zadanej temperatury, a ponadto użytkownik na ogół pobiera wodę o ustalonej przez siebie temperaturze, regulując ją poprzez zmieszanie wody ciepłej z zimną. W związku z tym przy wyższej temperaturze wody w zbiorniku masa wody pobranej będzie proporcjonalnie mniejsza. W tym przypadku woda ze zbiornika pokrywa całość ciepła wody pobranej, czyli cała energia ciepłej wody pobranej została uzyskana za pomocą kolektorów solarnych.

Natomiast jeśli temperatura wody w zbiorniku jest niższa od zadanej temperatury wody ciepłej  $T_w < T_{wc}$ , to pobierana woda jest dodatkowo podgrzewana przez urządzenie grzewcze (np. piec gazowy) do ustalonej temperatury  $T_{wc}$ . Wówczas system solarny pokrywa tylko część ciepła wody pobranej, a resztę ciepła uzyskuje się z innych źródeł.

Uwzględniając powyższe aspekty, energię wody ciepłej pobranej ze zbiornika można obliczyć zgodnie z równaniem (8).

$$\Delta Q_{wc} = m_{wc} \cdot c_w \cdot [(T_{wc} - T_{wz}) - X_{wc} \cdot (T_{wc} - T_w)] \quad (8)$$

Wskaźnik  $X_{wc} = 0$ , jeśli spełniony jest warunek  $T_w \geq T_{wc}$ , w przeciwnym przypadku  $X_{wc} = 1$ .

Ciepło dostarczone przez urządzenie grzewcze oblicza się z zależności (9):

$$\Delta Q_g = m_{wc} \cdot c_w \cdot (T_{wc} - T_w) X_{wc} \quad (9)$$

Podstawowymi wielkościami obliczanymi w trakcie symulacji są temperatura płynu roboczego oraz temperatura wody w zbiorniku. Odpowiednie zależności można wyprowadzić na podstawie bilansów ciepła dla poszczególnych mediów. Przyjmując uproszczony model, który pomija różnicę temperatury oraz ruch płynu, bilans ciepła dla płynu roboczego przedstawia równanie (10):

$$\Delta Q_p = \Delta Q_s - \Delta Q_a - \Delta Q_r - \Delta Q_n \quad (10)$$

Po podstawieniu zależności (1), (2), (3), (4) i (5) i wykonaniu przekształceń otrzymujemy wyrażenie na zmianę temperatury płynu roboczego w czasie  $\Delta t$  określoną zależnością (11):

$$\Delta T_p = \frac{(I_s \cdot \eta_s \cdot A_a - (\alpha_a \cdot A_a + \alpha_r \cdot A_r) \cdot (T_p - T_o) - \alpha_n \cdot A_n \cdot X_n \cdot (T_p - T_w)) \cdot \Delta t}{m_p \cdot c_p} \quad (11)$$

Analogicznie, pomijając zróżnicowanie temperatur w zbiorniku oraz wpływ podgrzewania wody przez piec, bilans ciepła dla wody w zbiorniku można opisać uproszczonym modelem przedstawionym zależnością (12):

$$\Delta Q_w = \Delta Q_n - \Delta Q_z - \Delta Q_{wc} \quad (12)$$

Po podstawieniu wzorów (4), (5), (7) i (8) oraz przekształceniach otrzymujemy wyrażenie na zmianę temperatury płynu roboczego określone zależnością (13):

$$\Delta T_w = \frac{(\alpha_n \cdot A_n \cdot X_n \cdot (T_p - T_w) - \alpha_z \cdot A_z \cdot (T_w - T_{oz})) \cdot \Delta t - m_{wc} \cdot c_w \cdot [(T_{wc} - T_{wz}) - X_{wc} \cdot (T_{wc} - T_w)]}{m_w \cdot c_w} \quad (13)$$

We wzorach (11) i (13) przyjęto ponadto, że w trakcie czasu  $\Delta t$  temperatura drugiego medium pozostaje niezmienna. Nie spowoduje to jednak dużych błędów obliczeniowych dla dostatecznie małych wartości  $\Delta t$ .

Wartość chwilowa temperatury płynu roboczego jest obliczana z równania (14):

$$T_p(t + \Delta t) = T_p(t) + \Delta T_p. \quad (14)$$

Analogicznie wartość chwilowa temperatury wody w zbiorniku jest obliczana z równania (15):

$$T_w(t + \Delta t) = T_w(t) + \Delta T_w. \quad (15)$$

Wartości ciepła wody pobranej uzyskanej z systemu solarnego od początku okresu symulacji są obliczane z równania (16):

$$Q_{wc}(t + \Delta t) = Q_{wc}(t) + \Delta Q_{wc}. \quad (16)$$

Wartości ciepła wody pobranej uzyskanej z dodatkowego źródła ciepła od początku okresu symulacji są obliczane z równania (17):

$$Q_g(t + \Delta t) = Q_g(t) + \Delta Q_g. \quad (17)$$

Powyższe zależności opisują zależności matematyczne umożliwiające wykonanie symulacji, do której niezbędne są dane wejściowe.

#### 4. Dane środowiska systemu solarnego

W celu wykonania modelu do symulacji procesów zachodzących w systemie solarne należy określić energię pozyskiwaną z promieniowania słonecznego, straty ciepła w otoczeniu kolektorów solarne, orurowania i zbiornika oraz ciepło potrzebne do podgrzania wody ciepłej użytkowej. W zawiązku z powyższym niezbędne są dane środowiska (otoczenia), parametry sytemu solarnego oraz parametry poboru wody.

Ze wzorów (11) i (13) wynika, że niezbędne dane środowiska, w którym pracuje system solarne, to:

- natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię kolektorów,
- temperatura otoczenia kolektorów,
- temperatura otoczenia zbiornika z ciepłą wodą,
- temperatura zimnej wody w sieci wodociągowej.



Dane te powinny być pomierzone dla ustalonej lokalizacji i otoczenia systemu solarnego, co w praktyce oznacza wykonanie pomiarów w środowisku konkretnego, funkcjonującego urządzenia. W przypadku symulacji prognozującej efektywność energetyczną różnych wariantów systemów nie jest to możliwe i w związku z tym są odtwarzane na podstawie historycznych danych meteorologicznych dla zadanego rejonu i okresu.

W przypadku braku dostępności wymaganych parametrów można je odtworzyć na podstawie innych danych meteorologicznych. Przybliżoną wartość natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię kolektorów można obliczyć na podstawie promieniowania na płaszczyznę poziomą (równoległą do powierzchni ziemi). Dane o promieniowaniu rozproszonym zwiększają dokładność obliczeń. Temperaturę otoczenia kolektorów, otoczenia zbiornika z ciepłą wodą oraz temperaturę zimnej wody w sieci wodociągowej można prognozować na podstawie temperatury powietrza na poziomie 2 m. Bardziej dokładnie temperaturę zimnej wody można obliczyć, dysponując dodatkowo pomiarami temperatury gruntu.

Istotna jest także częstotliwość pomiarów parametrów meteorologicznych. Do odtworzenia dobowych przebiegów wskazane jest dysponowanie danymi pomierzonymi nie rzadziej niż co godzinę. Lepszą jakość analizy uzyska się, jeśli pomiary zostały wykonane częściej, np. co 10 minut. Rozdzielczość oraz błąd bezwzględny pomiarów temperatury poniżej 1 stopnia Celsjusza oraz błąd pomiaru natężenia promieniowania poniżej  $10 \text{ W/m}^2$  wydaje się wystarczający. Warunek ten powinien być spełniony przez większość stacji meteo.

Najbardziej skomplikowanym problemem jest obliczenie natężenia promieniowania na płaszczyznę kolektora zamontowanego pod dowolnym kątem  $\beta$  do płaszczyzny ziemi, ponieważ dysponujemy na ogół tylko natężeniem promieniowania słonecznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni ziemi.

## 5. Natężenie promieniowania padającego na płaszczyznę kolektora zamontowanego pod dowolnym kątem $\beta$ do płaszczyzny ziemi

Z założenia w ramach symulacji należy dokonać obliczeń dla dowolnego kąta pochylenia kolektorów solarnych. Według danych literaturowych [1] w typowym modelu promieniowania słonecznego można wyróżnić kilka składowych (18):

$$I_s = I_b + I_{ri} + I_{ro} + I_{rh} + I_o. \quad (18)$$

Określenie tych składowych jest problemem bardzo złożonym. Zależą one od indywidualnego miejsca położenia i otoczenia. Dla celów symulacji przyjęto uogólniony model zakładający, że otoczenie kolektorów ma małe właściwości odbijania

promieniowania, a natężenie promieniowania rozproszonego jest w przybliżeniu niezależne od kąta ustawienia płaszczyzny. W takim uproszczonym przypadku zostają dwie składowe (19):

$$I_s = I_b + I_r. \quad (19)$$

Przy czym składowa  $I_r$  ma charakter jednorodny, niezależny od położenia słońca i kolektorów. W związku z tym przyjęto, że składowa  $I_r$  uogólnionego rozproszonego promieniowania słonecznego dla płaszczyzny kolektorów nachylonych pod dowolnym kątem jest równa składowej uogólnionego rozproszonego promieniowania słonecznego dla płaszczyzny równoległej do powierzchni ziemi.

Natomiast składowa  $I_b$  ma charakter kierunkowy związany z położeniem słońca i możemy obliczyć ją według wzoru (20)

$$I_b = I_{bp} \frac{\cos(\beta - \phi) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(\beta - \phi) \cdot \sin\delta}{\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin\phi \cdot \sin\delta}. \quad (20)$$

Deklinację do wzoru (20) oblicza się według zależności (21):

$$\delta = -23,45 \cos \frac{360}{365,25} D. \quad (21)$$

Ponieważ pomierzona jest tylko wartość całkowita promieniowania słonecznego na płaszczyznę równoległą do powierzchni ziemi  $I_{sp}$ , to składową bezpośrednią  $I_{bp}$  oraz uogólnioną składową rozproszoną  $I_{rp}$  należy obliczyć na jej podstawie. Podział promieniowania słonecznego na składową bezpośrednią oraz uogólnioną rozproszoną nie jest łatwy i zależy od pory roku, dnia, zachmurzenia i innych czynników wpływających na przejrzystość atmosfery Ziemi. Aby w przyjętym modelu w przybliżeniu uwzględnić wszystkie wymienione czynniki, określono heurystyczną funkcję obliczania składowej bezpośredniej (22) w oparciu o wycinkowe dane:

$$I_{bp} = f(I_{sp}, I_{spt}). \quad (22)$$

Uogólnioną składową rozproszoną określa się wówczas z równania (23):

$$I_r = I_{sp} - I_{bp}. \quad (23)$$

Powyższe wzory umożliwiają zamodelowanie wszystkich procesów zachodzących w systemie solarnym z uwzględnieniem rzeczywistych danych meteorologicznych.

## 6. Parametry systemu solarnego

Model symulacyjny powinien obejmować jak największą grupę systemów solarnych przy różnych ustawieniach sterowania. W związku z tym należy założyć możliwość zadawania możliwie jak największej liczby parametrów systemu oraz opcji sterowania.

Parametry te można pogrupować według urządzeń lub procesów:

- absorpcja energii słonecznej — kolektory słoneczne,
- wymiana ciepła pomiędzy kolektorami i zbiornikiem ciepłej wody — orurowanie,
- magazynowanie ciepłej wody — zbiornik cw,
- pobór ciepłej wody,
- sterowanie systemem solarnym — sterownik i pompa.

Parametry dla poszczególnych grup przedstawiono w tabeli 1 wraz z przykładowymi wartościami dla typowego systemu solarnego podgrzewającego ciepłą wodę użytkową w gospodarstwie jednorodzinnym.

TABELA 1

Parametry systemu solarnego

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Symbol	Wartość przykład.	Jednostka miary
Kolektory	Kąt nachylenia kolektorów	$\beta$	45	[°]
	Sprawność optyczna kolektorów	$\eta_s$	0,85	W/W
	Powierzchnia apertury kolektorów	$S_a$	4	m <sup>2</sup>
	Współczynnik strat (liniowy)	$\alpha_{a1}$	3,2	W/(m <sup>2</sup> ·K)
	Współczynnik strat (kwadratowy)	$\alpha_{a2}$	0,025	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )
Kolektory + orurowanie	Masa płynu	$m_p$	15	Kg
	Ciepło właściwe płynu	$c_p$	3380	J/kg·K
Orurowanie	Powierzchnia rur	$S_r$	2	m <sup>2</sup>
	Współczynnik strat rur	$\alpha_r$	0,3	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Zbiornik ciepłej wody	Współczynnik przepływu ciepła w wężownicy	$\alpha_n$	315	W/K
	Masa wody w zbiorniku	$m_w$	400	kg
	Ciepło właściwe wody	$c_w$	4190	J/(kg·K)
	Współczynnik strat powierzchni zbiornika	$\alpha_z$	0,1	W/(m <sup>2</sup> ·K)
	Powierzchnia zbiornika wody	$S_z$	3,8	m <sup>2</sup>

cd. tabeli 1

Pobór wody ciepłej	Temperatura wody ciepłej pobieranej	$T_{wc}$	45	°C
	Masa wody pobranej w ciągu doby	$m_{wc}$	150	kg
	Intensywność poboru wody w cyklu dobowym	$\lambda$		%/h
Sterowanie	Maksymalna temperatura wody w zbiorniku	$T_{wmax}$	80	°C
	Temperatura stagnacji	$T_{pmax}$	240	°C
	Różnica temperatur załączenia pompy	$\Delta T_{zal}$	8	°C
	Różnica temperatur wyłączenia pompy	$\Delta T_{wyl}$	3	°C

Przedstawiony model, dane środowiska oraz parametry systemu solarnego umożliwiają utworzenie algorytmu obliczeń symulacyjnych.

## 7. Algorytm symulacji działania systemu solarnego

Przedstawiony powyżej model systemu solarnego pozwala określić algorytm umożliwiający symulację procesów energetycznych dla rzeczywistych danych meteorologicznych. Algorytm przedstawia rysunek 2.

Na wstępnym etapie algorytmu są zadawane wartości parametrów systemu oraz ustawione wartości początkowe temperatury wody i płynu roboczego. Następnie realizowana jest procedura powtarzana w pętli dla kolejnych okresów  $\Delta t$ .

W pierwszym kroku ustalany jest wskaźnik włączenia pompy płynu roboczego  $X_n$ . Zgodnie z rzeczywistymi warunkami pompa jest włączana, jeśli temperatura płynu jest wyższa od temperatury wody o co najmniej  $T_{wl}$  (standardowo  $T_{wl} = 8^\circ\text{C}$ ). Wyłączana, jeśli temperatura płynu jest niższa od temperatury wody lub wyższa o mniej niż  $T_{wyl}$  (standardowo  $T_{wyl} = 3^\circ\text{C}$ ). Pompa jest też wyłączana, jeśli temperatura wody przekracza dopuszczalną wartość maksymalną  $T_{wmax}$  (standardowo  $T_{wmax} = 70, 90^\circ\text{C}$ ).

W kolejnym etapie określa się wskaźnik poboru wody ciepłej  $X_{wc}$ . Jeśli temperatura wody w zbiorniku jest wyższa od zadanej, to ciepło jest dostarczane przez system solarny i  $X_{wc} = 0$ , w przypadku przeciwnym  $X_{wc} = 1$ , co oznacza, że pobierana woda ciepła jest podgrzewana przez dodatkowe źródło energii (np. piec gazowy).

Następnie zgodnie z zależnościami 1-23 oblicza się symulowane wartości:

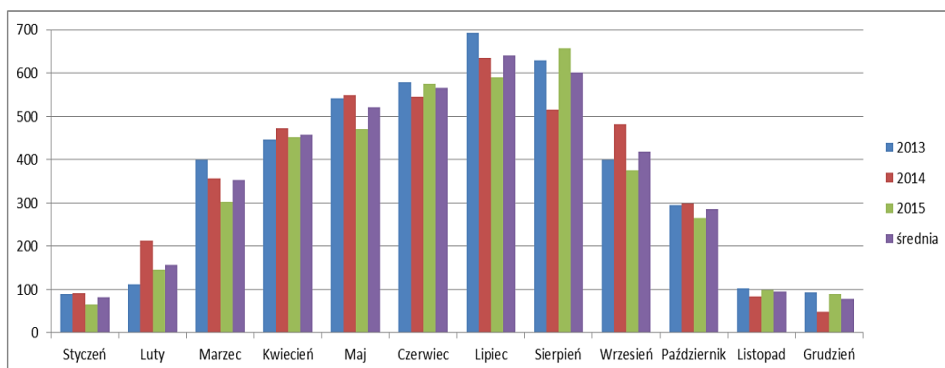
- temperaturę płynu roboczego,
- temperaturę wody w zbiorniku,
- ciepło pobierane przez użytkownika, którego źródłem są kolektory solarne,
- ciepło pobierane przez użytkownika z dodatkowego źródła energii,
- potencjalną energię promieniowania słonecznego na powierzchni kolektorów,
- sprawność energetyczną systemu solarnego.



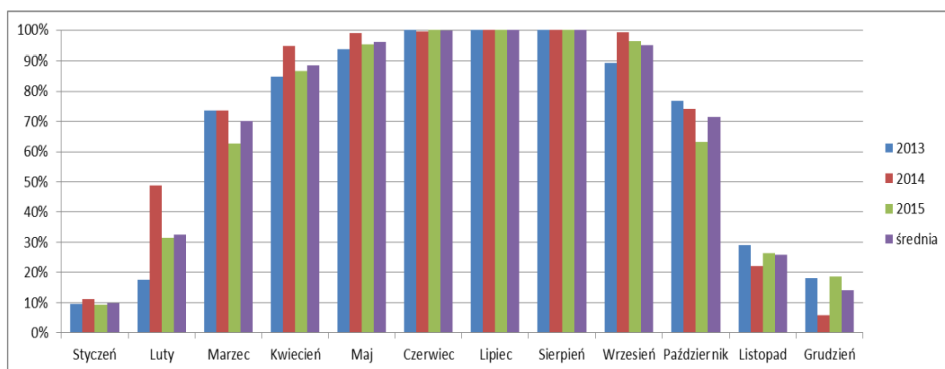
Powyższa pętla powtarzana jest co okres  $\Delta t = 1$  minuta do końca symulowanego okresu. Po zakończeniu symulacji przedstawiane mogą być wybrane przebiegi parametrów systemu solarnego nałożone na wielkości meteorologiczne oraz wykresy ciepła pobranego i sprawności systemu solarnego.

## 8. Przykładowe przebiegi i wykresy

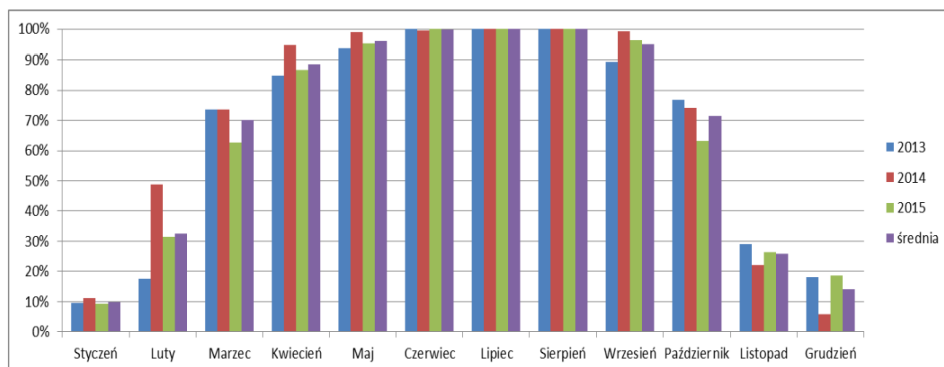
Kwintesencją są wykresy efektywności energetycznej systemu solarnego z podziałem na poszczególne miesiące. Na kolejnych wykresach przedstawiono energię promieniowania słonecznego na płaszczyznę kolektorów, ciepło uzyskane za pomocą systemu solarnego pobrane przez użytkownika oraz procentowy udział energii uzyskanej za pomocą systemu solarnego w całkowitym bilansie energii.



Rys. 3. Energia promieniowania słonecznego w kWh w latach 2013-2015



Rys. 4. Ciepło uzyskane za pomocą systemu solarnego w kWh w latach 2013-2015



Rys. 5. Procentowy udział energii uzyskanej za pomocą systemu solarnego

Wyniki mogą być także przedstawione w formie tabelarycznej, np. porównanie wyników rocznych przedstawiono w tabeli 2.

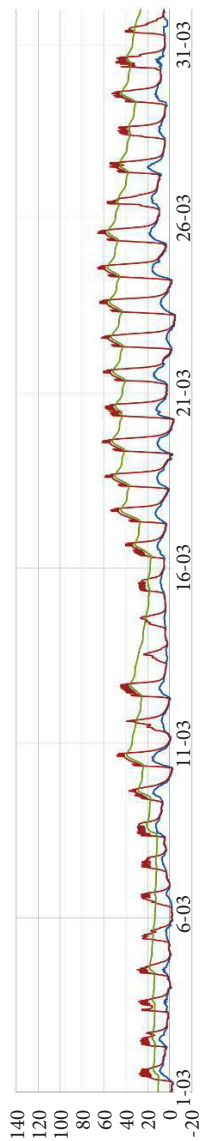
Zestawienie wyników dla lat 2013-2015

TABELA 2

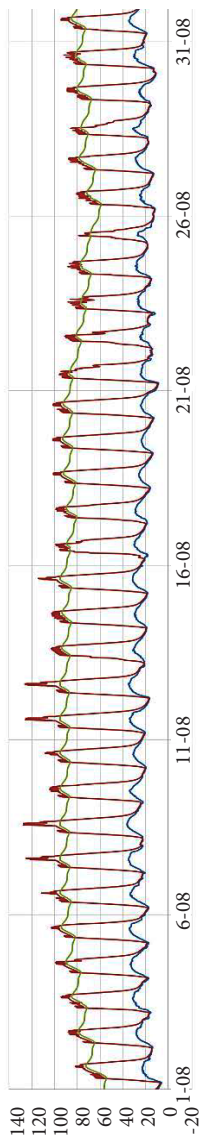
	2013	2014	2015	Średnia
Energia promieniowania słonecznego	4380,3	4289,3	4085,6	4251,7
Ciepło pobrane przez użytkowników	2041,8	2027,0	2031,4	2033,4
Ciepło uzyskane z systemu solarnego	1326,5	1371,9	1312,0	1336,8
Procentowy udział energii z systemu solarnego	64,97%	67,68%	64,59%	65,74%

Porównując wyniki obliczeń, można zauważyć, że dla opracowanej metodologii uzyskano wartości średnie trochę niższe niż dla danych meteorologicznych uśrednionych. Jest to efekt dokładniejszej analizy uwzględniającej wahania parametrów roboczych w funkcji czasu. Ponadto symulacja z wykorzystaniem przebiegów danych meteorologicznych umożliwia przedstawienie przebiegów temperatur płynu roboczego, wody i innych wielkości w funkcji czasu. Nie jest to możliwe w przypadku danych uśrednionych. Przykładowe wykresy z przebiegami przedstawiają rysunki 6, 7 i 8.

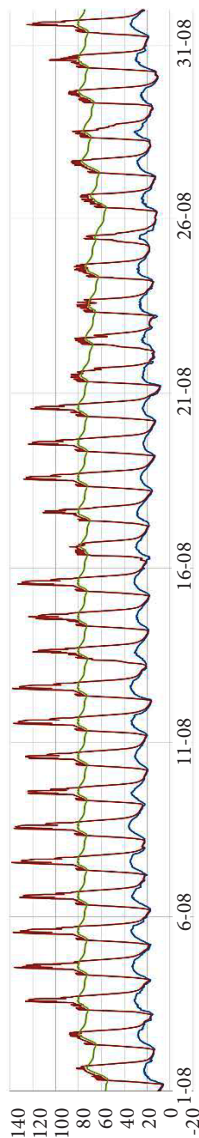
Analiza przebiegów umożliwia szczegółową ocenę częstości narażenia systemu solarnego na przegrzanie i stany stagnacji.



Rys. 6. Przebiegi parametrów roboczych w funkcji czasu dla marca 2015 r.



Rys. 7. Przebiegi dla sierpnia 2015 r. przy  $T_{\text{wmax}} = 95^{\circ}\text{C}$



Rys. 8. Przebiegi dla sierpnia 2015 r. przy  $T_{\text{wmax}} = 80^{\circ}\text{C}$



## 9. Wnioski

Opracowany model systemów solarnych i algorytm do analizy z wykorzystaniem przebiegów wielkości meteorologicznych w funkcji czasu wskazuje na możliwość dokładniejszego oszacowania efektywności energetycznej niż w przypadku powszechnie stosowanych wielkości uśrednionych. Wynika to z fluktuacji warunków meteorologicznych nieuwzględnianych przy danych uśrednionych. Umożliwia także obserwację wpływu na efektywność energetyczną różnych charakterystyk poboru wody ciepłej przez użytkowników i innych parametrów zmiennych w czasie.

Ponadto obserwacja procesów w czasie pozwala na określenie optymalnych warunków pracy systemów solarnych nie tylko z punktu widzenia energetycznego, lecz także technicznego. Na przykład porównując przebiegi dla sierpnia 2015 przy różnych temperaturach maksymalnych wody, widzimy różnice w częstotliwości przejścia systemu w stan stagnacji i przegrzania płynu roboczego.

Można przewidywać, że zastosowanie opracowanej metodologii da także dodatkowe możliwości analizy dla systemów solarnych wykorzystywanych do podgrzewania równoległe ciepłej wody użytkowej oraz wody w basenie, np. w ośrodkach turystycznych.

Praca finansowana z Projektu Badawczego Statutowego nr 928/2016.

Artykuł wpłynął do redakcji 7.03.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 16.06.2017 r.

### LITERATURA

- [1] CHWIEDUK D., *Energetyka słoneczna budynku*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2011.
- [2] ZIMNY J., BRZEGOWY R., BIELIK S., *Kolektory słoneczne Podstawy teoretyczne, budowa, badania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Kraków, 2013.
- [3] TIANA Y., ZHAO C.Y., *A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications*, Applied Energy, 104, 2013, s. 538-553.
- [4] KALOGIROU S.A., *Solar thermal collectors and applications*, Prog Energy Combust, 30, 2004, s. 231-295.
- [5] NEUPAUER K., MAGIERA J., *Analiza sprawności kolektorów słonecznych różnych typów*, Czasopismo Techniczne. Chemia, 2009, s. 57-65.
- [6] Instytut Energetyki Odnawialnej, *Program komputerowy Kolektorek 2.0*, <http://www.kolektorek.pl>

W. OLCHOWIK

### Simulation of systems with solar collectors in relation to the raw meteorological data

**Abstract.** The article describes an analysis of energetic efficiency of systems with solar-thermal collectors used to heat industrial and domestic water. Innovative approach lies in analysis of the instantaneous value of the flow of thermal energy in relation to the raw meteorological data. Therefore, it is possible to obtain more precise results. Additionally, new data from time graphs of operating parameters may

be acquired. The article explains methodology of analysis, mathematical model, and the algorithm used for calculations. The final part depicts the results of analysis of the data obtained in the years 2013-2015 by a meteorological station situated in the central area of the Masovian Voivodship.

**Keywords:** renewable energy, solar collectors, energy efficiency

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.1888