

ZASTOSOWANIE TRANSFORMATY FALKOWEJ DO FILTROWANIA SZYBKOSMIENNYCH SKŁADOWYCH KRZYWEJ NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

Jacek Kapica

Katedra Podstaw Techniki, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Streszczenie. Artykuł przedstawia zastosowanie transformaty falkowej do filtrowania szybkozmiennych składowych krzywej natężenia promieniowania słonecznego. Dokonano pomiarów natężenia promieniowania słonecznego dla kilku charakterystycznych pod względem zmienności dni. Pomiarzy były dokonywane z częstotliwością 2 próbki na sekundę co jest wartością dużą, jak dla pomiarów nasłonecznienia. Następnie tak uzyskane dane zostały poddane ponownemu próbkowaniu z mniejszymi częstotliwościami bezpośrednio oraz po odfiltrowaniu składowych szybkozmiennych przy użyciu transformaty falkowej. Dla każdego z przypadków wyznaczona została dzienna ilość energii słonecznej.

Słowa kluczowe: dekompozycja falkowa, filtracja sygnału, promieniowanie słoneczne

Wstęp

Promieniowanie słoneczne, zależnie od panujących w danym dniu warunków atmosferycznych, charakteryzuje się różnym stopniem zmienności. W przypadku dni bezchmurnych lub kiedy niebo pokryte jest równomierną warstwą chmur, natężenie promieniowania słonecznego zmienia się powoli wraz z pozornym ruchem Słońca. Kiedy jednak niebo pokryte jest drobnymi chmurami, na przykład z rodzaju cumulus, promieniowanie słoneczne zmienia się bardzo szybko.

Ze względu na przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej ogniw słonecznych, sprawność układu generator fotowoltaiczny-odbiornik jest zależna od dopasowania odbiornika do źródła. W układach z baterią akumulatorów chwilowe wartości promieniowania słonecznego nie są tak istotne – obecność akumulatora stabilizuje punkt pracy generatora fotowoltaicznego. Inaczej, ze względu na wspomniane zagadnienie dopasowania odbiornika do źródła, jest w przypadku układów bez baterii akumulatorów. Ma to szczególne znaczenie w zastosowaniach rolniczych, w których mogą być wykorzystane tego typu układy – w przypadku gdy podaż energii słonecznej idzie w parze z zapotrzebowaniem na energię elektryczną (np. układy napowietrzania stawów, pompy, suszarnice itp.).

Dlatego przy analizie pracy układów zasilanych z generatorów fotowoltaicznych często oprócz sumy energii uzyskanej w danym dniu wykorzystuje się dane z pomiarów chwilowej wartości natężenia promieniowania. Największą dokładność uzyskuje się stosując duże

częstotliwości próbkowania, jednak podejście takie daje ogromne ilości danych, co – w przypadku długotrwałych pomiarów – może być kłopotliwe ze względu na potrzebną przestrzeń dyskową, jak również obciążenie procesora w przypadku wykorzystania tych danych do symulacji komputerowych. Rozwiązaniem jest odpowiedni dobór częstotliwości próbkowania, jednakże wybór punktów pomiarowych jest przypadkowy i może się zdarzyć, że pobranie próbki będzie miało miejsce w punkcie, który nie jest reprezentatywny dla danego okresu, np. w trakcie chwilowego, krótkotrwałego zachmurzenia.

Alternatywnym podejściem jest akwizycja danych z dużą częstotliwością, poddanie ich obróbce mającej na celu zlikwidowanie (uśrednienie) największych skoków, po czym ponowne spróbkowanie tak uzyskanego sygnału z niższą częstotliwością w celu archiwizacji danych.

Niniejszy artykuł przedstawia zastosowanie transformaty falkowej do filtrowania szybkozmiennych składowych krzywej promieniowania słonecznego. Tak uzyskane wyniki wykorzystano następnie w modelowaniu układu napędzającego wentylator. Zastosowanie omawianej metody, pozwala zwiększyć dokładność modelowania pracy rolniczych układów zasilanych energią słoneczną.

Transformata falkowa

Ponieważ przebieg natężenia promieniowania słonecznego jest sygnałem nieokresowym i niestacjonarnym, odpowiednim do przeprowadzenia operacji filtracji narzędziem jest transformata falkowa [Morsi i in. 2009]. Transformatę falkową można uznać za rozwinięcie analizy fourierowskiej, wykorzystywaną do reprezentacji funkcji (sygnału) za pomocą zbioru funkcji ortogonalnych [Kythe i in. 2004]. Zastosowanie transformaty falkowej, ze względu na obecność parametru przesunięcia – w odróżnieniu od transformaty Fouriera – pozwala umiejscowić w czasie zmienność sygnału. Dlatego też narzędzie to jest szczególnie przydatne przy analizie sygnałów niestacjonarnych.

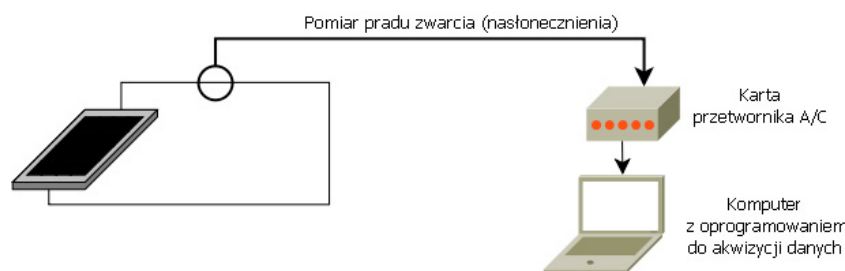
Aby odfiltrować sygnały szybkozmiennne należy dokonać rozkładu sygnału na składowe o różnych skalach, a następnie rekonstrukcji tego sygnału po usunięciu składowych szybkozmiennych.

Metoda pomiarowa

Prąd zwarcia ogniwa fotowoltaicznego jest wprost proporcjonalny do nasłonecznienia [Kalogirou 2009]. Fakt ten został wykorzystany do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię modułu fotowoltaicznego. Schemat układu do pomiaru nasłonecznienia jest przedstawiony na rys. 1. Próbkę sygnału były pobierane 2 razy na sekundę, co jest wartością dużą jak dla pomiarów promieniowania słonecznego.

Kolejnym krokiem było uzyskanie dwóch sygnałów: 1) sygnału powstałego poprzez ponowne spróbkowanie sygnału uzyskanego z pomiarów przy większym odstępnie pomiędzy kolejnymi próbkami, 2) sygnału uzyskanego po odfiltrowaniu składowych szybkozmiennych z sygnału pomiarowego i ponownie spróbkowanie go z częstotliwością taką samą jak przy uzyskiwaniu sygnału pierwszego. Zadania te były realizowane za pomocą aplikacji komputerowej utworzonej przez autora w środowisku LabView. Aplikacja ta obliczała także ilość energii słonecznej przy użyciu sygnału mierzonego z częstotliwością 2 próbek na sekundę oraz z wykorzystaniem obydwu sygnałów uzyskanych z obliczeń.

Jednocześnie wyznaczone były błędy bezwzględne i względne oszacowania energii słonecznej przy założeniu, że sygnał próbkowany co 0,5 s jest wzorcem.



Źródło: opracowanie własne autora

Rys. 1. Schemat układu do pomiaru nasłonecznienia

Fig. 1. Diagram of a setup for insolation measurement (author's own study)

Sygnał był rozkładany na 7 poziomów dekompozycji przy użyciu falki Haara. Przy rekonstrukcji pozostawiono składową odpowiedzialną za najwolniejsze zmiany.

Dzienna ilość energii była wyznaczana poprzez całkowanie po czasie wartości mocy promieniowania słonecznego. Całkowanie odbywało się metodą trapezów.

W celu sprawdzenia czy proponowana metoda jest przydatna w modelowaniu układów rolniczych, zamodelowano pracę najprostszego układu złożonego z generatora fotowoltaicznego podłączonego bezpośrednio do silnika prądu stałego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych napędzającego maszynę roboczą o wentylatorowej charakterystyce momentu oporowego w funkcji prędkości kątowej. Przykładem takiej maszyny może być wentylator lub pompa odśrodkowa.

Charakterystykę prądowo - napięciową $I=f(U)$ generatora fotowoltaicznego zamodelowano przy pomocy równania [Kapica 1998]:

$$I = I_{PH} - I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

gdzie:

- I_{PH} – fotoprąd (przyjęto wartość 2,57 A),
- I_0 – prąd nasycenia złącza p-n (przyjęto $6 \cdot 10^{-5}$ A),
- U – napięcie na obciążeniu,
- e – ładunek elementarny,
- n – współczynnik diodowy, określony stosunkiem dyfuzyjnej i rekombinacyjnej składowych natężenia prądu nasycenia (przyjęto $n= 2,23$),
- k – stałą Boltzmanna,
- T – temperaturę ogniwa (przyjęto 298 K). Generator składał się z trzech gałęzi składających się z dwu paneli fotowoltaicznych (łącznie 6 paneli).

Charakterystyka mechaniczna silnika dana jest klasycznym wzorem [Kowalowski 1982]:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{MR_t}{C_e \Phi C_m \Phi} \quad (2)$$

gdzie:

- ω – prędkość kątową wału silnika,
- U – napięcie twornika silnika (w omawianym przypadku jest ono równe napięciu generatora fotowoltaicznego),
- $C_e \Phi, C_m \Phi$ – stałe konstrukcyjne silnika (przyjęto $C_e \Phi = 0,0145$ Vs, $C_m \Phi = 0,14$ NmA⁻¹),
- M – moment na wale silnika,
- R_t – rezystancję twornika (przyjęto 1,5 Ω).

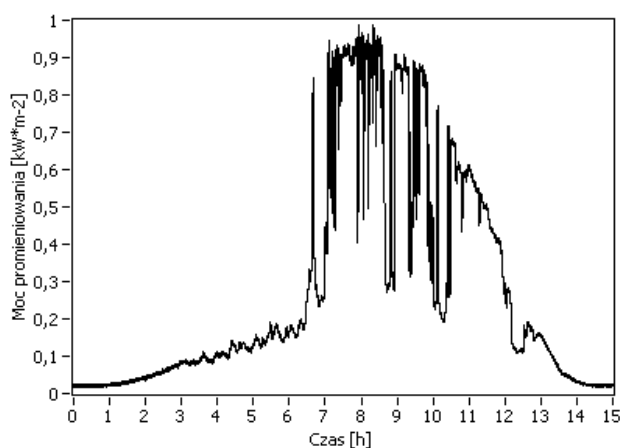
Charakterystykę maszyny roboczej zamodelowano równaniem:

$$M = b n^2$$

Założono $b = 3 \cdot 10^{-3}$ Nms² – jest to wartość zbliżona do parametrów wentylatora znajdującego się na wyposażeniu Katedry Podstaw Techniki UP w Lublinie. W modelu zaniebano straty mechaniczne silnika i wentylatora.

Wyniki pomiarów i obliczeń

Pomiary były wykonane w kwietniu 2010 dla kilkunastu dni, z których wybrano kilka typowych przebiegów. Poniżej przedstawiono wyniki pomiarów i obliczeń dla wybranego dnia, w którym obserwowano szybkie zmiany nasłonecznienia. Godzina „0” na wykresie oznacza początek pomiarów czyli godzinę 6. Podobne rezultaty uzyskano także dla innych dni, ze względu na ograniczoną objętość niniejszej publikacji, autor ograniczył się do zamieszczenia jednego przykładu.



Rys. 2. Przebieg nasłonecznienia w dniu A (opracowanie własne autora).
Fig. 2. Insolation curve on day A (author's own study)

Tabela 1. Dzienna wartość energii promieniowania słonecznego oraz energia mechaniczna modelowanego układu napędowego wyznaczona dla różnych czasów odstępu pomiędzy kolejnymi próbkami oraz względny błąd wyznaczenia tych energii, dzień A

Table 1. Daily solar radiation energy value and mechanical energy of the modelled driving system determined for various time intervals between successive samples and relative error in the determination of these energy values, day A

ΔT [s]	A_1 [kJ·m ⁻²]	δ_1 [%]	E_{m1} [kJ]	δ_{m1} [%]	A_2 [kJ·m ⁻²]	δ_2 [%]	E_{m2} [kJ]	δ_{m2} [%]
0,5	15087	-	2175	-	-	-	-	-
60	15119	0,2	2182	0,3	15097	0,1	2175	0,03
150	15255	1,1	2213	1,8	15068	0,1	2171	-0,2
300	15291	1,4	2218	2,0	15069	0,1	2169	-0,3
600	15719	4,2	2312	6,3	15403	2,1	2241	3,1
900	15511	2,8	2271	4,4	15347	1,7	2236	2,8

Źródło: pomiary i obliczenia własne autora

Oznaczenia zastosowane w tabeli 1:

ΔT – odstęp czasu pomiędzy kolejnymi próbkami, A_1 – jednostkowa wartość energii promieniowania słonecznego bez filtracji, δ_1 – błąd wyznaczenia energii promieniowania słonecznego w przypadku sygnału niefiltrowanego, A_2 – jednostkowa wartość energii promieniowania słonecznego filtracji, δ_2 – błąd wyznaczenia energii promieniowania słonecznego w przypadku sygnału filtrowanego, E_{m1} – dzienna energia mechaniczna wyznaczona na drodze symulacji przy wykorzystaniu sygnału niefiltrowanego, E_{m2} – dzienna energia mechaniczna wyznaczona na drodze symulacji przy wykorzystaniu sygnału filtrowanego, δ_{m1} – błąd wyznaczenia energii mechanicznej w przypadku wykorzystania sygnału niefiltrowanego, δ_{m2} – błąd wyznaczenia energii mechanicznej w przypadku wykorzystania sygnału filtrowanego.

Wnioski

Z przedstawionych obliczeń wynika, że przy zastosowaniu krótszych odstępów pomiędzy kolejnymi próbkami błąd wyznaczenia dziennej energii padającego promieniowania słonecznego jest zazwyczaj mniejszy. Zdarza się jednak, że przy dłuższych okresach próbkowania – rzędu 600 i 900 s – błąd względny jest mniejszy w porównaniu z krótszymi okresami.

W przypadku wyznaczania dziennej energii mechanicznej uzyskanej z układu napędzającego wentylator dokładność jest wyraźnie wyższa po uprzednim odfiltrowaniu składowych szybkozmiennych.

Zastosowanie opisanej wcześniej filtracji pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiarów. W większości przypadków błąd po odfiltrowaniu składowych szybkozmiennych jest znacznie mniejszy niż bez zastosowania filtracji, w kilku przypadkach jest porównywalny, a tylko w jednym (dzień B, próbkowanie co 900 s) – większy.

Wartości błędów, nawet bez filtrowania sygnału, są stosunkowo niewielkie i nie przekraczają 5,1%, a jeśli ograniczyć okresy próbkowania do 10 minut – 4,2%. Tym nie mniej, wcześniejsze usunięcie składowych szybkozmiennych omawianą metodą powoduje zmniejszenie błędu.

Zastosowanie okresów próbkowania do 60 s, nawet bez filtrowania sygnału, pozwala uzyskać wysoką dokładność pomiaru. W przypadkach, kiedy ze względu na ilość gromadzonych danych i wykonywanych obliczeń konieczne jest zastosowanie dłuższych okre-

sów, warto dokonywać pomiarów z wyższą częstotliwością, usunąć opisaną metodą składowe szybkozmienne i przed archiwizacją ponownie spróbkować tak otrzymany sygnał z niższą częstotliwością. Pozwoli to na uzyskanie większej dokładności obliczeń dokonywanych z wykorzystaniem tak przygotowanych danych.

Prezentowana metoda jest szczególnie przydatna w modelowaniu pracy układów rolniczych, w których istotna jest prosta budowa i niska cena – stąd często są to układy bez baterii akumulatorów.

Bibliografia

- Kalogirou S. A.** 2009. Solar Energy Engineering - Processes and Systems. Elsevier. ISBN 978-0-12-374501-9.
- Kapica J.** 1998. The Influence of selection of the Solar Cell's Model on the Accuracy of Calculation of the Current-Voltage Characteristic, Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, Austria. ISBN 92-828-5179-6.
- Kowalowski H.** 2008. Maszyny i napęd elektryczny. ISBN 83-01-00154-2.
- Kythe P., Schäferkötter M.** 2004. Handbook of Computational Methods for Integration. ISBN 978-0-203-49030-3
- Morsi W., El-Hawary M.E.** 2009. A new reactive, distortion and non-active power measurement method for nonstationary waveforms using wavelet packet transform, Electric Power Systems Research. Volume 79. Issue 10. ISSN 0378-7796.

EMPLOYING A WAVELET TRANSFORM TO FILTER QUICK CHANGE COMPONENTS OF SOLAR RADIATION INTENSITY CURVE

Abstract. The article presents the issue of using a wavelet transform to filter quick change components of solar radiation intensity curve. The research involved measuring solar radiation for several days, which were distinctive as regards insolation variability. The measurements were carried out at the rate of 2 samples per second, which is high for insolation measurements. Subsequently, the obtained data was subjected to another sampling at lower frequencies, directly and after quick change components were filtered out using the wavelet transform. Daily solar energy amount was determined for each of the cases.

Key words: wavelet decomposition, signal filtering, solar radiation

Adres do korespondencji:

Jacek Kapica; e-mail: Jacek.Kapica@up.lublin.pl
Katedra Podstaw Techniki
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 50A
20-280 Lublin