

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie
Wydział Inżynierii Produkcji

Rafał Szczytowski
Numer albumu 150768

Algorytm regulacji systemu nadążnego
względem pozycji Słońca
Sun tracking regulation algorithm

Praca inżynierska
na kierunku – Technologie Energii Odnawialnej

Praca wykonana pod kierunkiem
Dr. hab. inż. Pawła Obstawskiego
Katedra Podstaw inżynierii

Warszawa, 2014

Oświadczenie promotora pracy

Oświadczam, że niniejsza praca została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam, że spełnia ona warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie tytułu zawodowego.

Data

Podpis promotora pracy

Oświadczenie autora pracy

Świadom odpowiedzialności prawnej oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami.

Oświadczam również, że przedstawiona praca nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem tytułu zawodowego w wyższej uczelni.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja pracy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data

Podpis autora pracy

Streszczenie

Algorytm regulacji systemu nadążnego względem pozycji Słońca

Niniejsza praca zawiera informacje na temat stosowanych obecnie słonecznych systemów nadążnych wraz z przykładami ich użycia zasięgniętymi z literatury naukowej.

Obiekt badań stanowi stacja meteorologiczna znajdująca się na Wydziale Inżynierii Produkcji Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Głównym elementem jest charakterystyka stacji i poszczególnych jej elementów oraz algorytm działania zamontowanego tam układu śledzącego pozycję Słońca.

Po przeanalizowaniu działania układu śledzącego zaproponowane zostały modyfikacje dotychczasowego algorytmu. Przedstawione zostały proponowane przez autora niniejszego opracowania rozwiązania mające na celu poprawę jakości śledzenia.

Słowa kluczowe – meteorologia, śledzenie, nadążny, promieniowanie

Summary

Sun tracking regulation algorithm

This publication include information about currently used sun tracking methods with examples of use based on scientific literature.

The object to study is a meteorological station located at Warsaw University of Life Science at Production Engineering Faculty. The main part is characteristic of station elements and implemented sun tracking algorithm.

After analyzing algorithm there are solutions and modifications proposed. The goal is to achieve better sun tracking precision providing more reliable measurement results. Author presented both commercial and his own solutions.

Słowa kluczowe – sun tracking, meteorology, solar radiation

Spis treści

1. Wstęp.....	9
1.1 Pomiary promieniowania słonecznego.....	9
2. Przegląd literatury.....	11
2.1 Rodzaje systemów nadążnych	11
2.1.1 Systemy Pasywne	11
2.1.2 Systemy aktywne.....	12
2.1.3 Systemy Hybrydowe.....	18
3. Cel i zakres pracy	20
4. Charakterystyka obiektu badań	21
5.1 Wyposażenie stacji meteorologicznej na Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW.	21
5.1.1 Obrotnica	23
5.1.2 Pyranometr	25
5.1.3 Pyrheliometr	26
5.1.4 Uniwersalny regulator mikroprocesorowy LB-600 firmy LAB-EL	27
5.1.5 Moduł przekaźnikowy LB-475.....	28
5. Metodyka.....	29
6. Analiza pracy stanowiska przy zaimplementowanym algorytmie regulacji.....	30
6.1 Algorytm regulacji pracą stacji aktonometrycznej.....	30
6.2 Analiza jakości regulacji platformy nadążnej.....	32
7. Diagnostyka układu nadążnego	36
7.1 Modyfikacja struktury regulacji	36
7.2 Analiza porównawcza danych eksploatacyjnych z obliczeniami teoretycznymi.....	37
8. Propozycje optymalizacji pracy platformy nadążnej.....	40
8.1 Ręczna kalibracja.....	40
7.4 Zastosowanie dodatkowego urządzenia w celu kontroli pracy układu	40

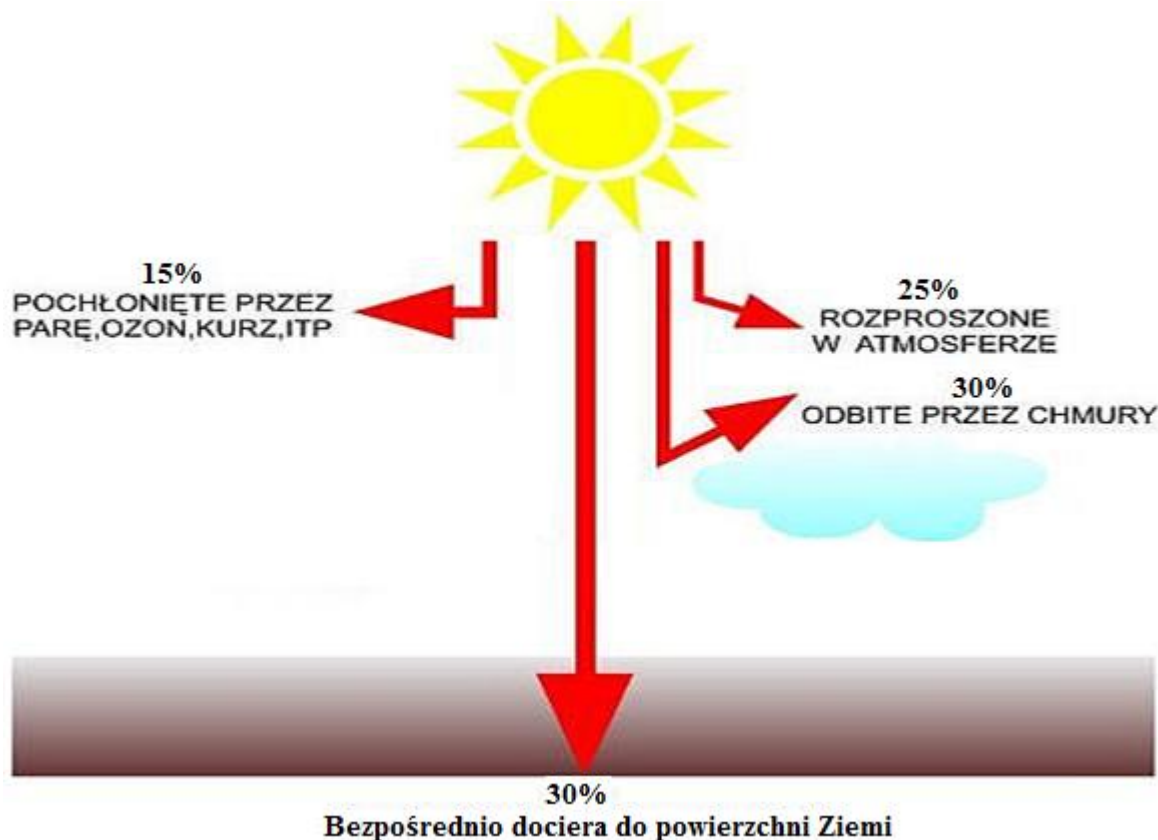
7.4.1 Układ kontrolujący.....	43
7.4.2 Układ alternatywny.....	43
7.5 Zastosowanie gotowego układu podążania oferowanego przez firmy komercyjne.	44
7.5.1 KEEP&ZONEN.....	44
8. Podsumowanie i wnioski	47
9. Literatura.....	48

1. Wstęp

1.1 Pomiary promieniowania słonecznego

Pomiary promieniowania słonecznego służyć mogą wielu celom. Przede wszystkim związane są z zyskami energetycznymi paneli fotowoltaicznych oraz kolektorów słonecznych.

Dziedzina zajmująca się pomiarami wielkości dotyczących promieniowania słonecznego to radiometria inaczej zwana aktynometrią. Promieniowanie słoneczne przenikając atmosferę ulega redukcji poprzez 3 zasadnicze zjawiska: odbijanie przez chmury, rozpraszanie przez cząsteczki powietrza, krople wody oraz absorpcji przez parę wodną, ozon, chmury i CO₂. Dostyc duża część (około 30%) docierającego do atmosfery promieniowania słonecznego jest odbijana przez chmury i kierowana z powrotem w przestrzeń kosmiczną. Kolejne 25% padającego promieniowania ulega rozproszeniu. Około 7% rozproszonego promieniowania powraca do kosmosu, natomiast 18% pada na powierzchnię Ziemi. Kolejne 15% promieniowania ulega absorpcji przez wieloatomowe cząstki znajdujące się w atmosferze. Bezpośrednio do Ziemi dociera więc około 30% promieniowania. [22]. Rozkład promieniowania docierającego do atmosfery obrazuje rysunek nr. 1.



Rys. 1. Rozkład promieniowania docierającego do atmosfery [www.art-gaz.com.pl].

Pomiar całkowitego promieniowania dokonywany jest za pomocą urządzenia zwanego pyranometrem. Rejestruje ono wszelkie promieniowanie słoneczne krótkofalowe docierające do jego kopuły (zakres pomiarowy podajemy więc w kącie bryłowym). [22]

Przyrządem służącym do pomiaru promieniowania bezpośredniego jest pyrhelioometr. Promieniowanie rozproszone wyliczane jest z różnicy pomiędzy pyrhelioemetrem a pyranometrem. Odpowiedni pomiar wykonany przez oba przyrządy jest więc niezbędnym warunkiem do uzyskania wartości promieniowania rozproszonego. Pyrhelioometry dzielić można na następujące grupy: [22]

- Etalony podstawowe (absolutne) typu ACR, CROM, PACRAD lub PMO
- Etalony wtórne I klasy Angstroma i Abbota
- Etalony odniesienia, II klasy i etalony robocze typu Gorczyńskiego, Michelsona Sawinowa, Janiszewskiego oraz nowoczesne termoelektryczne
- Pyrhelioometry szerokopasmowe typu Linke-Füessnera i Eppleya
- Fotometry

Pomiary pyrhelioemetrem realizowane są w sposób manualny lub automatyczny. O wiele prostszy ale mniej dokładny i kompleksowy jest pomiar ręczny. Polega on na ręcznym ustawieniu lunety pyrhelioometru, przez obserwatora, tak aby celowała ona dokładnie w tarczę słoneczną. Pomiar manualny wykonuje się w porze południa słonecznego podczas bezchmurnej pogody. Zmierzona wartość jest maksymalną w ciągu dnia.

Pomiar automatyczny polega na zamontowaniu pyrhelioometru na urządzeniu pozwalającym na poruszanie się w taki sposób aby luneta miernika przez cały dzień skierowana była na Słońce. Otrzymywany jest ciągły pomiar promieniowania bezpośredniego z całego dnia.

Na Wydziale Inżynierii Produkcji w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie pomiary promieniowania bezpośredniego wykonywane są automatycznie.

2. Przegląd literatury

2.1 Rodzaje systemów nadążnych

W literaturze znaleźć można wiele prac na temat śledzenia pozycji na niebie przez różne urządzenia. Są to jednak głównie panele fotowoltaiczne i heliostaty. Nie wymagają one tak wysokiej precyzji w pozycjonowaniu jak pyrliometr. Typy algorytmów, sposoby obliczania pozycji Słońca oraz mechanizmy sterujące są jednak bardzo podobne. Poniżej przedstawione zostały rodzaje stosowanych obecnie systemów.

Wszystkie systemy nadążne składają się z następujących elementów (nie jest konieczna obecność wszystkich naraz) [17]:

- Jeden lub dwa silniki- odpowiadają za fizyczne przemieszczanie układu
- Urządzenie światłoczułe – służą dokonywaniu pomiarów promieniowania lub wykrywaniu miejsc o większym promieniowaniu
- Źródło zasilania (autonomiczne w przypadku modułów PV)
- System podążania za Słońcem w trybie „kalendarzowym” – oparty na kontroli daty i czasu
- Ruch ciągły bądź „krokowy” – w zależności od wymaganej precyzji pracy układu
- Podążanie realizowane przez cały rok lub z wyłączeniem zimy – głównie w odniesieniu do paneli PV ponieważ zyski w okresie zimowym są niewspółmiernie mniejsze
- Regulacje kierunku, nachylenia – jedna lub 2 płaszczyzny obrotu (w zależności od wymaganej precyzji podążania)

Wypracowanych zostało kilka metod pozwalających na odpowiednie działanie urządzeń takich jak: panele fotowoltaiczne, koncentratory słoneczne, heliostaty, teleskopy czy właśnie pyrliometry. Doskonały system nadążny obejmuje kompensację ruchu Słońca po horyzoncie w ciągu dnia w obu płaszczyznach oraz sezonowe zmiany położenia Ziemi względem Słońca. Systemy te sklasyfikować możemy w 2 grupach: systemy pasywne – mechaniczne oraz aktywne – elektroniczne.[17]

2.1.1 Systemy Pasywne

Systemy pasywne bazują na rozszerzalności substancji (zazwyczaj gazów) pod wpływem temperatury lub na pamięci kształtu niektórych materiałów. Zazwyczaj ten typ

systemów bazuje na parach siłowników pracujących przeciwstawnie. Ruch takiego systemu wywoływany jest różnicą temperatur przeciwstawnych elementów. System dążąc do równowagi ustawia się w taki sposób aby obie jego strony miały taką samą temperaturę (taką samą ekspozycję na Słońce). Stan równowagi osiągany jest w momencie gdy Słońce świeci dokładnie na środek urządzenia. Systemy pasywne są mniej uniwersalne poprzez swoją mniejszą (w porównaniu do aktywnych) dokładność. Są jednak tańsze i wystarczająco dobrze sprawdzają się w niektórych rozwiązaniach. Nie są jednak zbyt szeroko stosowane [17].

Poniżej przykłady zastosowania systemów pasywnych:

- Pierwszy, całkowicie mechaniczny, system podążający wprowadzony przez Finstera w 1962r. [17]
- Opisany przez Clifforda i innych system mechaniczny modelowany przez komputer. Ich urządzenie składało się z 2 bimetalicznych pasków zrobionych ze stali i aluminium. Były one symetrycznie rozmieszczone na drewnianej ramie [17].
- Wykonany przez Mwithingę i innych system zbudowany ze stalowej płyty uformowanej w kosz do suszenia kawy [17].
- Zaprojektowany przez Poulka 1-osiowy system bazujący na stopach metali z pamięcią kształtu. Zdeformowany element wracał do swojego pierwotnego kształtu pod wpływem promieniowania słonecznego na które był wystawiony [17].

2.1.2 Systemy aktywne

Systemy aktywne mogą bazować na [17]:

- Mikro-procesorach oraz elektryczno-optycznych czujnikach
- Kontroli czasu i daty
- Pomocniczych ogniwach słonecznych
- Kombinacjach trzech powyższych rozwiązań

2.1.2.1 Systemy elektryczno-optyczne oraz mikroprocesorowe

Elektryczno-optyczne systemy zazwyczaj zbudowane są z przynajmniej 1 pary równoległych połączonych foto-rezystorów lub ogniw fotowoltaicznych. Elementy te, poprzez równomierne natężenie promieniowania padającego na nie są w stanie równowagi. Przemieszczenie się Słońca względem systemu podążającego powoduje silniejsze oświetlenie 1 z elementów. Układ dążąc do równowagi uruchamia silnik odpowiedzialny za jego

przemieszczanie i ustawia się w takiej pozycji aby oba czujniki były równomiernie oświetlone. Odnosi się to zarówno do regulacji azymutu jak i elewacji. Systemy elektryczno-optyczne są dokładne ale dosyć drogie [17].

Systemy te zdecydowanie lepiej nadają się do precyzyjnej regulacji urządzeń pomiarowych. Poniżej zostanie przytoczone kilka zastosowań wyżej opisanych układów:

- Saaverdra w 1963 zaprezentował mechanizm z automatyczną, elektroniczną kontrolą służący do pozycjonowania pyrhelometru Eppley.[17]
- Abdallah i inni [2] zaprojektowali i skonstruowali 2-osiowy system w zamkniętej pętli kontrolowany przez sterownik PLC. Opierał się on na dwóch silnikach operujących każdy w swojej płaszczyźnie. Podzielono dzień na cztery okresy ze względu na szybkość z jaką Słońce „porusza się” po nieboskłonie. Sterownik wymuszał cztery różne szybkości działania dla silników w zależności od pory dnia.
- Rumyantsev i inni [23] zaprojektowali i skonstruowali system podążania z zamkniętą pętlą dla 1kW instalacji słonecznej. Opierała się ona na 2 elementach bazowych. Platforma, zamontowana na 2 biernych i 1 czynnym kole, odpowiedzialna była za regulację azymutu. Silnik sterujący włączał się na kilka sekund w odpowiednich odstępach czasowych. Regulacja elewacji odbywała się poprzez ramy zamontowane do platformy poruszające się w obrębie 45° od płaszczyzny w której zostały zamontowane.
- Konar i inni [16] zaprojektowali 1-osiowy oparty na mikroprocesorze system podążania. Był on optymalnie przytwierdzony w określonym nachyleniu i podążał za Słońcem w płaszczyźnie poziomej.
- *Al.-Mohamad* [5] zaprojektował 1-osiowy system podążania oparty na sterowniku PLC. Zaimplementował go do panelu PV. Użył on 2 foto-rezystorów oddzielonych wystającą poza powierzchnie panelu płytką. Płytką wytwarzała cień na 1 z rezystorów w momencie gdy panel nie był ustawiony prostopadle do promieni słonecznych. Rezystory, podłączone do sterownika, wysyłały sygnał zależny od swojej rezystancji. Sterownik analizował sygnały i na wyjściu emitował odpowiednią wiadomość do elektro-mechanicznego systemu sterowania służącego do przemieszczania panelu.
- Abu-Khader [3] skonstruował system oparty na sterowniku PLC. Składał się on z 2 sterowników. Pierwszy służący do obracania panelu PV w płaszczyźnie

pionowej, drugi do ustawiania azymutu. Sterownik PLC był programowany w zależności od kąta padania promieni słonecznych (cztery różne programy w ciągu roku).

- Bingol i inni [6] zaproponowali, zaimplementowali i przetestowali 2-osiowy układ bazujący na mikrokontrolerach. Użyli również fotorezystorów, czujników światła oraz silników krokowych. System podłączony był do komputera w celu podglądu efektów. Układ miał wbudowany zegar z generatorem sygnału.
- *Peterson i inni* [18] – system oparty na mikrokontrolerach. Dodatkowo, jako urządzenia wykonawcze, dwa bipolarne silniki krokowe poruszające panele PV. Do sterowania używano 3 różnych algorytmów podążania za Słońcem. Jeden z algorytmów polegał na wymuszeniu takiego ruchu panelu PV aby zataczał on coraz mniejsze okręgi a następnie wybierał punkt o maksymalnym promieniowaniu na podstawie mierzonych wartości napięcia na panelu. Drugi algorytm poruszał panelem po kwadratach szukając kierunku o najwyższym napięciu i w konsekwencji tam kierował panel. Pętle takie wykonywane było co 1 godzinę. Trzeci algorytm jakiego w tym układzie używano bazował na algorytmie drugim i poprzez analizę wybranych punktów maksymalnych z każdej godziny wyznaczał w przybliżeniu dzień w roku aby następnie móc przewidywać położenie Słońca.
- Swój układ śledzący skonstruowała również firma Girasolar [10]. Był to układ programowalny, 2-osiowy z prędkością obrotu w płaszczyźnie azymutu 0,5rpm oraz w płaszczyźnie pionowej 0,06rpm. Maksymalny błąd tego układu to 2°.
- Przenośny układ śledzący został zbudowany na Uniwersytecie w Teksasie [9]. Opierał się on na mikrokontrolerze PLC, trzech połączonych ramionach roboczych oraz 3 silnikach sterujących. Uzyskano zwiększenie zysku energetycznego z panelu PV o około 30%.
- Hamilton [11] zaprojektował i skonstruował system oparty na mikrokontrolerach używający 2 silników do podążania za Słońcem na 2 płaszczyznach. Algorytm skonstruowano tak, aby odczytywał i wzmacniał dane z czujników a następnie porównywał je cyfrowo w celu ustalenia pozycji Słońca na niebie i uruchamiał silniki pozycjonujące. Ciekawostką w tym rozwiązaniu były użyte czujniki. Były to czworoboczne piramidy z

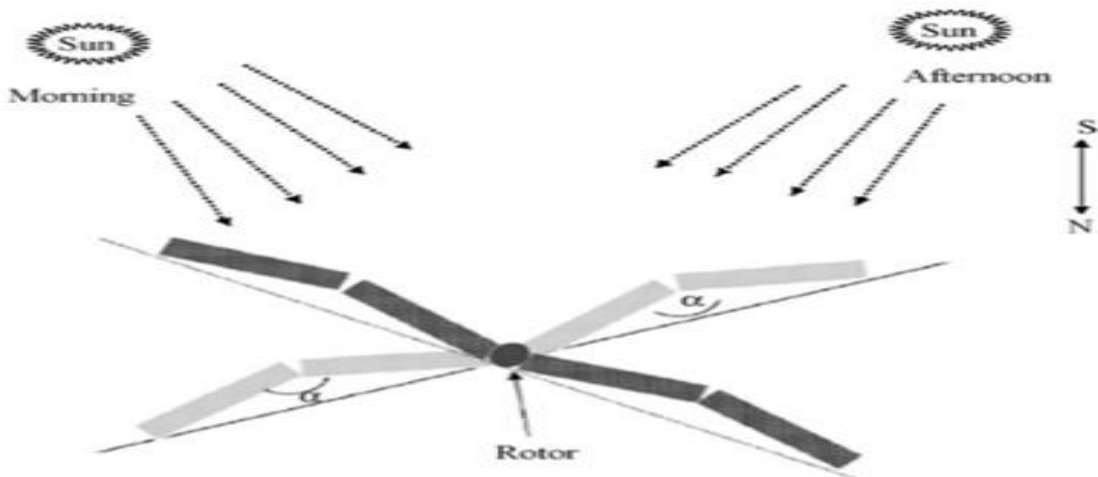
zamontowanymi panelami słonecznymi na każdej ze ścian. Całość zaprogramowana była w języku C. Testy laboratoryjne i terenowe wykazały pełną skuteczność dla panelu PV.

- Jinayim [13] zaprojektował system używający tylko 1 fotorezystora, zamkniętego w czarny pudełku, z małym otworem umiejscowionym tak, żeby wpuszczał światło tylko wtedy gdy pada ono pod kątem prostym na pudełko. W ten sposób ograniczył ilość czujników i uprościł konstrukcję.
- Huang [12] zaprojektował i rozwinął 3-pozycyjny system. Polegał on na ustaleniu trzech stałych pozycji dla układu śledzącego, zależnie od pory dnia. Tak aby przy minimalnym nakładzie energii i maksymalnym uproszczeniu układu możliwa była znaczna poprawa zysków energetycznych. System składał się z panelu PV, czujników pozycji, elementów światłoczułych oraz silnika.

2.1.2.2 Systemy oparte na pomocniczych ogniwach PV

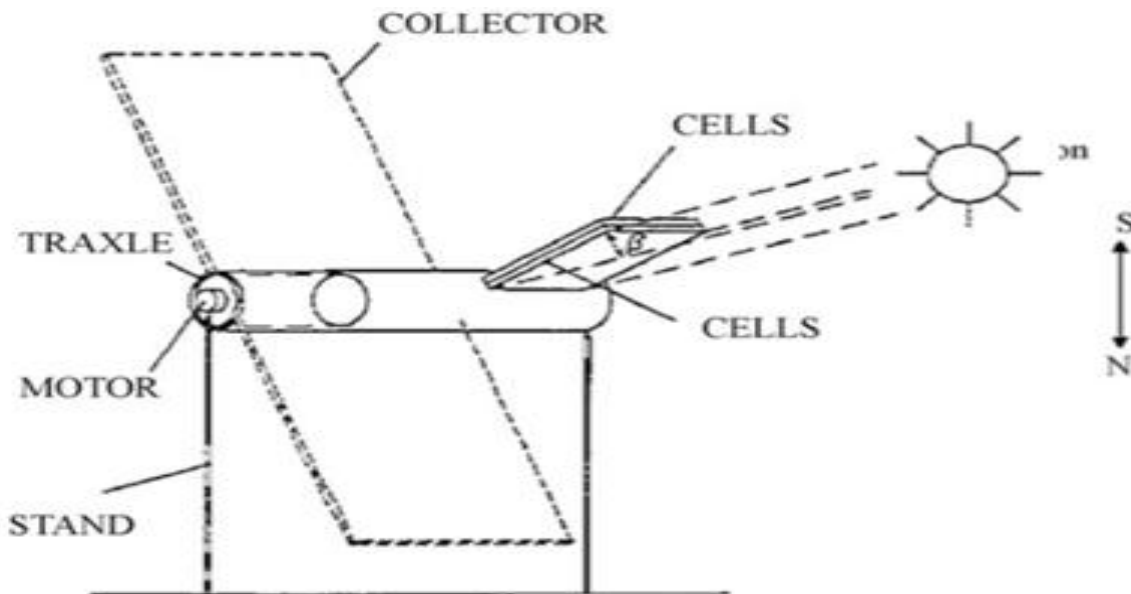
Systemy oparte na pomocniczych ogniwach słonecznych działają analogicznie do systemów elektryczno-optycznych (rolę czujników przejmują ogniwa). Zaletą tego rozwiązania w porównaniu z poprzednim jest możliwość czerpania energii potrzebnej do zasilania silników sterujących prosto z paneli PV. Poniżej przedstawiono przykładowe zastosowania takich systemów:

- Karimov [14] skonstruował 1-osiowy system podążania w płaszczyźnie poziomej. Schemat układu przedstawiono na rysunku nr. 2. Pionowo ręcznie ustawiano kąt 23° , 34° lub 45° . Panele słoneczne były podzielone na dwie pary ustawione niemal w jednej linii (odchylone względem siebie o 170°). Główne moduły używane były zarówno do pozyskiwania energii jak i naprowadzania układu. Moduły połączone były do pętli poprzez mostek podobny do mostka Wheatstonea. Silnik uruchamiał się gdy napięcia na modułach nie były sobie równe. System pozyskiwał wówczas 30% energii więcej.



Rys. 2. Schemat poglądowy układu nadążania za pozycją Słońca [14].

- Poulek [19] zaprojektował przedstawiony na rysunku nr. 3. system bazujący na podobnych zasadach. Zakładał on bezpośrednie podłączenie do silnika, używanie tych samych paneli do pozyskiwania energii jak i wykrywania pozycji Słońca. System działał w płaszczyźnie pionowej, zakładał ustawienie panelu na południe.



Rys. 3. Szkic układu zaprojektowanego w 1998 roku [19].

2.1.2.3 Systemy oparte na kontroli czasu i daty

Systemy oparte na kontroli czasu i daty informację o konieczności zmiany pozycji otrzymują z komputera z zaimplementowanym algorytmem astronomicznym obliczającym pozycje Słońca na niebie. Algorytm ten opiera się o dostarczony mu czas, datę oraz pozycje

geograficzną urządzenia. Systemy najczęściej stosowane przy pozycjonowaniu pyrliometrów oraz innych urządzeń pomiarowych ze względu na niskie koszty. Poniżej zostanie przytoczonych kilka przykładów takich systemów:

- Canada i inni [8] zaprojektowali i skonstruowali system z maksymalnym błędem rzędu 2° . Służył on pomiarom promieniowania słonecznego o długości fali 110-330 nm. Założeniami systemu był relatywnie niski koszt oraz możliwość bezobsługowej pracy przez co najmniej tydzień. Układ poruszany był przez silnik krokowy z redukcją przełożenia pozwalającą na dopasowanie „kroku” silnika do wymaganego przesunięcia. Silnik sterowany był przez specjalny, zaprojektowany dla niego panel podłączony do komputera. Użyto również punktów odniesienia – zamocowanych na stałe aluminiowych znaczników – jeden w płaszczyźnie pionowej – oznaczający horyzont oraz jeden w płaszczyźnie poziomej – oznaczający północ. Oprogramowanie napisane zostało w języku C++. Obejmowało ono poruszanie się układu względem Słońca, kontrolę silnika, powrót do pozycji początkowej po zachodzie Słońca, alarmy, aktywacje, dezaktywacje czujników pomiarowych.
- Alata i inni [4] przedstawili równania opisujące ruch Słońca po horyzoncie oraz trzy typy wielozadaniowych systemów podążających. Równania opierają się na azymucie, elewacji, deklinacji słonecznej, kątach godzinowych i zasadach funkcji „jeżeli”. Wynikiem obliczeń i symulacji były reguły używające danych wejściowych w postaci dnia oraz godziny. Algorytm działał dla określonego miejsca na ziemi dla którego był liczony.
- Abdallah [1] użył sterownika PLC połączonego z komputerem oraz silnikiem elektrycznym. System ten podążał za pozycją Słońca jedynie w płaszczyźnie poziomej. Ustawiano odpowiednią prędkość silnika w zależności od obecnej godziny. System pracował na czterech różnych „biegach”. Poprawa wydajności zależna była od pory dnia (około 40% w południe, około 20% wieczorem)
- Khlaichom i inni [15] przedstawili system podążania za Słońcem w zamkniętej pętli. Polikrystaliczne czujniki przetwarzały promieniowanie słoneczne na napięcie i przekazywały sygnał do układu sterującego. Następnie generowany był odpowiedni prąd który powodował ruch silnika. W transmisji danych uczestniczył również komputer PC.

- Blanco-Muriel [7] przedstawił porównanie czterech algorytmów podążania za Słońcem. Uznał, że ich dokładność i oszczędność może się jeszcze poprawić. Zaprezentował własny algorytm nazwany PSA. Był on oparty na otwartej pętli i sterowany mikroprocesorami. Badania wykazały wyższą dokładność nowego algorytmu (w porównaniu do badanych algorytmów w tym algorytmu Michalskiego).
- Rózdzyński [22] - Podstawa nadążna opracowana w Światowym Centrum Promieniowania w Davos dla szwajcarskiej służby meteorologicznej. Urządzenie oparte jest na podstawie śledzącej z silnikiem sterowanym przez mikroprocesor. Mikroprocesor opiera swój sygnał wyjściowy na obliczeniach z równania czasu który co 1 sekundę ustala pozycję Słońca na niebie. Pomiary z pyrhelometru oraz innych urządzeń są na bieżąco rejestrowane i gromadzone. Urządzenie raz w roku wymaga recalibracji aby pomiary były jak najdokładniejsze.

2.1.3 Systemy Hybrydowe

Istnieją również systemy łączące algorytmy astronomiczne z danymi z czujników. Poniżej zostanie przedstawionych kilka przykładów zastosowania takich rozwiązań:

- *P.Roth, I inni* [21]. Zaprojektowano 2-osiowy system podążania za Słońcem który powstał na Uniwersytecie Technicznym Federico Santa Maria w Chile. System ten wyposażono w pyrhelometr Eppley. Mechanizm poruszał się w dwóch płaszczyznach: poziomej - wschód-zachód oraz pionowej, zwanej elewacją. Na platformie nadążnej zainstalowano potencjometr pozwalający na określenie obecnej pozycji układu oraz wyłączniki na końcach platformy pozwalające określić maksymalne wychylenia. Nad pyrhelometrem zamontowano czujnik określający początek każdego dnia i przekazujący tę informację do reszty układu aby rozpoczął on pracę. Układ poruszany był przez dwa silniki, każdy o mocy 3W. Po przekazaniu przez czujnik dnia informacji, że należy rozpocząć podążanie, układ wchodził w tryb „szukanie”. Obliczana była wówczas pozycja Słońca na niebie i układ przesyłał do silników sterujących odpowiednie sygnały o pozornej pozycji Słońca. Po ustawieniu się w obliczonej pozycji układ przełączał się w tryb „podążanie”. W tym trybie główną rolę odgrywał specjalny czujnik zamontowany w lunecie pyrhelometru składający się z 4 foto-diod. Czujnik ten podzielony był na 4 strefy i każda z nich przekazywała do układu sterowania odpowiednie napięcie

zależne od promieniowania które na nie padało. Porównanie tych wartości pozwalało na określenie kierunku w którym „poruszyło się” Słońce i przesunięciu platformy nadążnej w tą samą stronę. Takie porównanie wykonywane było w określonych interwałach czasowych. Pozwalało to na dobre podążanie za Słońcem w bezchmurnych warunkach. Zachmurzenie powodowało bezużyteczność metody opartej na tym czujniku. W takich przypadkach, gdy system wykrywał nagłe zmiany mierzonego promieniowania, ponownie przełączał się w tryb pracy oparty na obliczaniu pozycji Słońca przez algorytm zwany „szukanie”. Zastosowane rozwiązania pozwalały na stabilną pracę układu.

- Zaprojektowany i wykonany przez *Rotha i innych* [20] w roku 2004, 2-osiowy system podążający. Jako urządzenia pomiarowego użyto pyrliometru. Do komputera PC wysyłane były sygnały o ruchu platformy podążającej (aby znać dokładnie jej położenie). Podczas pracy w systemie „geograficznym” system ustawiał się w pozycji wyliczanej przez algorytm podążający sprzężony z zegarem wewnętrznym urządzenia. Błędy pomiędzy teoretycznym (wyliczonym) a rzeczywistym (przekazanym przez czujnik położenia) położeniem platformy śledzącej były zapisywane do celów późniejszej analizy. Każdy kolejny dzień pomiarowy był poprawiany względem poprzedniego w celu uzyskania jak największej dokładności. Można więc stwierdzić, że system „uczył się”. Po tym jak system astronomicznie znalazł już Słońce na niebie, starał się podążać za nim aktywnie, śledząc wzrost lub spadek wartości promieniowania. Jeśli pomiar zaczynał zbyt odchodzić od pomiaru dnia poprzedniego przełączano system na tryb astronomiczny. Dla porównania pomiary prowadzono równoległe trzema innymi pyrliometrami na dwóch różnych platformach śledzących firmy INTRA. Badania wykazały dobre, porównywalne wyniki przy około 75-krotnej różnicy w cenie na rzecz nowo projektowanego urządzenia.

3. Cel i zakres pracy

Pomiar promieniowania całkowitego oraz bezpośredniego umożliwia wyliczenie składowej rozproszonej promieniowania słonecznego. O ile pomiar promieniowania całkowitego nie wymaga całkowitej eliminacji uchybu regulacji, o tyle w przypadku pomiaru składowej bezpośredniej uchyb regulacji powinien wynosić zero. Oznacza to, że w celu pomiaru składowej bezpośredniej pyrliometr musi trafić w tarczę słoneczną. Eliminacja uchybu regulacji wymaga zatem precyzji zarówno zaimplementowanego algorytmu regulacji platformy nadążnej jak i urządzeń wykonawczych. Celem niniejszej pracy jest analiza jakości regulacji platformy nadążnej pozycji Słońca. Realizacja głównego celu pracy wymaga analizy parametrów pracy platformy nadążnej stanowiącej segment stanowiska aktynometrycznego znajdującego się na terenie Wydziału Inżynierii Produkcji Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Analiza przeprowadzona zostanie na podstawie zarejestrowanych danych eksploatacyjnych. W przypadku niedostatecznej jakości regulacji podjęta zostanie próba określenia i wyeliminowania jej przyczyn.

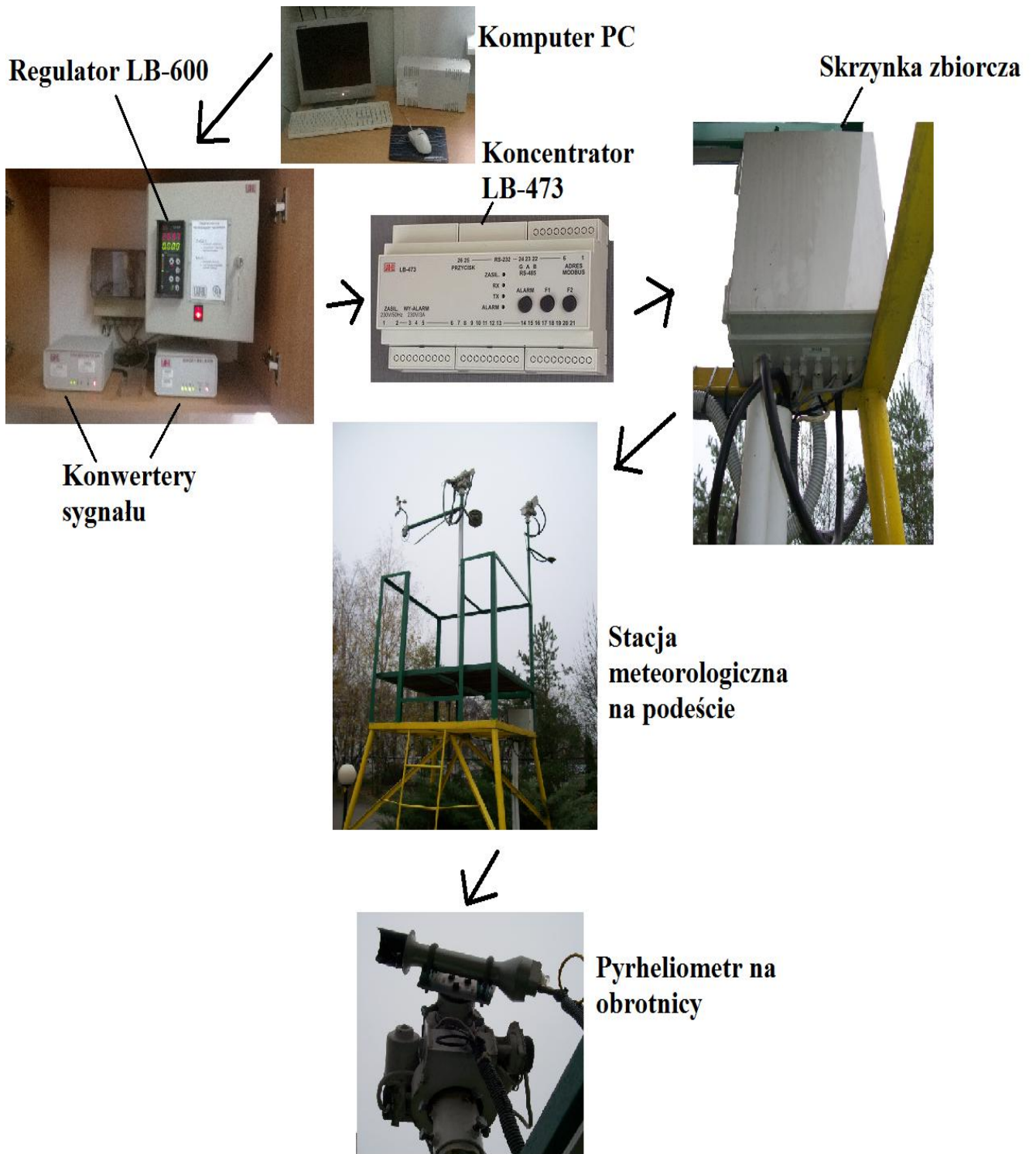
4. Charakterystyka obiektu badań

4.1 Wyposażenie stacji meteorologicznej na Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW.

Na wyposażenie stacji meteorologicznej na Wydziale Inżynierii Produkcji składają się:

- Urządzenia pomiarowe
 - wiatromierz
 - pyrliometr
 - pyranometry
 - termometr
 - termohigrometr
- urządzenia sterujące i wykonawcze
 - obrotnica
 - regulator LB-600
 - urządzenia komunikacji
 - komputer PC

Poniżej przedstawiona zostanie budowa oraz sposób działania platformy nadążnej oraz zamontowanych na niej urządzeń oraz schemat stacji aktonometrycznej wraz z urządzeniami sterującymi (rys. nr. 4.) .



Rys. 4. Elementy stacji meteorologicznej WIP SGGW [fot. własne]

4.1.1 Obrotnica

Rotor RAS (rys.5) jest urządzeniem firmy SPID Elektronik i stosowany jest do obrotu konstrukcji lekkich jak i do ciężkich anten krótkofalowych. Oparty jest na przekładni ślimakowej, ze ślimakiem i ślimacznicą wykonanymi ze stali (rys. nr. 6.). Cechy te gwarantują długotrwałą pracę i wytrzymałość urządzenia. Powierzchnia urządzenia pokryta jest lakierem proszkowym, skutecznie zabezpieczającym przed korozją. Zakres obrotu wynosi 360 ± 15 stopni i zabezpieczony jest elektrycznymi wyłącznikami krańcowymi. Pełny czas obrotu wynosi 90 sek. Rotor zasilany jest prądem stałym o napięciu 12V-18V. Jego masa to około 8kg a moment obrotowy to 180 Nm [27].



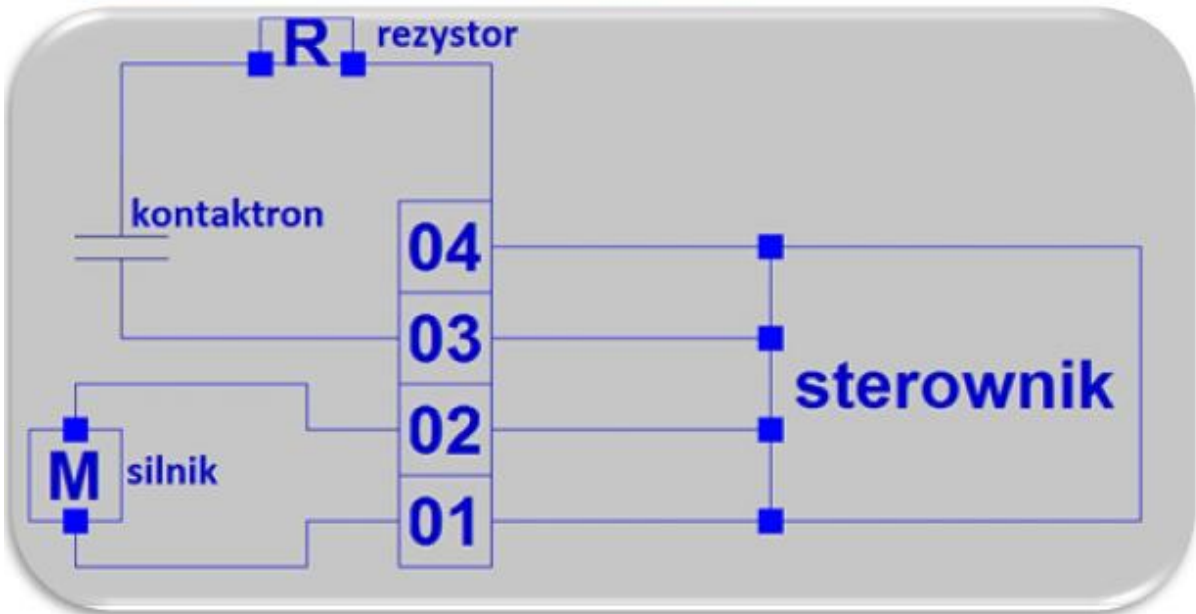
Rys. 5. Obrotnica RAS wraz z zamontowanymi na niej urządzeniami [fot. Własne]

Zasada działania silnika opiera się na odpowiedniej konstrukcji przekładni ślimakowej oraz na kontaktronie (rys. nr. 7.) który zwiera się za każdym razem gdy obrotnica pokona

dystans 1 impulsu. Przekładnia wyskalowana jest tak, że 1 impuls to 0,66 stopnia obrotu. Wszystko opiera się na kontakcie pomiędzy obrotnicą a sterownikiem i występującym tam sprzężeniu zwrotnym. Po otrzymaniu ilości impulsów o jakie należy przemieścić obrotnicę, na odpowiednio długi czas uruchamiany jest silnik prądu stałego a obrotnica zaczyna się przemieszczać. Kontaktron stykając się odpowiednią ilość razy wysyła informacje o ilości zaistniałych impulsów do sterownika by ten „wiedział” w jakim położeniu znalazła się obrotnica. Umożliwia to również ewentualną korekcję w regulacji.



Rys. 6. Przekładnia ślimakowa obrotnicy [27]

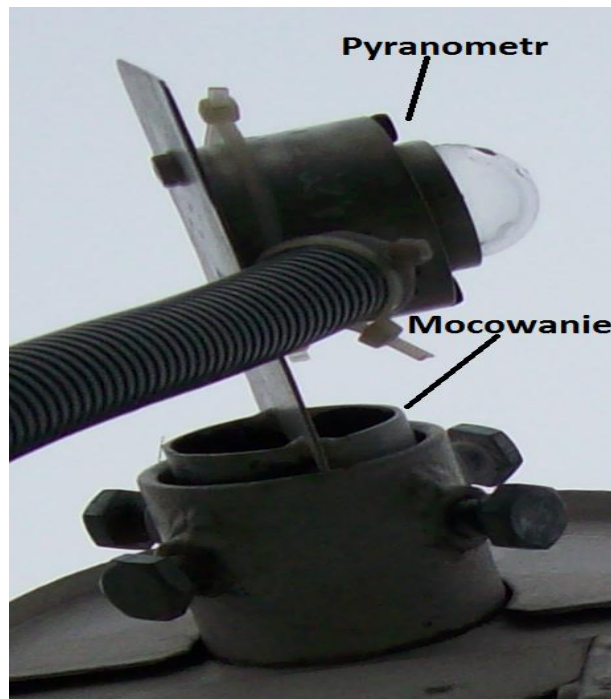


Rys. 7. Podłączenie rotora do układu sterowania oraz silnika. Schemat (na dole) + widok rzeczywisty (na górze) [27]

4.1.2 Pyranometr

Keep&Zonen CM 4 (rys. nr. 8.) jest to jeden z podstawowych pyranometrów holenderskiej firmy. Służy on do pomiarów zarówno słonecznego jak i sztucznie

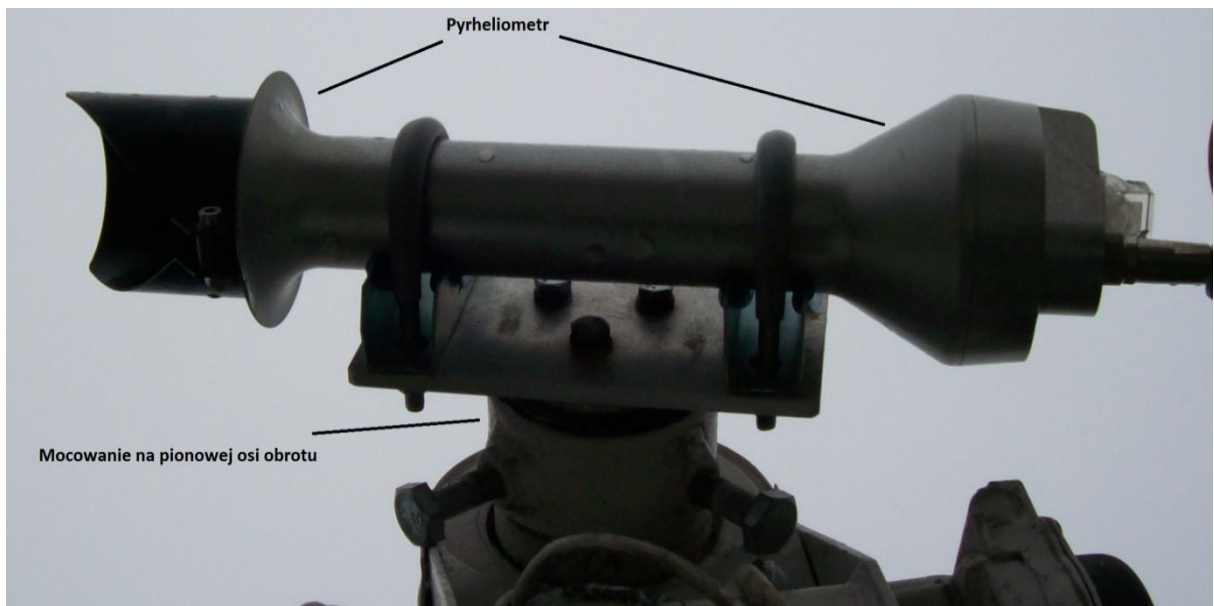
generowanego promieniowania. Pracuje on w zakresie temperatur od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ i mierzy promieniowanie o wartości do 4000 W/m^2 o długości fali z zakresu $300 - 2800\text{ nm}$. Czas odpowiedzi urządzenia wynosi około 8 sekund a kąt widzenia pełne 180° .



Rys. 8. Pyranometr wraz z mocowaniem pozwalającym na obrót w osi pionowej [fot. własne]

4.1.3 Pyrheliometr

Keep&Zonen CHP1 (rys. nr. 9.) jest to pyrheliometr zgodny z normami ISO oraz zaleceniami WMO. Kalibrowany w porozumieniu z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Mierzy promieniowanie o długości fali od 200 do 4000 nm Czas reakcji urządzenia na zmianę promieniowania to 5 s . Kąt widzenia to około 5° . Zalecany przez producenta maksymalny błąd w śledzeniu to 0.75° . Maksymalny błąd wartości promieniowania to 1% całkowitej dziennej wartości.



Rys. 9. Pyrheliometr wraz z mocowaniem pozwalający na obrót w osi pionowej [fot. własne]

4.1.4 Uniwersalny regulator mikroprocesorowy LB-600 firmy LAB-EL

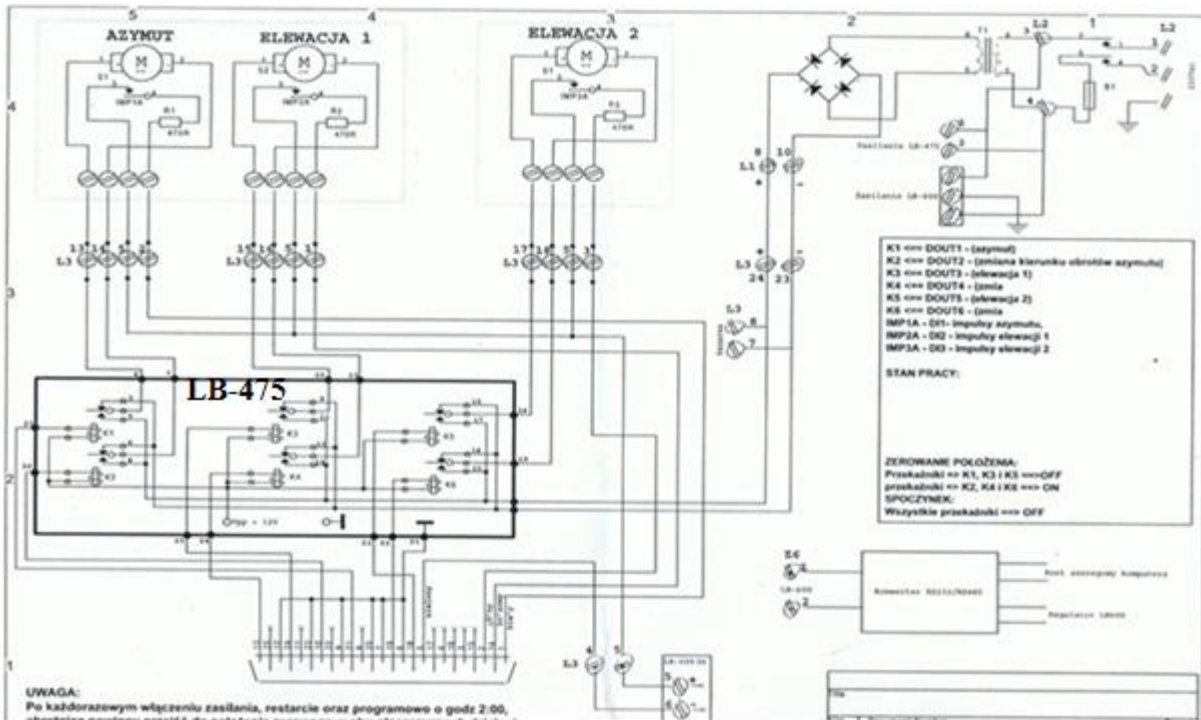
Jest to uniwersalny regulator przemysłowy posiadający, jak podaje producent, szeroki zakres algorytmów regulacji takich jak funkcje logiczne, czasowe, regulacja PID, funkcje specjalne dla cukrownictwa, ciepłownictwa, klimatyzacji oraz funkcje astronomiczną do obliczania pozornej pozycji Słońca w zależności od dnia i godziny. Regulator ma konstrukcję modułową co pozwala na ewentualną wymianę czy modyfikacje poszczególnych modułów. Poza funkcjami predefiniowanymi posiada on możliwość zaprogramowania funkcji użytkownika. Można to zrobić, z pewnymi ograniczeniami, za pomocą samego urządzenia, lub w bardziej komfortowy sposób za pomocą oprogramowania instalowanego na komputerze. Do programowania wykorzystywany jest prosty „język” bloczkowy.



Rys. 10. Regulator LB-600 [26]

4.1.5 Moduł przekaźnikowy LB-475

Jest to urządzenie firmy LAB-EL wykonane specjalnie dla stacji meteorologicznej na Wydziale Inżynierii Produkcji SGGW. Występuje w 1 egzemplarzu. Pełni funkcje modułu przekaźnikowego. Schemat podłączeń widoczny poniżej (rys. nr. 11).



Rys. 11. Schemat podłączenia modułu przekaźnikowego LB-475 [materiały SGGW]

5. Metodyka

Metodyka opierać się będzie na analizie wykresów sporządzanych w programie obsługującym stacje meteorologiczną – LBX firmy LAB-EL. Analizowane będą następujące typy wykresów:

- Wykresy porównawcze pomiarów z urządzeń zamocowanych na stałe z urządzeniami poruszającymi się na platformie nadążnej. Promieniowanie bezpośrednie stanowi około 60% promieniowania całkowitego [22]. Wartość ta jest inna dla różnych pór roku i różnych rodzajów pogody. Dla słonecznego, letniego dnia promieniowanie bezpośrednie może wynosić około 80% całkowitego. Natomiast w zimie, podczas zachmurzenia jedynie kilka procent. Należy przeanalizować czy w zarchiwizowanych pomiarach wspomniana proporcja jest zachowana przez cały dzień.
- Wykresy porównawcze impulsów obliczanych przez algorytm oraz faktycznie wykonywanych przez obrotnicę. Pierwsza wartość to przeliczona ze stopni pozycja Słońca na niebie. Jest ona przekazywana do obrotnicy aby ta przemieściła się o odpowiedni kąt w celu skierowania lunety pyrliometru dokładnie na Słońce. Druga wartość to odległość (w przeliczeniu na stopnie) jaką obrotnica rzeczywiście pokonała. Należy przeanalizować rozbieżności pomiędzy wyżej wymienionymi wartościami. Różne wartości przesunięcia obliczonego oraz faktycznie wykonanego mogą być źródłem błędów w pracy układu.
- Wykresy różnic impulsów na przekroju godzin/dni/tygodni mające na celu zobrazowanie tego jak działanie układu przedstawia się na przestrzeni krótszych oraz dłuższych przedziałów czasowych.

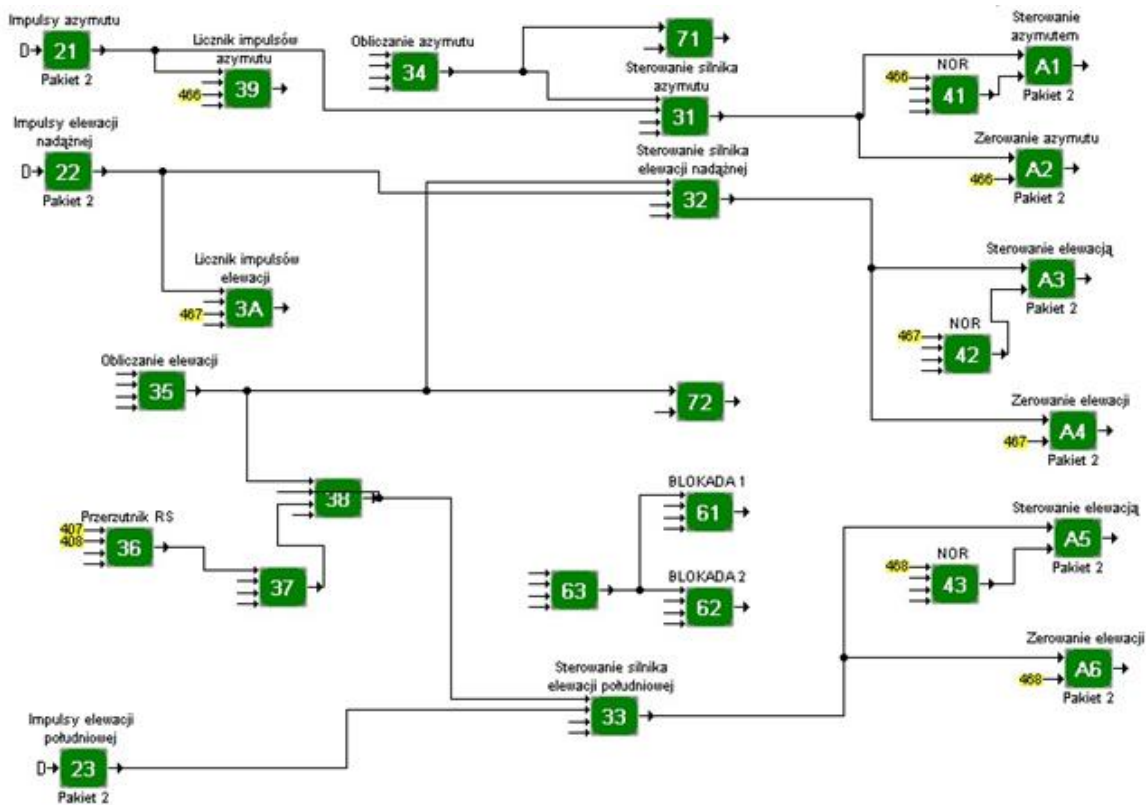
6. Analiza pracy stanowiska przy zaimplementowanym algorytmie regulacji.

6.1 Program obsługujący regulację platformy nadążnej

Wyznaczenie położenia Słońca oraz regulacja układu nadążnego odbywa się według przedstawionego poniżej algorytmu działania zaimplementowanego w regulatorze LB-600.

Regulator ten ma wbudowaną funkcję wyliczania pozycji Słońca na podstawie tablic astronomicznych. Użytkownik nie ma możliwości ingerencji w tą funkcję, podaje jedynie współrzędne geograficzne stacji meteorologicznej. Czas i data pobierane są z wewnętrznego zegara.

Zaimplementowany algorytm regulacji śledzenia pozycji Słońca przez obrotnicę przedstawiony został na rysunku nr. 12.



Rys. 12. Algorytm pracy regulatora LB-600 dostarczony przez producenta [materiały SGGW]

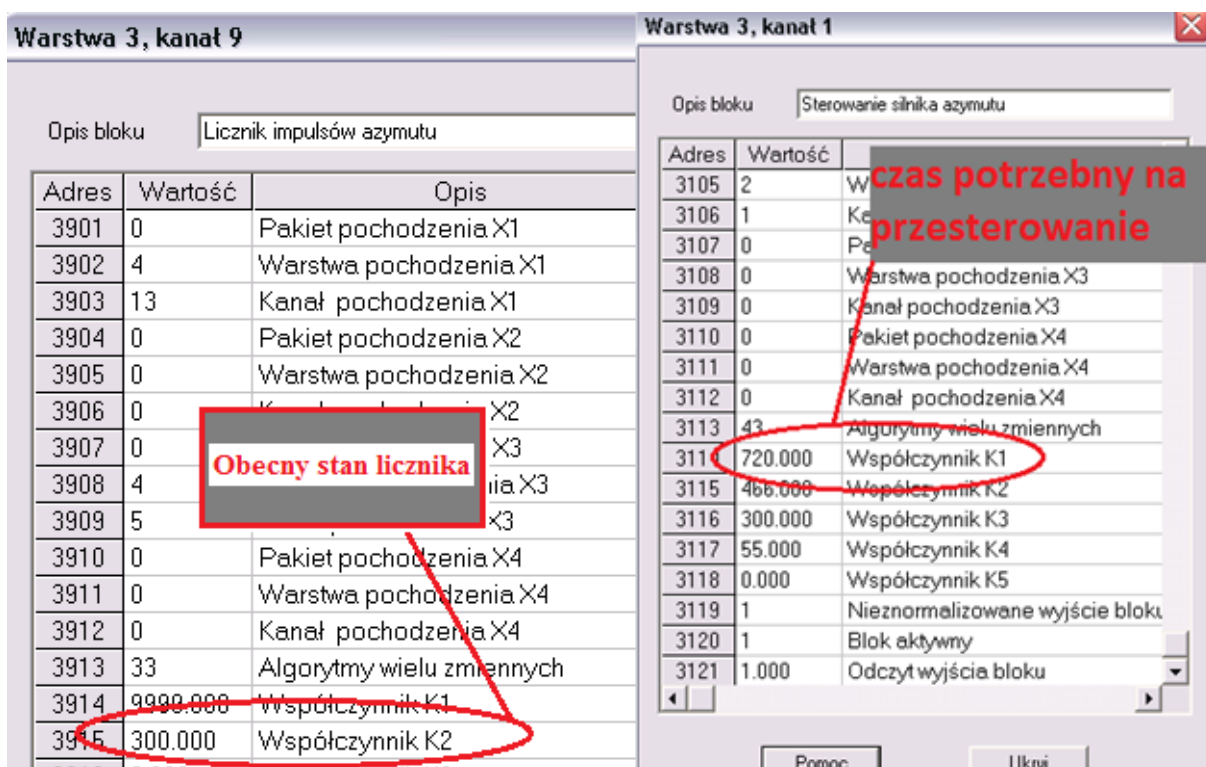
W algorytmie można wyróżnić 3 „ścieżki”.

- Zaczynająca się od bloku '21' odpowiedzialna za poruszanie się całej platformy w płaszczyźnie poziomej (azymutalnej). Blok '21' jest wejściem na którym pojawiają się impulsy informujące o przesunięciu platformy śledzącej. Liczba impulsów jest zliczana przez licznik zaimplementowany w bloku '39'. Blok '34' odpowiedzialny jest za wyliczenie pozycji Słońca, informacjami jakie należy podać są szerokość i długość geograficzna. Następnie blok '31' korzystając z informacji o przełożeniu zastosowanej przekładni (podanej jako liczba impulsów potrzebnych do pełnego obrotu (rys.13 po prawej)) oraz porównując impulsy wyliczone przez bloki '39' oraz '34' ustala kierunek oraz czas przemieszczania się platformy śledzącej. Układ ten dąży do wyrównania teoretycznej pozycji Słońca (blok '34') z rzeczywistą pozycją platformy śledzącej (blok '39'). Bloki 'A1' oraz 'A2' są blokami wykonawczymi (wyjściami dyskretnymi). Jedno z nich jest aktywowane aby przesunąć układ w odpowiednim, ustalonym wcześniej kierunku.
- Pozostałe 2 ścieżki działają analogicznie do pierwszej. Ścieżka zaczynająca się od bloku wejścia '22' a kończąca się na blokach wykonawczych 'A3' i 'A4' odpowiada za kąt nachylenia pyrhelionometru (elewację). Natomiast ścieżka z blokiem wejściowym '23' oraz elementami wykonawczymi 'A5' i 'A6' odpowiada za elewację pyranometru.

Każdej doby, o godzinie 2:00 układ powraca do swojego położenia początkowego, którym jest północ geograficzna. Pozwala to na wyprostowanie przewodów oraz zapobieganie nawarstwianiu się błędów z dni poprzednich. Regulator poprzez protokół RS232 komunikuje się z systemem SCADA, zaimplementowanym na komputerze PC, pozwalającym na archiwizację oraz podgląd mierzonych przez układ wartości oraz metadanych.

Poniżej przedstawiony został przykład działania wyżej opisanej regulacji:

- Na liczniku impulsów (blok '39') widnieje wartość 300 (rys. nr 13 po lewej). Oznacza to, że jak dotąd układ przesunął się o 150 stopni od wartości '0' jaką jest północ. Na bloku '31' widnieje wartość 152. Oznacza to, że teoretyczna pozycja Słońca ma azymut 152 stopnie, czyli jest 152 stopnie na prawo od kierunku północy. Blok '34' na podstawie tych dwóch informacji oraz informacji, że 720 impulsów = 360 stopni (rys. nr 13 po prawej) czyli 1 stopień = 2 impulsy wylicza różnicę. $152 - 150 = 2$ stopnie = 4 impulsy. Wartość dodatnia świadczy o tym, że platforma jest „spóźniona” o 2 stopnie w stosunku do pozycji Słońca. Należy więc uruchomić blok A1 i przesuwać platformę tak długo, aż blok '34' poda różnicę równą 0.

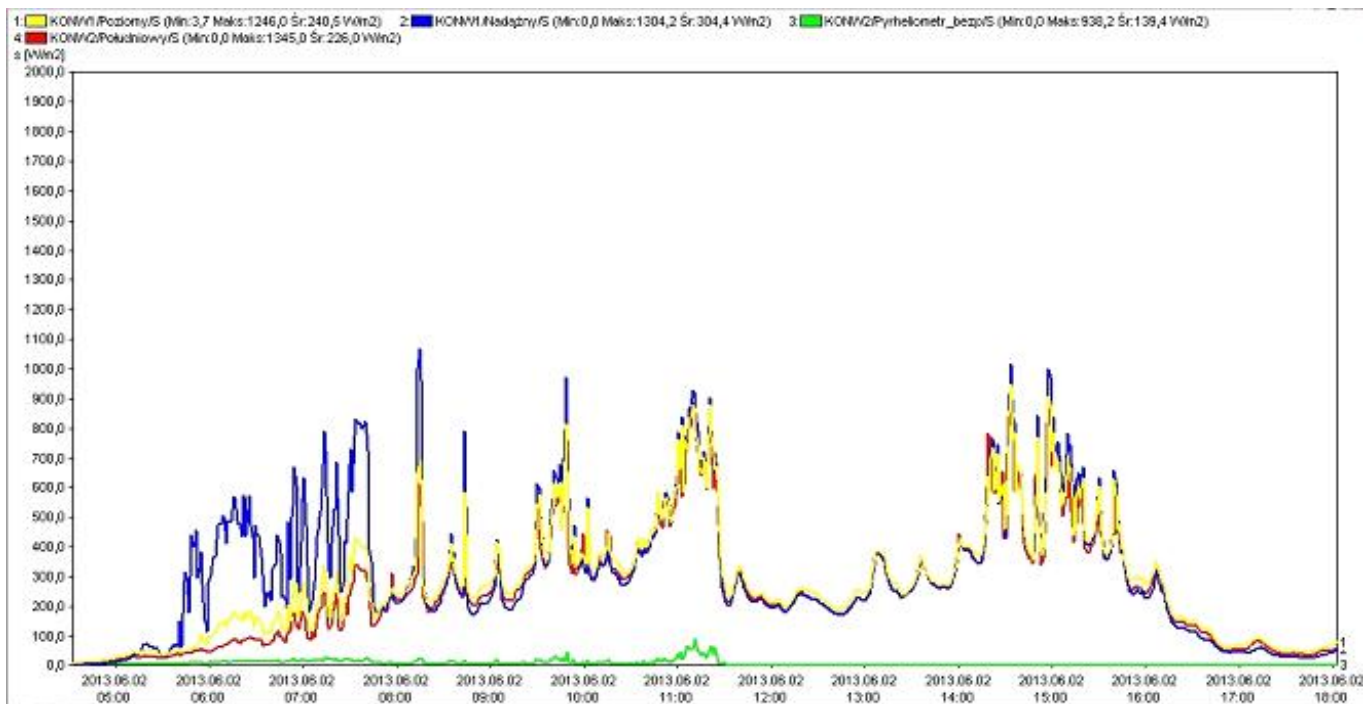


Rys. 13. Podgląd wartości wprowadzanych do kluczowych blozków algorytmu działania regulatora LB-600 [materiały SGGW]

6.2 Analiza jakości regulacji platformy nadążnej

Poniżej zaprezentowane zostaną wybrane dni pomiarowe w postaci wykresów wartości promieniowania mierzonego przez urządzenia będące elementami układu nadążnego. Dla porównania zestawione są one z pomiarami zarejestrowanymi przez urządzenia zamocowane na stałe.

Jedną z częściej pojawiających się sytuacji są zerowe lub bardzo niskie wartości promieniowania bezpośredniego (rys. nr. 14). Analizując przebieg pomiarów z pyranometrów stwierdzić można, że był to dzień ze zmienną sytuacją atmosferyczną i prawdopodobnym zachmurzeniem. Wartości promieniowania całkowitego wahały się, osiągając jednak dosyć wysokie wartości. Wartości pomiarów pyrheliometru oscylowały jednak w okolicy 0 W/m^2 .

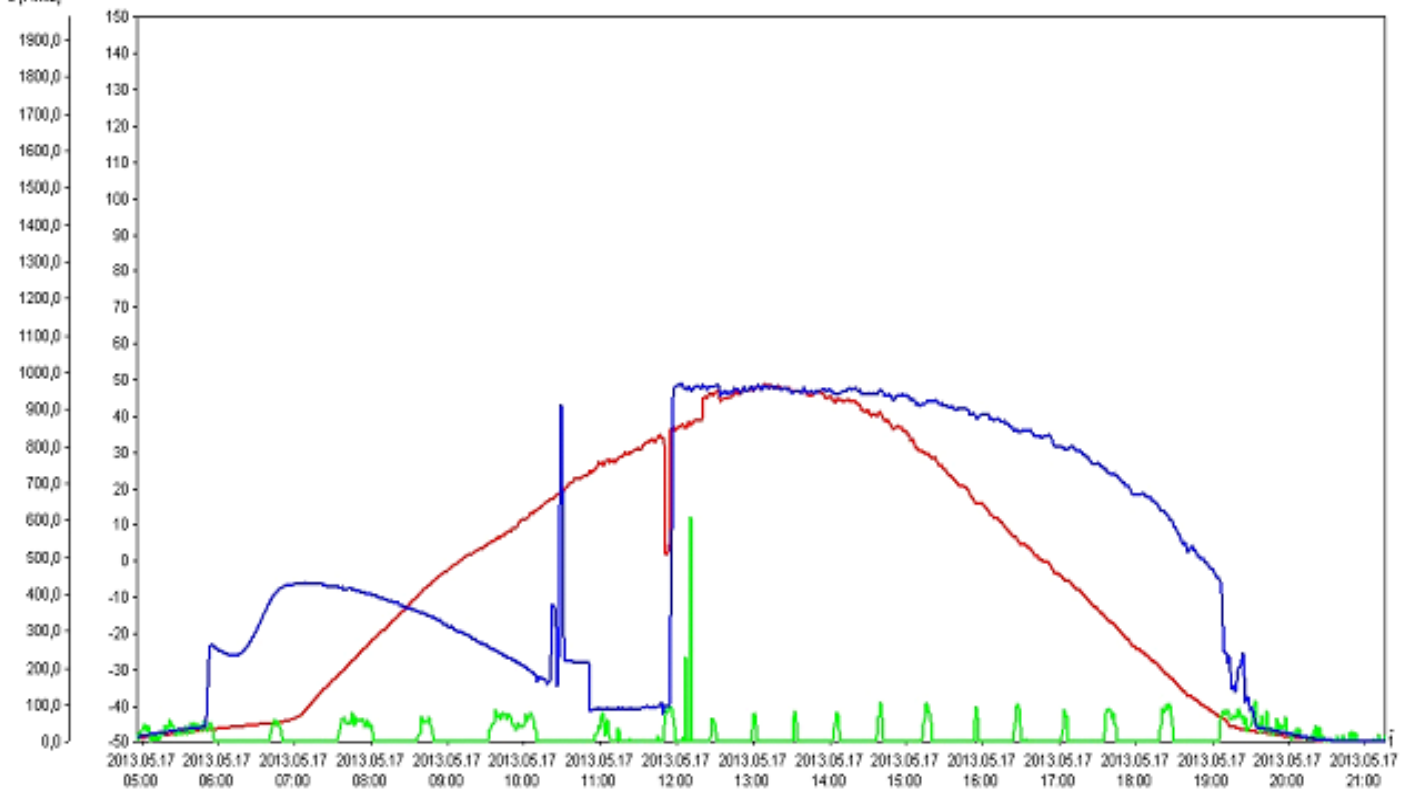


Rys. 14. Przykładowy dzień pomiarowy 02.06.2013r [materiały SGGW]

W przypadku dni słonecznych najczęściej powtarza się przebieg zaprezentowany na rysunku 15. Widać stabilne i wysokie wartości promieniowania całkowitego mierzone przez pyranometr skierowany na południową stronę nieba. Nieprawidłową pracę układu śledzącego wywnioskować można ze wskazań pyranometru nadźnego (niebieska linia). Wartości mierzone tym urządzeniem powinny być wyższe lub równe w stosunku do wartości z pyranometru południowego (czerwona linia). Sytuacja ta poprawia się dopiero około godziny 12:00. Pomiar promieniowania bezpośredniego również wskazuje na złą pracę układu śledzącego.

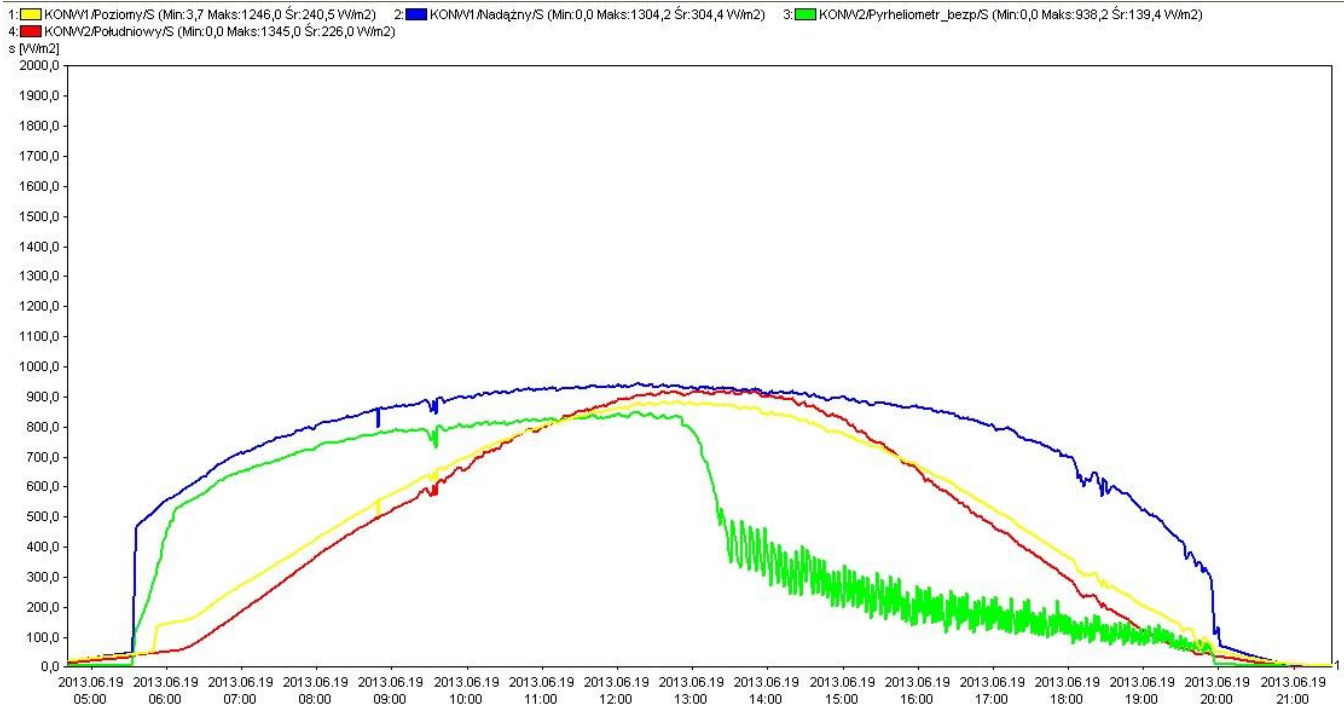
Mierzone wartości osiągają od kilku do kilkunastu procent wartości promieniowania całkowitego.

1. KONTROLNĄJĄCY/S (Min:0,0 Maks:1271,2 Śr:243,4 W/m²) 2. KONTROLNĄJĄCY/S (Min:0,0 Maks:952,3 Śr:81,9 W/m²) 3. KONTROLNĄJĄCY/S (Min:0,0 Maks:1307,3 Śr:189,8 W/m²)
 4. LB600K rzeczywista liczba impulsów szynitu 5. LB600K rzeczywista liczba impulsów elewacji



Rys. 15. Przykładowy dzień pomiarowy 17.05.2013r [materiały SGGW]

Zdarzają się jednak dni kiedy układ uzyskuje wyraźnie lepszą jakość regulacji. Może to być spowodowane ręczną korektą dokonaną przez pracownika uczelni bądź innymi bardziej losowymi czynnikami. W takie dni wykres pomiarowy wygląda tak jak na rysunku nr.16. W pierwszej części dnia układ działa w sposób niezaburzony, zgodny z teoretycznymi założeniami. Przebiegi wartości promieniowania z urządzeń zamocowanych na stałe jak i znajdujących się na platformie śledzącej są do siebie analogiczne. Stosunek wartości promieniowania bezpośredniego do całkowitego pozostaje zachowany (około 60%-80% w dzień słoneczny). Pogorszenie jakości regulacji występuje dopiero około godziny 13:00-14:00. Wtedy promieniowanie bezpośrednie spada nagle o około 50% i zaczyna oscylować wokół niższych wartości.



Rys. 16. Przykładowy dzień pomiarowy 19.06.2013r [materiały SGGW]

Powyższe wykresy pozwalają na stwierdzić, że prawdopodobnie występują błędy w pozycjonowaniu platformy nadążnej wynikające ze złego zliczania impulsów przez zaimplementowany program. Luneta pyrhelometru nie trafia dokładnie w tarczę słoneczną i pomiary z pyrhelometru znacząco odbiegają od pomiarów z innych urządzeń. Po prześledzeniu historii pomiarów stwierdzić można, że układ w miarę eksploatacji ulega nagminnemu rozkalibrowywaniu.

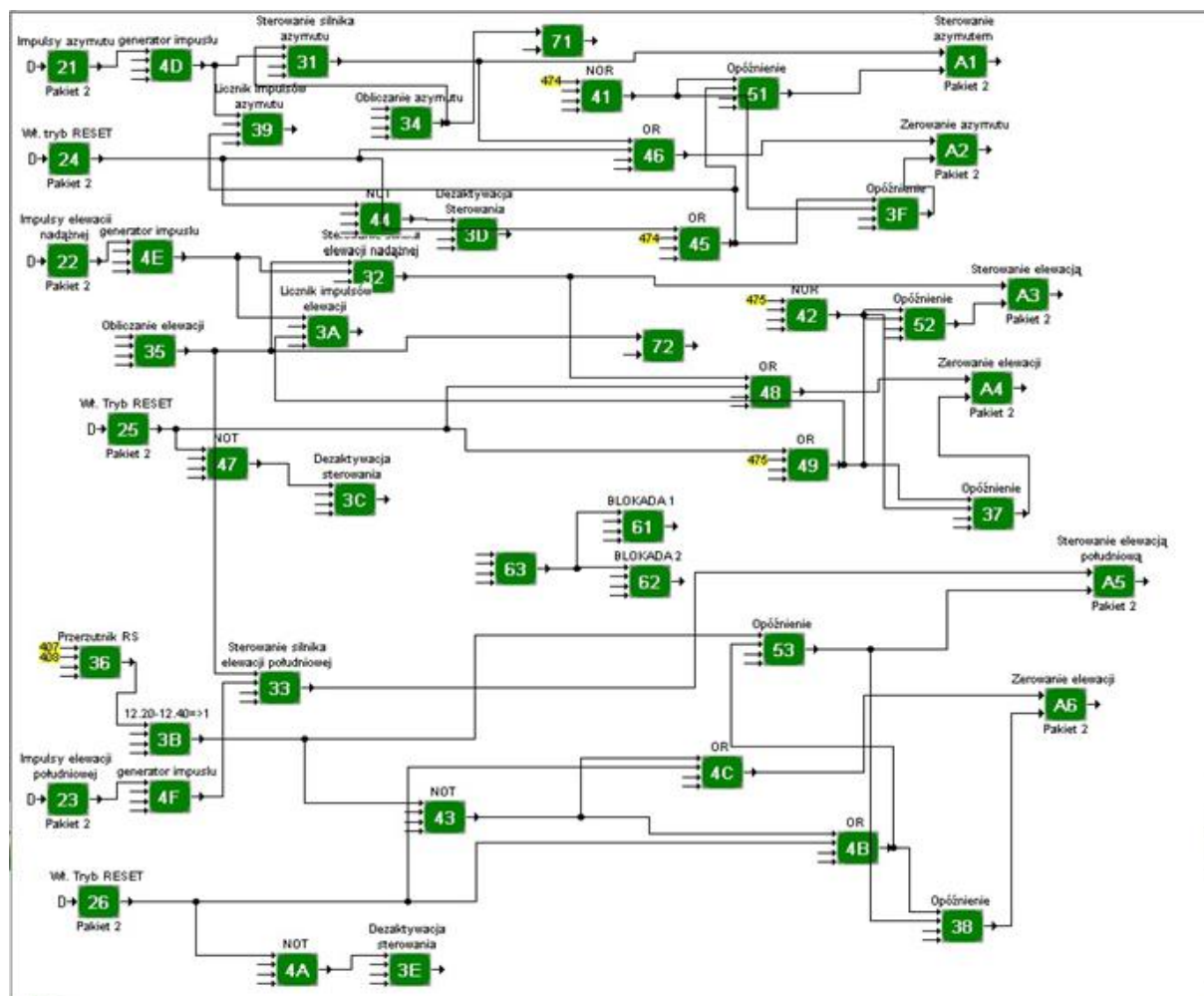
7. Diagnostyka układu nadążnego

7.1 Przyczyna powstawania uchybu w regulacji

Jak stwierdzono podczas analizy pracy stanowiska aktonometrycznego, przyczyną niedostatecznej jakości regulacji układu są błędy w zliczaniu impulsów generowanych przez kontaktron umieszczony w obrotnicy. Poniżej przedstawione zostaną możliwe przyczyny zaistnienia tych błędów.

7.2 Struktura programu obsługującego platformę nadążną oraz jego regulacja

W oparciu o program dostarczony przez producenta opracowana została poprawiona wersja mająca na celu wyeliminowanie zauważonych błędów. Poniżej przedstawiony został „kod” programu oraz objaśnienia co do dokonanych zmian (rys. nr. 17).



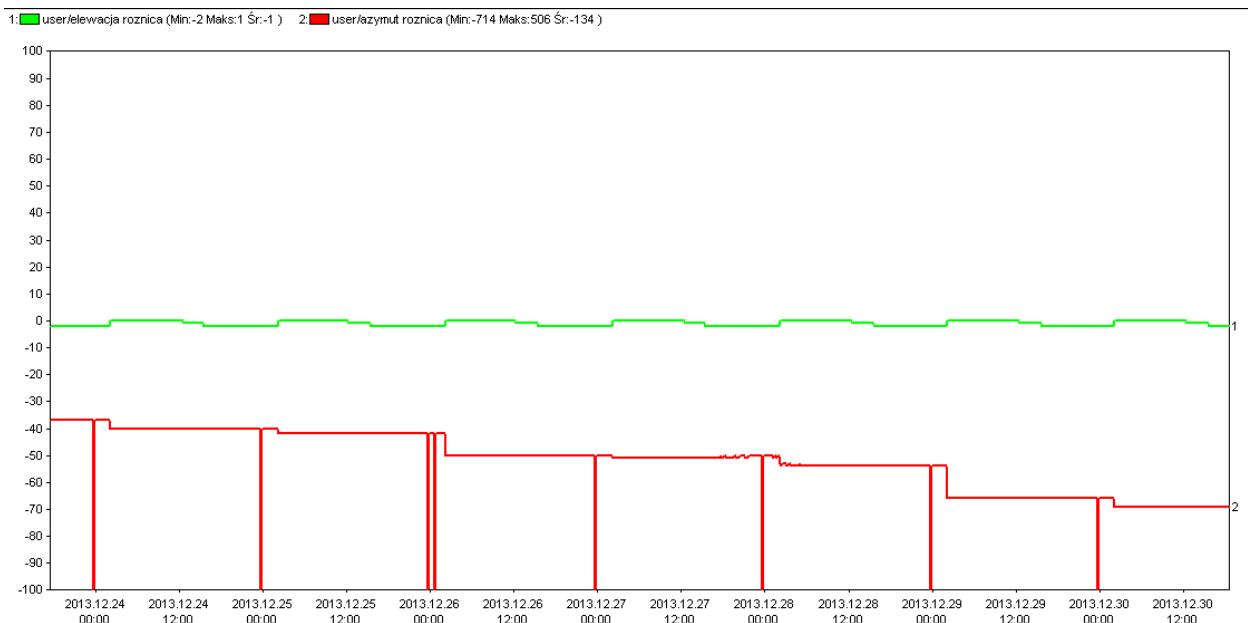
Rys. 17. Zmodyfikowany algorytm działania regulatora LB-600 [praca własna]

Algorytm ten oparty jest na wcześniej przedstawianym algorytmie dostarczonym przez firmę LAB-EL. Algorytm zawiera następujące modyfikacje:

- Generator impulsów – normalizujący impulsy docierające do regulatora. Eliminuje możliwość nie rozpoznania, a co za tym idzie zgubienia przez regulator impulsu ze względu na jego długość lub amplitudę. Takie pomijanie impulsów powoduje błędy położenia platformy nadążnej
- Tryb diagnostyczny – ręczny reset – pozwala na zresetowanie (cofnięcie do punktu startowego) układu. Niweluje błędy które nawarstwiły się podczas podążania. Układ po zresetowaniu od nowa oblicza pozycje i umieszcza na niej platformę nadążającą
- Sprawdzenie w którą stronę przesuwa się obrotnica – zapobiega nagłym zmianą kierunku poruszania się obrotnicy które mogłyby spowodować jej uszkodzenie.

7.3 Analiza porównawcza danych eksploatacyjnych z obliczeniami teoretycznymi

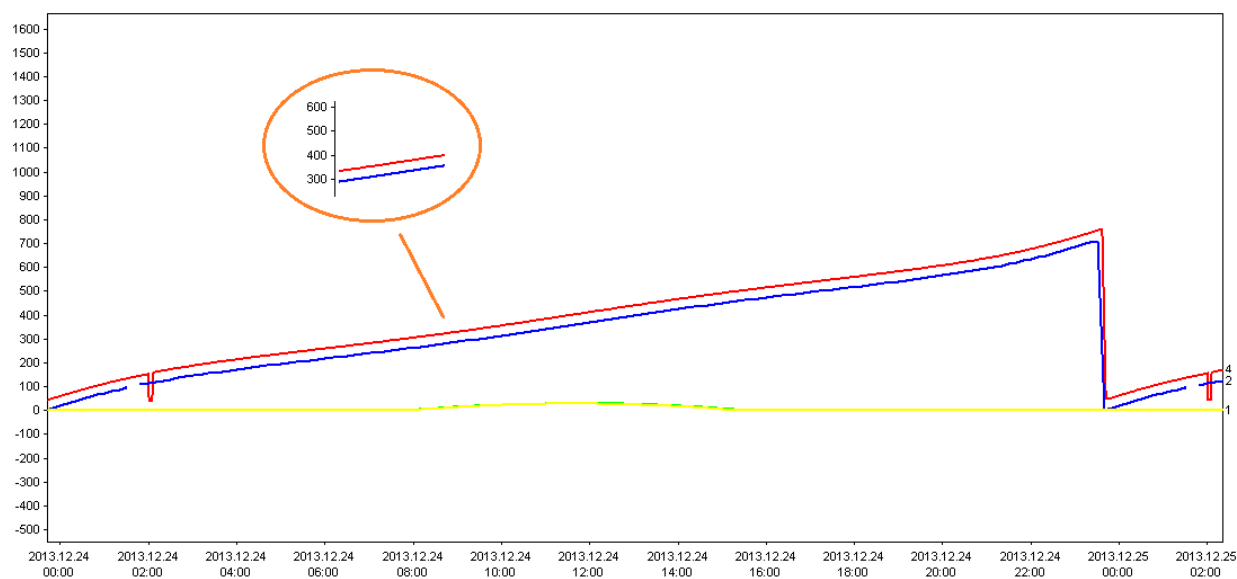
Obrotnica RAS nie jest urządzeniem dedykowanym do podążania za pozorną pozycją Słońca. Poza tym istnieje pewna nieścisłość w programie obsługującym obrotnicę. Przekładnia ślimakowa zaprojektowana została tak, że 1 impuls równy jest 0,66 stopnia przesunięcia. W programie sterującym ustawiona jest natomiast wartość 1 impuls = 0,5 stopnia. Ze względu na różną interpretację 1 stopnia powoduje to rozbieżności pomiędzy wartościami zliczanymi i wysyłanymi przez regulator. Teoretycznie, gdyby był to jedyny problem tego układu, różnica powinna narastać w ciągu dnia i resetować się wraz z powracaniem układu po punktu startu w nocy. Jednak nie jest to zauważalne. Analizując poniższe wykresy (rys. nr. 18) widać, że różnica jest stała w ciągu dnia. Narasta ona wyraźnie z dnia na dzień. Pomiary te pochodzą z okresu zimowego. Różnica w położeniu elewacji jest więc bardzo niska ze względu na bardzo niski zakres regulacji. Różnice, w przypadku azymutu, wynoszą od około 40 (rys. nr. 19) do około 300 (rys. nr. 20) impulsów. Są to bardzo duże i znaczące wartości. Problem ten nie jest możliwy do rozwiązania z poziomu użytkownika. Niezbędna jest modyfikacja oprogramowania przez producenta regulatora LB-600 lub wymiana całej obrotnicy.



Rys. 18. Rozbieżności między wyliczoną a rzeczywistą wartością impulsów (podana różnica w impulsach) [opracowanie własne]

Zakres danych na wykresie: od 2013-12-23 18:01:55 do 2014-01-20 18:01:55

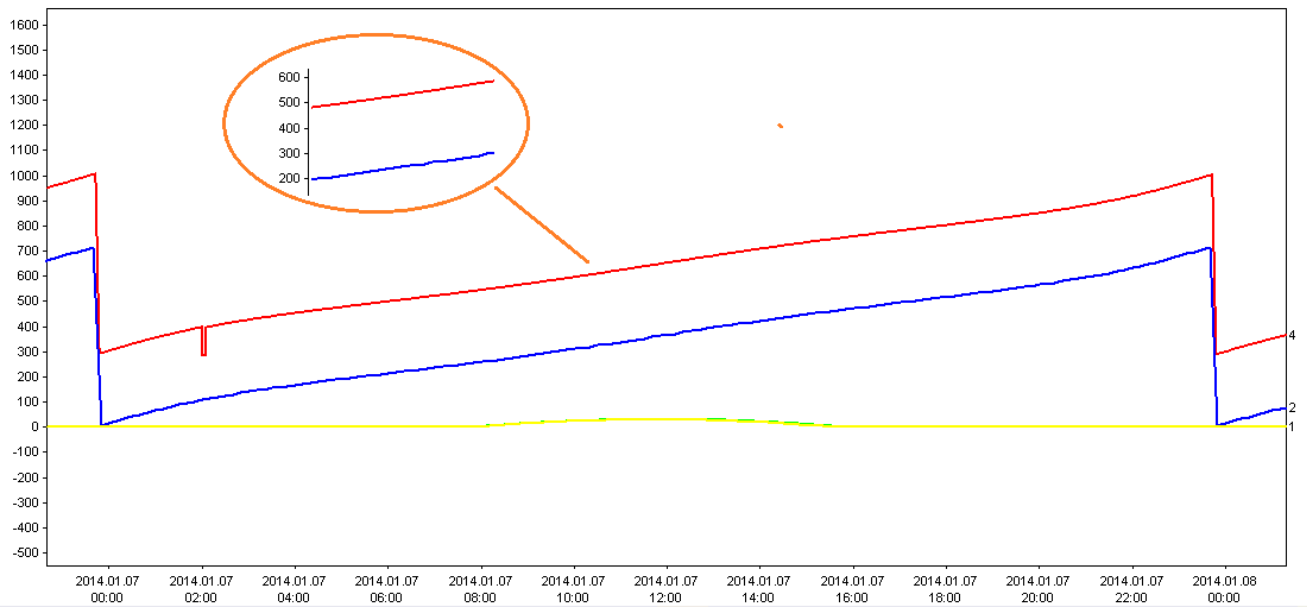
1: user/elewacja wyliczona (Min:0 Maks:35 Śr:7) 2: user/azymut wyliczony (Min:0 Maks:719 Śr:360) 3: LB600/zeczywista liczba impulsów elewacji (Min:0,000 Maks:35,000 Śr:7,693) 4: LB600/zeczywista liczba impulsów azymutu (Min:0,000 Maks:1108,000 Śr:494,665)



Rys. 19. Przebieg wartości impulsów (obliczonych i rzeczywistych) dla dnia 24.12.2013r [opracowanie własne]

Zakres danych na wykresie: od 2013-12-23 17:56:20 do 2014-01-20 17:56:20

1 ■ user/elewacja wyliczona (Min:0 Maks:35 Śr:7) 2 ■ user/azymut wyliczony (Min:0 Maks:719 Śr:360) 3 ■ LB600/rzeczywista liczba impulsów elewacji (Min:0,000 Maks:35,000 Śr:7,694)
4 ■ LB600/rzeczywista liczba impulsów azymutu (Min:0,000 Maks:1108,000 Śr:494,662)



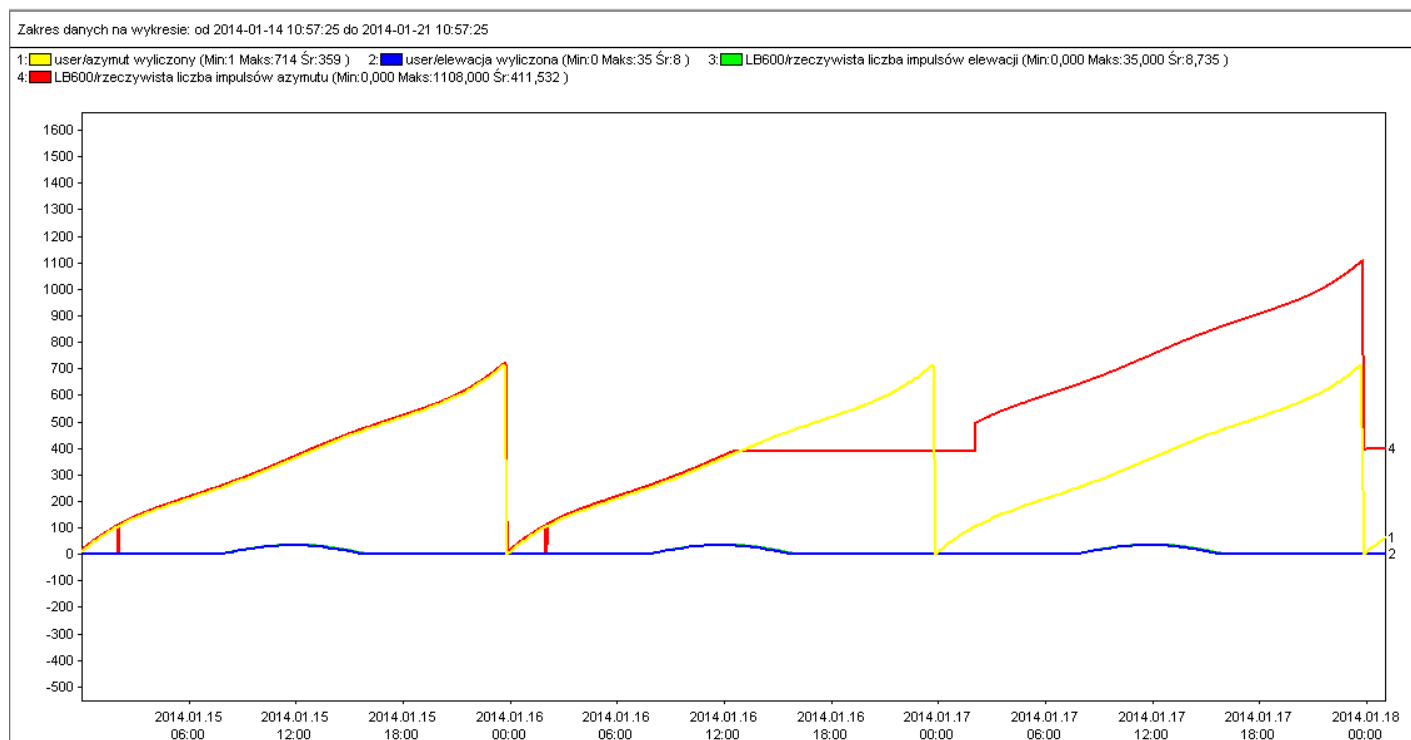
Rys. 20. Przebieg wartości impulsów (obliczonych i rzeczywistych) dla dnia 24.12.2013r

[opracowanie własne]

8. Propozycje optymalizacji pracy platformy nadążnej

8.1 Ręczna kalibracja

Jednym z obecnie stosowanych sposobów na likwidację błędów w działaniu stacji jest ręczna kalibracja. Polega ona na ręcznym zresetowaniu układu o określonej porze i ustawieniu go za pomocą kompasu i znajomości pozycji Słońca w określonym kierunku geograficznym który akurat powinien wskazywać. Jest to rozwiązanie skuteczne lecz krótkotrwałe. Po kalibracji dnia 11.01.2014r nienaganna praca trwała około tygodnia. Na poniższym wykresie widać jak dnia 17.01.2014r układ ponownie się rozkalibrował i rozbieżności pomiędzy wartościami impulsów osiągnęły rozmiary sprzed kalibracji (rys. nr. 21).

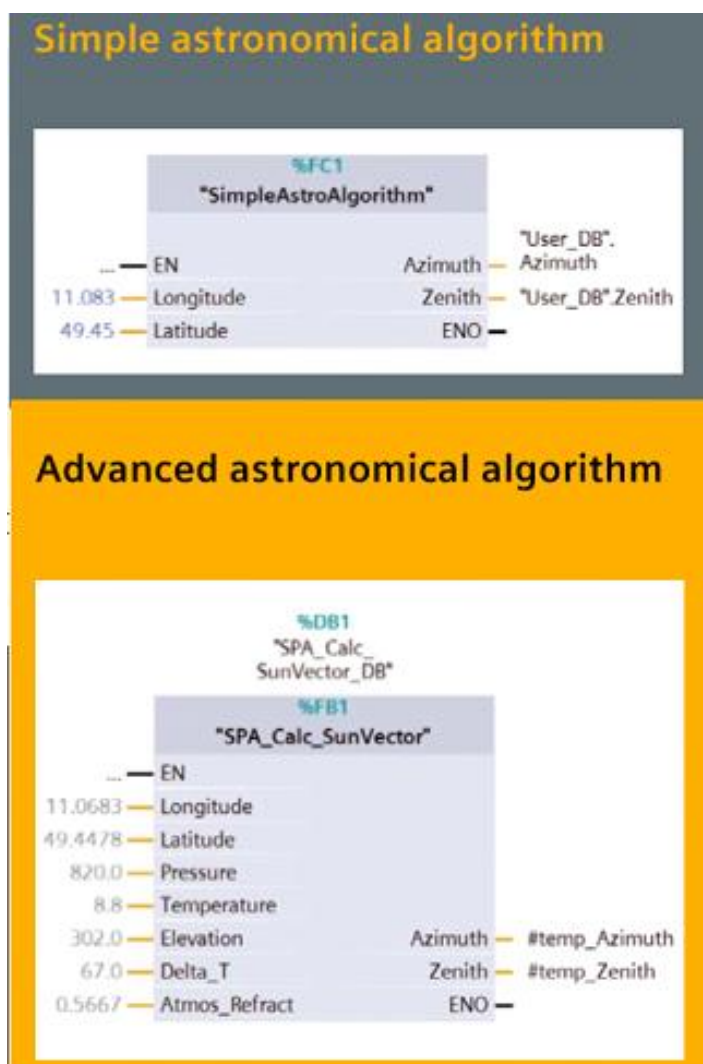


Rys. 21. Przebieg wartości impulsów po kalibracji układu

8.2 Zastosowanie dodatkowego urządzenia w celu kontroli pracy układu

Zastosowanie w oprzyrządowaniu układu nadążnego protokołu komunikacji MODBUS pozwala na dosyć dużą dowolność w dobieraniu współpracujących ze sobą urządzeń. Stwarza to również możliwość późniejszych modyfikacji. Modyfikacją mogącą poprawić jakość regulacji platformy nadążnej współpracującą z zastosowanym protokołem komunikacji jest dodatkowy sterownik programowalny zwany dalej PLC (od angielskiego programmable logic controller).

Urządzeniem mogącym sprawować kontrole nad przedstawionym w tej pracy układem jest sterownik SIMATIC S7-1200 firmy SIEMENS (rys. nr. 24). Zaprojektowany by maksymalizować zyski z instalacji solarnych. Jednak dzięki swojej precyzji działania jest również odpowiednim wyborem dla platformy pozycjonującej pyrhelimetr. Podstawowy algorytm oparty jest na systemie zegarowym bazującym na aktualnej dacie, czasie oraz położeniu (rys. nr. 22). Po wprowadzeniu tych danych wyliczana jest pozycja Słońca. Istnieje również wersja zaawansowana. Jest to algorytm opracowany przez Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej Stanów Zjednoczonych Ameryki. Jego teoretyczna dokładność to 0,0003 stopnia, praktycznie zaś, ze względu na niedoskonałość mechanicznych elementów wykonawczych osiągnięta jest precyzja rzędu 0,05 stopnia. Algorytm zaawansowany wykorzystuje dodatkowo parametry takie jak ciśnienie, temperatura czy refrakcje czyli to w jaki sposób atmosfera załamuje promienie słoneczne. System ten jest rozwiązaniem sprawdzonym w przemyśle. Sterownik z rodziny SIMATIC daje dużą swobodę [25].



Rys. 22. Schematyczne przedstawienie podstawowego (na górze) oraz zaawansowanego (na dole) algorytmu podążania za pozycją Słońca firmy SIEMENS [25].

Możliwa jest zarówno wspierana przez Siemens współpracą sterownika z komponentami firmowymi, jak i dołączanie własnych, kompatybilnych elementów. Jest to możliwe ze względu na komunikację przez uniwersalny moduł MODBUS. Pozwala to na podłączenie tego sterownika PLC jako dodatkowego elementu kontrolującego.

Układ kontrolny składałby się głównie ze sterownika Siemens oraz czterech foto-diod (rys. nr. 23) zamontowanych parami po bokach lunety pyrhelometru oraz na górze i dole urządzenia. Diody te pozwalałyby na określenie kierunku w którym znajduje się Słońce. Należałoby zaprojektować układ w którym sterownik otrzymuje informacje o promieniowaniu zmierzonym przez diody i porównuje je ze sobą. Jeśli dioda zamontowana po prawej stronie urządzenia mierzy większe promieniowanie niż ta po lewej należy przesunąć układ w stronę diody wskazującej większy wynik (ponieważ to ona jest bliżej pozycji Słońca). Jeśli wartości na wszystkich czujnikach byłyby przybliżone oznaczałoby to, że Słońce pada dokładnie w obiektyw pyrhelometru i mierzone promieniowanie bezpośrednio daje najwyższe możliwe wartości. System ten potraktować można jako kontrolę istniejącego układu bądź alternatywę dla niego.



Rys. 23. Fotodioda proponowana do zamontowania na lunecie pyrhelometru [28].



Rys. 24. Sterownik S7-1200 firmy SIEMENS [25].

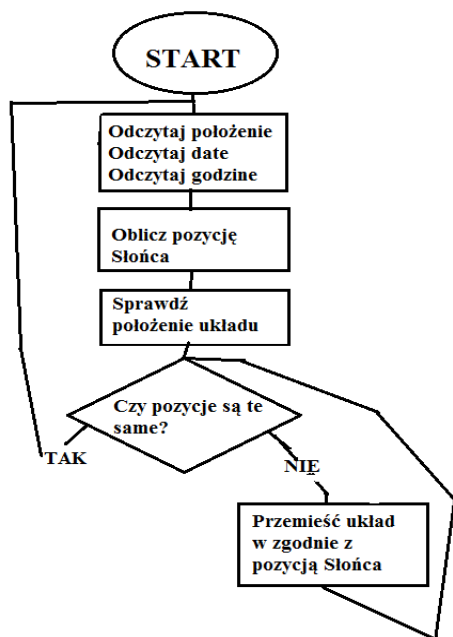
8.2.1 Układ kontrolujący

W tym przypadku opisany wyżej układ współpracowałby z istniejącymi urządzeniami na zasadzie nadzoru. Sterownik SIMATIC na bieżąco monitorowałby za pomocą diod pozycję pyrhelometru. W przypadku dosyć dużych różnic pomiędzy czujnikami przesyłana była by informacja o zaistniałej sytuacji i układ oparty na sterowniku LB-600 korygował by różnice (rys. nr. 25).

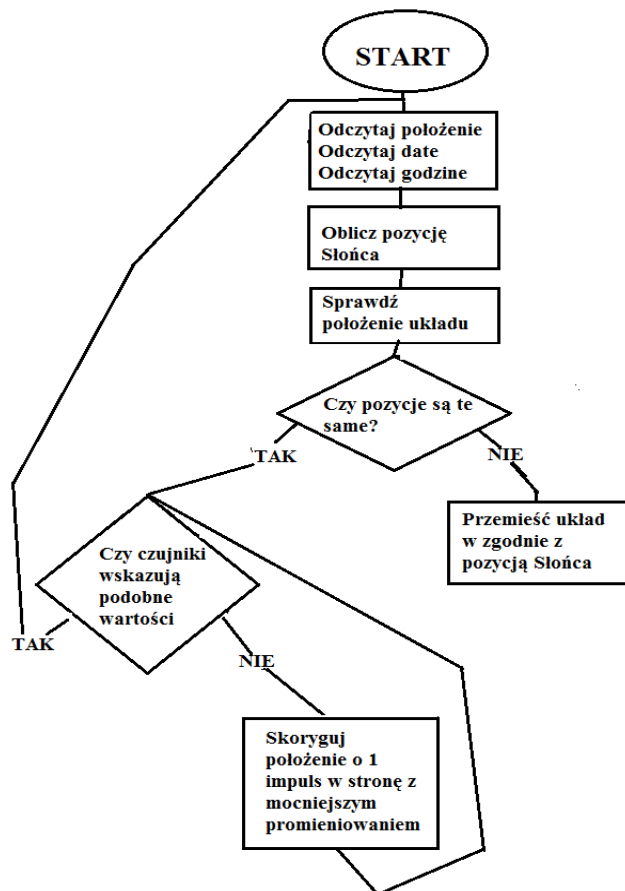
8.2.2 Układ alternatywny

W tym przypadku sterownik SIMATIC należałoby podłączyć do urządzenia wykonawczego jako alternatywę dla istniejącego układu sterowania. Układ zegarowy ustalałby pozycję Słońca na podstawie takiej jak dotychczas (czasu, daty i położenia geograficznego). Następnie po „znalezieniu” Słońca na niebie załączał by się system alternatywny odpowiedzialny za podążanie. Śledzenie pozycji Słońca odbywałoby się za pomocą wyżej opisanego porównania pomiarów przez foto-diody. Następnie o określonej godzinie układ wracał by do swojego początkowego położenia aby następnego dnia znów powtórzyć cykl zaczynający się od znalezienia Słońca na niebie.

Schemat algorytmu regulacji przed modyfikacją



Schemat algorytmu regulacji po modyfikacji



Rys. 25. Schemat blokowy działania układu obecnie (po lewej) oraz po proponowanej modyfikacji (po prawej) [opracowanie własne].

8.3 Zastosowanie gotowego układu podążania oferowanego przez firmy komercyjne.

8.3.1 KEEP&ZONEN.

Systemy podążania firmy Keep&Zonen są dedykowane do pomiarów promieniowania słonecznego. Zakładają one użycie platformy śledzącej z pyrhelimetrem oraz pyranometrem odpowiednio do pomiaru promieniowania bezpośredniego oraz całkowitego, a następnie obliczenie ich różnicy w celu uzyskania promieniowania rozproszonego. Są to oczywiście systemy 2-osiove operujące w płaszczyźnie azymutu oraz elewacji. Układ oparty jest na silnikach krokowych oraz mikrokontrolerach. Przeniesienie odpowiedniego momentu obrotowego zapewniającego wymaganą precyzję osiągnane jest poprzez pasek lub koła zębate.

Możliwymi, według producenta, zastosowaniami rozwiązań Keep&Zonen są stacje meteorologiczne dokonujące pomiarów promieniowania słonecznego, stacje zajmujące się badaniem chemii atmosfery oraz jej zanieczyszczeń.

Keep&Zonen oferuje 2 rodzaje trackerów. Podstawowy SOLYS 2 oraz bardziej zaawansowany 2AP. Obie platformy pozwalają na śledzenie z precyzją przynajmniej do $0,1^\circ$ [24].

SOLYS 2 (rys. nr. 26) jest to samodzielna platforma śledząca pozorną pozycję Słońca na horyzoncie. Nie wymaga ona komputera ani żadnego dodatkowego oprogramowania. Posiada ona zintegrowany system GPS pozwalający na określenie lokalizacji oraz czasu. Wbudowany port Ethernet pozwala na aktualizacje oprogramowania, testy oraz diagnostykę. Zastosowano przełożenie napędu za pomocą paska co skutkuje dużą niezawodnością i brakiem potrzeby serwisowania napędu.

Tracker stoi na aluminiowym trójnogu z regulacją poziomą. Standardowo platforma wyposażona jest w 1 gniazdo do zamontowania pyrhelimetru oraz 3 miejsca na inne urządzenia pomiarowe, docelowo pyranometry. Dodatkowo SOLYS2 wyposażony jest w 2 kule mające na celu zasłonięcie promieniowania bezpośredniego padającego na zamontowane pyranometry w celu odczytu promieniowania rozproszonego. Pozwala to na porównanie promieniowania rozproszonego uzyskanego w ten sposób z promieniowaniem uzyskanym z różnicy promieniowania całkowitego i bezpośredniego.



Rys. 26. Układ nadążny SOLYS 2 firmy KEEP&ZONEN [24].

2AP (rys. nr. 27) jest to trwalsza, masywniejsza oraz bardziej niezawodna wersja platformy śledzącej firmy Keep&Zonen. Zamiast napędu paskowego zastosowano przekładnię z kół zębatych która pozwala na niezaburzone działanie nawet w przypadku oblodzenia oraz silnego wiatru. Możliwa jest praca w temperaturach do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oprogramowanie 2AP pozwala również na inne niż ciągle śledzenie programy.



Rys. 27. Układ nadążny 2AP firmy KEEP&ZONEN [24].

9. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy była analiza jakości regulacji platformy nadążnej znajdującej się na Wydziale Inżynierii Produkcji Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Szczególnie uwzględnione zostały pomiary promieniowania słonecznego. Stacja ta w sposób ciągły dokonuje również pomiarów prędkości wiatru, temperatury oraz wilgotności. Przedstawiona została ogólna budowa stacji ze szczególnym uwzględnieniem układu nadążania za pozycją Słońca. Przeanalizowany został algorytm jego działania, zamontowane na nim urządzenia oraz pomiary otrzymywane z tych urządzeń.

Stwierdzony został uchyb w regulacji platformy, powodujący mijanie się lunety pyrhelometru z tarczą słoneczną. Skutkuje to niepewnymi oraz niewiarygodnymi pomiarami promieniowania bezpośredniego.

Diagnostyka układu regulacji oparta na programie obsługującym działanie stacji pozwoliła na stwierdzenie prawdopodobnych przyczyn rozkalibrowanie się stacji. Stwierdzone zostały błędy w zliczaniu impulsów generowanych przez obrotnicę na której znajdują się urządzenia pomiarowe. Prawdopodobną tego przyczyną jest błędne wyskalowanie przekładni obrotnicy pełniącej funkcje urządzenia wykonawczego względem regulatora LB-600 sterującego pracą całego układu.

W celu likwidacji uchybu oraz ogólnej poprawy jakości regulacji zaproponowane zostały różne sposoby optymalizacji układu. Sugeruje się ręczną kalibrację stacji w celu krótkotrwałej poprawy działania. Istnieją również bardziej zaawansowane rozwiązania takie jak zastosowanie dodatkowego urządzenia kontrolującego oraz wspomagającego pracę układu lub całkowita likwidacja układu nadążania i zastąpienie go gotowym, dedykowanym do tego celu rozwiązaniem.

10. Literatura

1. Abdallah S, Badran OO. Sun tracking system for productivity enhancement of solar still. *Desalination* 2008;220:669–76.
2. Abdallah S, Nijmeh S. Two axes sun tracking system with PLC control. *Energy Conversion and Management* 2004;45:1931–9
3. Abu-Khader MM, Badran OO, Abdallah S. Evaluating multi-axes sun-tracking system at different modes of operation in Jordan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:864–73.
4. Alata M, Al-Nimr MA, Qaroush Y. Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control. *Energy Conversion and Management* 2005;46: 1229–45
5. Al-Mohamad A. Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a suntracking system. *Applied Energy* 2004;79:345–54.
6. Bingol O, ALTINTAS, A, O'NER Y. Microcontroller based solar-tracking system and its implementation. *Journal of Engineering Sciences* 2006;12(2):243–8.
7. Blanco-Muriel M, Alarcon-Padilla DC, Lopez- Moratalla T, Lara-Coira M. Computing the solar vector. *Solar Energy* 2001;70(5):431–41.
8. Canada J, Utrillas MP, Lozano JAM, Pedros R, Amo JLG, Maj A. Design of sun tracker for the automatic measurement of spectral irradiance and construction of an irradiance database in the 330–1100 nm range. *Renewable Energy* 2007;32:2053–68
9. Contreras A, Garcia J, Gonzalez C, Martinez E. Portable solar tracker; May 08.2006 http://engineering.utsa.edu/ee/sd/projects/spring2006/13/Team_13_Final_Presentation
10. Debasol,. Solar tracker. *Solar Power*; 2007.www.girasolar.com
11. Hamilton SJ. Sun-tracking solar cell array system. Bachelor of Engineering Thesis Division of Electrical Engineering. Department of Computer Science & Electrical Engineering, University of Queensland; October 1999
12. Huang BJ, Sun FS. Feasibility study of one-axis three positions tracking solar PV with low concentration ratio reflector. *Energy Conversion and Management* 2007;48:1273–80
13. Jinayim T, Arunrungrasmi S, Tanitteerapan T, Mungkung N. Highly efficient low power consumption tracking solar cells for white LED-based lighting system. *International Journal of Electrical Computer and Systems Engineering* 2007;1(2):1307–5179

14. Karimov KhS, Saqib MA, Akhter P, Ahmed MM, Chatthad JA, Yousafzai SA. Simple photo-voltaic tracking system. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2005;87:49–59.
15. Khlaichom P i inni - Optimization of solar tracking system based on genetic algorithms; <http://www.thaiscience.info> 2006r.
16. Konar A, Mandal AK. Microprocessor based automatic sun-tracker. *IEE Proceedings Part A Physical Science Measurement and Instrumentation Management and Education Reviews* 1991;138(4):237–41.
17. Mousazadeh H, Keyhani A, Javadi A, Mobli H, Abrinia K, Sharifi A. – A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output – *czasopismo Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009;13:1800-1818
18. Peterson T, Rice J, Valane J. Solar tracker; 2005. <http://lrc.cit.cornell.edu/courses/ee476/FinalProjects/s2005/tp62/website/solartracker>
19. Poulek V, Libra M. New solar tracker. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 1998;51:113–20.
20. Roth P i inni – Cheap two axis following device. *Energy Conversion and Management* 2005;46
21. Roth P, Georgiev A, Boudinov H. Design and construction of a system for suntracking. *Renewable Energy* 2004;29:393–402
22. Rózdzyński T. – *Miernictwo Meteorologiczne* wydawnictwo IMGW rok 1995
23. Rumyantsev V, Chalov A, Ionova E, Larionov V, Andreev V. Concentrator PV modules with multi-junction cells and primary/secondary refractive optical elements. In: *The 19th European photovoltaic solar energy conference*; 2004
24. Broszura Sun Trackers firmy Keep&Zonen na rok 2013
25. Broszura SolarTracker firmy Siemens na rok 2013
26. Strona internetowa <http://www.label.pl/> na dzień 18.12.2013r.
27. SPID Elektonik strona internetowa: <http://www.spid.alpha.pl/> na dzień 18.12.2013r.
28. www.tme.eu na dzień 18.12.2013r

Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelni Biblioteki SGGW

.....
(czytelny podpis autora)