

Krzysztof SORNEK<sup>1</sup>  
Mariusz FILIPOWICZ<sup>2</sup>

## SYMULACJE DYNAMICZNE SYSTEMÓW OZE Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA TRNSYS

Prawidłowe planowanie i projektowanie instalacji opartych na wykorzystaniu energii ze źródeł odnawialnych ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia ich prawidłowej i efektywnej pracy. Aktualnie coraz większą popularność zyskują metody symulacji dynamicznych, które uzupełniają lub zastępują stosowane dotąd obliczenia statyczne. W niniejszym artykule przedstawione zostały wyniki symulacji dynamicznych przeprowadzonych z wykorzystaniem oprogramowania TRNSYS (Transient System Simulation Tool). Symulacje wykonane zostały dla dwóch przykładowych instalacji wykorzystujących energię promieniowania słonecznego: instalacji solarnej z kolektorami słonecznymi (fototermicznej) oraz instalacji fotowoltaicznej. Parametry obu systemów dostosowane zostały do typowych budynków jednorodzinnych. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na określenie parametrów pracy badanych systemów, w tym ilości wytwarzanego ciepła, ilości generowanej energii elektrycznej, a także stopnia zmienności produkcji energii w rozważanym przedziale czasowym (365 dni) i wybranej lokalizacji (Kraków). Wyniki porównane zostały z wynikami obliczeń statycznych przeprowadzonymi z wykorzystaniem ogólnodostępnych narzędzi do projektowania instalacji solarnych i fotowoltaicznych. Analiza otrzymanych wyników pozwala wnioskować, że wykorzystanie symulacji dynamicznych na etapie projektowania instalacji OZE może istotnie pomóc w eliminacji wielu potencjalnych problemów eksploatacyjnych (w przypadku instalacji wykorzystujących energię promieniowania słonecznego jest to np. niska wydajność, przegrzewanie się elementów systemu itp.), a także zapewnić długotrwałą, bezpieczną eksploatację projektowanych instalacji.

**Słowa kluczowe:** komputerowe wspomaganie projektowania instalacji OZE, symulacje dynamiczne instalacji OZE, systemy fototermiczne, systemy fotowoltaiczne, TRNSYS

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Sornek, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (AGH), Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126175094; krzysztof.sornek@agh.edu.pl

<sup>2</sup> Mariusz Filipowicz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie (AGH)

## 1. Wprowadzenie

Komputerowe wspomaganie projektowania instalacji energetyki odnawialnej oraz symulacji ich działania stanowi istotny aspekt badań prowadzonych na całym świecie. Dostępne oprogramowanie można podzielić w zależności od przeznaczenia na trzy główne grupy:

- programy projektowe pozwalające na dobór typu i wielkości poszczególnych elementów instalacji,
- programy symulacyjne umożliwiające symulację parametrów funkcjonowania instalacji,
- programy narzędziowe oraz bazy danych.

Wśród zalet stosowania programów komputerowych przy projektowaniu i symulacji instalacji OZE wyróżnić można m.in. wyeliminowanie kosztów budowy prototypów, możliwość prowadzenia obliczeń charakteryzujących się dużą dokładnością, możliwość wykorzystania rzeczywistych danych pomiarowych oraz możliwość szybkiej zmiany poszczególnych elementów instalacji i optymalizacji ich parametrów [1].

W ramach prac opisanych w niniejszym artykule przeprowadzone zostały symulacje dynamiczne z wykorzystaniem oprogramowania TRNSYS (Transient System Simulation Tool). Symulacje przeprowadzone zostały dla przykładowych instalacji solarnej (fototermicznej) i fotowoltaicznej.

## 2. Metodyka badawcza

Prowadzone badania podzielone zostały na 3 etapy. W pierwszej części badań opracowano założenia projektowe instalacji solarnej i fotowoltaicznej oraz zdefiniowano parametry stosowanych urządzeń (z wykorzystaniem ogólnodostępnych narzędzi doborowych opartych na obliczeniach statycznych). W drugim etapie stworzone zostały modele rozważanych systemów w oprogramowaniu TRNSYS oraz przeprowadzone zostały symulacje dynamiczne ich działania. W trzecim etapie porównano wyniki otrzymane w symulacjach z wynikami doboru.

### 2.1. Symulacje systemów fototermicznych w TRNSYS

Oprogramowanie TRNSYS umożliwia prowadzenie symulacji dla różnych typów kolektorów słonecznych, w tym kolektorów płaskich i rurowo-próżniowych (reprezentowanych odpowiednio przez komponenty określone jako „Typ 1” i „Typ 71”). Komponenty te zawierają w sobie model obliczeniowy wydajności cieplnej oparty na równaniu kwadratowym, będącym uogólnieniem równania Hottel-Whilliera (1). Wydajność cieplna  $\eta$  pola kolektorów słonecznych określona jest z uwzględnieniem liczby modułów połączonych w szeregu i charakterystyki każdego modułu [2].

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = \frac{\dot{m} \cdot c_{pf} \cdot (T_o - T_i)}{A \cdot I_T} = F_R (\tau \alpha)_n - F_R \cdot U_{L,o} \frac{T_i - T_a}{I_T} \quad (1)$$

gdzie:

$Q_u$  - ciepło generowane w kolektorach słonecznych, kJ/h;

$A$  - powierzchnia apertury lub powierzchnia brutto pola kolektorów, m<sup>2</sup>;

$I_T$  - promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię kolektora, kJ/(h·m<sup>2</sup>);

$\dot{m}$  - przepływ masowy w danych warunkach, kg/h;

$c_{pf}$  - ciepło właściwe medium roboczego, kJ/(kg·K);

$T_i$  - temperatura medium roboczego na wlocie do kolektora, K;

$T_o$  - temperatura medium roboczego na wylocie z kolektora, K;

$T_a$  - temperatura otoczenia, K;

$F_R$  - współczynnik odprowadzania ciepła z kolektora, -;

$\tau$  - współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego, -;

$\alpha$  - współczynnik absorpcji promieniowania słonecznego, -;

$U_{L,o}$  - ogólny współczynnik strat ciepłych kolektora na jedn. powierzchni, kJ/(h·m<sup>2</sup>·K).

Wartość współczynnika  $U_L$  nie jest stała. Biorąc pod uwagę zależność liniową pomiędzy  $U_L$  a różnicą ( $T_i - T_a$ ), wydajność cieplna może być wyrażona w następującej postaci (2):

$$\eta = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = F_R (\tau \alpha)_n - F_R \cdot U_L \frac{T_i - T_a}{I_T} - F_R \cdot U_{L/T} \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (2)$$

gdzie:

$U_L$  - współczynnik strat ciepłych kolektora na jedn. powierzchni, kJ/(h·m<sup>2</sup>·K);

$U_{L/T}$  - współczynnik strat ciepłych zależny od T, kJ/(h·m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>).

Równanie (2) może być przedstawione w postaci:

$$\eta = a_0 - a_1 \frac{T_i - T_a}{I_T} - a_2 \frac{(T_i - T_a)^2}{I_T} \quad (3)$$

gdzie:

$a_0$  - sprawność optyczna (maksymalna sprawność kolektora), -;

$a_1$  - współczynnik pierwszego rzędu w równaniu sprawności kolektora, -;

$a_2$  - współczynnika drugiego rzędu w równaniu sprawności kolektora, -.

Parametry  $a_0$ ,  $a_1$  i  $a_2$  podawane są przez producentów i dostępne są dla kolektorów testowanych zgodnie z obowiązującymi normami ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers). Ocena kolektorów dokonywana jest przez SRCC (Solar Rating and Certification Corporation).

## 2.2. Symulacje systemów fotowoltaicznych w TRNSYS

Moduły fotowoltaiczne reprezentowane są w TRNSYS przez komponent „Typ 194”. Komponent ten pozwala na symulowanie wydajności elektrycznej modułów fotowoltaicznych z wykorzystaniem modelu opartego na równoważnym obwodzie elektrycznym ogniwa, charakteryzowanym przez pięć parametrów: prąd powstający w wyniku promieniowania słonecznego  $I_L$ , prąd nasycenia diody w kierunku zaporowym  $I_0$ , rezystancję szeregową  $R_s$ , rezystancję bocznikową  $R_{sh}$  oraz współczynnik  $a$  zdefiniowany zgodnie z równaniem (5) [3]. Model ten pozwala określić prąd oraz moc paneli przy danym napięciu, a także prąd i napięcie w punkcie maksymalnej mocy (MPP). Dodatkowo, możliwość jednoczesnej symulacji parametrów pracy zarówno modułów PV, jak i falownika, pozwala na bezpośrednie uwzględnienie wpływu falownika na wydajność systemu.

Prąd  $I$  określany w modelu dla równoważnego obwodu elektrycznego ogniwa fotowoltaicznego wyrażany jest wzorem:

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

gdzie:

- $I_L$  - fotoprąd modułu, A;
- $I_0$  - zaporowy prąd nasycenia, A;
- $V$  - napięcie diodowe, V;
- $I$  - prąd, A;
- $R_s$  - rezystancja szeregową modułów,  $\Omega$ ;
- $R_{sh}$  - rezystancja bocznikowa modułów,  $\Omega$ ;
- $a$  - parametr definiowany równaniem (5), -.

$$a \equiv \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (5)$$

gdzie:

- $N_s$  - liczba modułów połączonych szeregowo, -;
- $n_i$  - współczynnik idealności diody, -;
- $k$  - stała Boltzmann, J/K;
- $T_c$  - temperatura modułu, K;
- $q$  - ładunek elektronu, C.

## 3. Wyniki badań

### 3.1. Założenia budowy instalacji fototermicznej i fotowoltaicznej

Na potrzeby doboru i symulacji założona została podstawowa konfiguracja instalacji solarnej, jako systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej (bez funkcji dogrzewania medium w instalacji c.o.) [4]. W skład instalacji

wchodzą: zespół kolektorów słonecznych, zasobnik c.w.u., pompa solarna, sterownik oraz inne elementy, których obecności nie uwzględnia się w modelu. Przyjęto następujące założenia doboru poszczególnych elementów:

- lokalizacja: Kraków,
- dobowe zużycie ciepłej wody użytkowej:  $60 \text{ dm}^3/(\text{os} \cdot \text{doba})$ ,
- liczba osób: 4,
- zakładany solarny stopień pokrycia potrzeb energetycznych: 60%,
- temperatura zimnej wody:  $10^\circ\text{C}$ ,
- temperatura ciepłej wody w zbiorniku:  $60^\circ\text{C}$ ,
- typ kolektora: kolektor płaski,
- orientacja kolektorów względem stron świata:  $0^\circ$  (południe),
- nachylenie kolektorów:  $45^\circ$ .

W oparciu o przedstawione założenia oraz obliczenia prowadzone tradycyjną metodą z wykorzystaniem przykładowego narzędzia do doboru elementów instalacji solarnej, dobrane zostały cztery kolektory słoneczne o parametrach podanych w tab. 1 (pracujące w połączeniu szeregowym) oraz jednowężownicowy zasobnik c.w.u. o pojemności  $300 \text{ dm}^3$ .

Tabela 1. Podstawowe parametry wybranych kolektorów słonecznych

Table 1. The basic parameters of selected solar thermal collectors

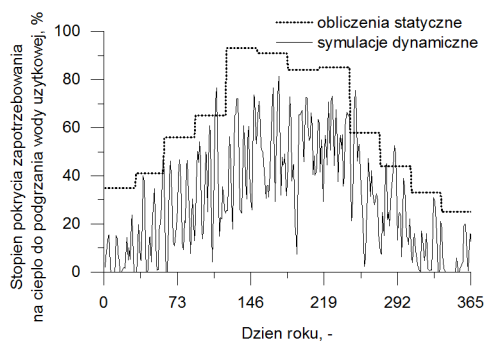
Parametr kolektora	Wartość	Jednostka
Powierzchnia brutto	2,03	$\text{m}^2$
Powierzchnia absorbera	1,84	$\text{m}^2$
Materiał absorbera	miedź	-
Sprawność optyczna	0,79	-
Medium robocze	glikol propylenowy + woda	
Zalecany przepływ medium	45-50	$\text{dm}^3/\text{h}$

Również w przypadku instalacji fotowoltaicznej założono standardową budowę systemu, dostosowaną do potrzeb budynku jednorodzinne (jako pomocnicze źródło energii elektrycznej) [5]. W skład instalacji wchodzi cztery moduły fotowoltaiczne o mocy  $250 \text{ W}_p$  każdy (charakteryzujące się prądem nominalnym  $I_{MPP} = 8,3 \text{ A}$  oraz napięciem nominalnym  $U_{MPP} = 30,2 \text{ V}$ ), falownik, kontroler napięcia oraz zespół akumulatorów. Założono zastosowanie modułów polikryształicznych zorientowanych na południe i nachylonych pod kątem  $45^\circ$  (identycznie jak w przypadku kolektorów słonecznych). Jako lokalizację wybrano Kraków.

Omawiane instalacje zostały zdefiniowane w TRNSYS w postaci schematów funkcyjnych (odpowiadających rzeczywistym założeniom).

### 3.2. Porównanie wyników otrzymanych w toku obliczeń statycznych oraz symulacji dynamicznych

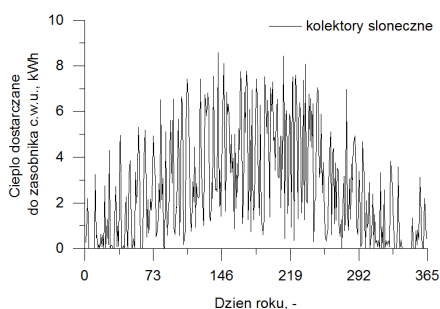
Porównanie wyników obliczeń statycznych oraz symulacji dynamicznych dla instalacji solarnej przedstawione zostało na rys. 1. Analizując dane z rys. 1 można zauważyć, iż wartości solarnego stopnia pokrycia zapotrzebowania na ciepło określone w toku symulacji są mocno fluktuujące i wyraźnie niższe niż w przypadku obliczeń statycznych.



Rys. 1. Wyniki obliczeń solarnego stopnia pokrycia zapotrzebowania na ciepło

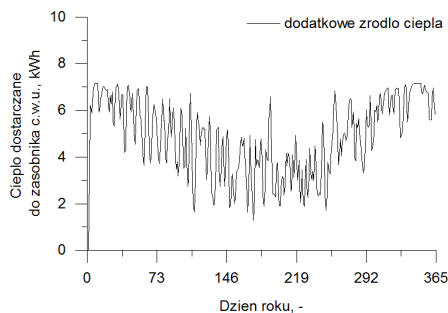
Fig. 1. Calculated fraction of domestic hot water requirement met by collectors

W efekcie wymagane jest dostarczenie dodatkowej energii do zasilenia pomocniczego źródła ciepła (rys. 2a, 2b). Jako pomocnicze źródło ciepła stosuje się najczęściej grzałki elektryczne lub kotły grzewcze (np. gazowe).



Rys. 2a. Ilość ciepła dostarczanego przez kolektory słoneczne

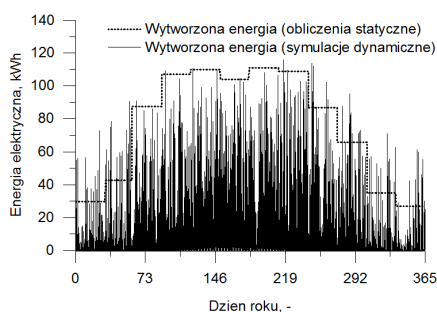
Fig. 2a. The amount of heat generated in collectors



Rys. 2b. Ilość ciepła dostarczanego przez dodatkowe źródło

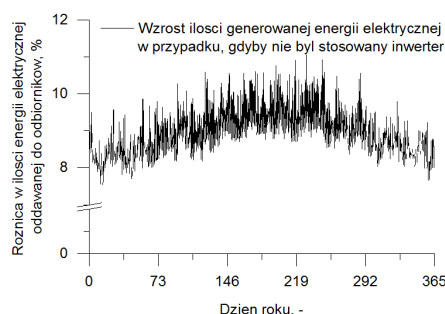
Fig. 2b. The amount of heat generated in auxiliary heater

Również symulacje dynamiczne przeprowadzone dla instalacji fotowoltaicznej pozwoliły na szczegółowe określenie parametrów jej pracy. Na rys. 3 przedstawiona została spodziewana produkcja energii elektrycznej w ciągu roku (także w tym przypadku różnica pomiędzy rezultatami uzyskanymi w drodze obliczeń statycznych a rezultatami symulacji dynamicznych są znaczące). Z kolei na rys. 4 pokazane zostało, o ile więcej energii elektrycznej byłoby teoretycznie możliwe do uzyskania z instalacji paneli fotowoltaicznych w przypadku, gdyby nie był stosowany inwerter (przedstawiona krzywa obejmuje wyłącznie godziny pracy instalacji oraz odnosi się do przypadku zastosowania inwertera o mocy maksymalnej 1 kW).



Rys. 3. Wyniki obliczeń ilości energii elektrycznej wytwarzanej w instalacji PV

Fig. 3. The amount of electricity generated in PV system



Rys. 4. Różnica w ilości wytwarzanej energii elektrycznej przy zastosowaniu inwertera

Fig. 4. The difference in electricity generation when inverter is used

#### 4. Wnioski

Porównując wyniki otrzymane w drodze doboru opartego na obliczeniach statycznych oraz symulacji dynamicznych przeprowadzonych z wykorzystaniem TRNSYS, zauważyć można znaczącą różnicę w dokładności obliczeń.

Symulacje dynamiczne prowadzone z krokiem czasowym 1h oraz wykorzystujące dane z bazy pogodowej Meteonorm (uwzględniające nie tylko wartości natężenia promieniowania słonecznego, ale też inne parametry wpływające na pracę urządzeń) pokazują, że wielkość produkcji ciepła w instalacji solarnej oraz energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej jest mniejsza od wielkości otrzymanej w narzędziu doborowym.

Biorąc pod uwagę fakt, iż symulacje dynamiczne w TRNSYS charakteryzują się wysokim stopniem odwzorowania rzeczywistości (w literaturze można znaleźć badania, gdzie stopień ten jest większy niż 90%), ich zastosowanie na etapie projektowania instalacji solarnych i fotowoltaicznych (a także innych systemów OZE) może istotnie pomóc w eliminacji wielu potencjalnych problemów (np. niska wydajność, przegrzewanie się elementów systemu itp.), a także zapewnić długotrwałą, bezpieczną eksploatację projektowanych instalacji.

*Praca wykonana w ramach działalności statutowej WEiP, AGH w Krakowie „Badania uwarunkowań zrównoważonego rozwoju energetycznego” z wykorzystaniem infrastruktury badawczej Centrum Energetyki AGH.*

## **Literatura**

- [1] Kalogirou S., Papamarcou C., Modelling of a Thermosyphon Solar Water Heating System and Simple Model Validation, *Renewable Energy*, vol. 21, 2000, pp. 471-493.
- [2] Duffie J.A., William A.B., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons, Inc., New York 1991.
- [3] DeSoto W., Klein S.A., Beckman W.A., Improvement and validation of a model for PV array performance, *Solar Energy Journal*, vol. 80, 2006, pp. 78-88.
- [4] Sornek K., Rzepka K., Mirowski T., Uwarunkowania środowiskowe projektowania budynków energooszczędnych i pasywnych: aktywne i pasywne systemy słoneczne, *Rynek Instalacyjny*, nr 3, 2015, s. 47-52.
- [5] Mirowski T., Sornek K., Potencjał energetyki prosumenckiej w Polsce na przykładzie mikroinstalacji fotowoltaicznych w budownictwie indywidualnym, *Polityka Energetyczna*, t. 18, z. 2, 2015, s. 73-84.

## **THE SIMULATION OF THE RENEWABLE ENERGY SYSTEMS OPERATION USING TRNSYS SOFTWARE**

### **S u m m a r y**

The proper design of renewable energy based systems is really important to provide their efficient and safe operation. Nowadays, more and more popular are dynamic simulations which are characterized by many advantages in comparison to typical, static calculations. During described study, the simulations of solar thermal and photovoltaic installations designed for a typical residential building were conducted in the TRNSYS software. Carried out calculations allowed to determine the heat and power generation in the discussed systems in each case as well as to estimate the efficiency of considered installations. Obtained results were compared with the results from other available tool based on the static calculations. It may be concluded, that using dynamic simulations at the designing stage of renewable energy based systems may help to avoid many exploitation problems (including low efficiency, overheating etc.) and allows to provide safe exploitation of such installations.

**Keywords:** renewable energy system design, photovoltaic system, solar water heating system, dynamic simulations, TRNSYS

*Przesłano do redakcji: 23.12.2017 r.*

*Przyjęto do druku: 29.12.2017 r.*