

**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w
Krakowie**

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

Katedra Telekomunikacji



AGH

Praca inżynierska

**System do zarządzania automatyką domową z
wykorzystaniem terminalu mobilnego i platformy
Raspberry Pi.**

Imię i nazwisko dyplomanta: **Mateusz Skalski**

Kierunek studiów: **Elektronika i Telekomunikacja**

Nr albumu: **242723**

Opiekun pracy: **dr inż. Jarosław Bułat**

Kraków 2013

*Oświadczam, świadomy odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy,
że niniejszy projekt inżynierski wykonałem osobiście i samodzielnie i że nie
korzystałem ze źródeł innych niż wymienione w pracy.*

Kraków, dnia

Podpis dyplomanta.....

Spis treści

Wstęp	4
1 Cel i założenia projektu	6
1.1 Fizyczne aspekty ogrzewania domu.....	6
1.2 Współczesne systemy grzewcze	9
1.3 Sterownik PID	11
2 Symulacje	15
2.1 Narzędzie symulacyjne Simulink.....	15
2.2 Opracowanie modelu badań.....	16
2.3 Wyniki symulacji	20
3 Implementacja	27
3.1 Realizacja ogrzewania podłogowego	27
3.2 Architektura systemu	29
3.3 Platforma Raspberry PI.....	30
3.4 Struktura aplikacji i wykorzystane technologie	31
4 Testy	35
4.1 Część serwerowa.....	35
4.2 Część kliencka.....	37
Wnioski	39
Bibliografia	40

Wstęp

Automatyka domowa jest wszechstronnym terminem kojarzonym z możliwościami sterowania jakie oferuje współczesny dom lub mieszkanie. Jest to ogół udogodnień tworzących tzw. inteligentny dom. Dzisiejszy rozwój technologii sprawił, że współczesny budynek mieszkalny może być bardzo technicznie zaawansowany, nie tylko od strony architektury budowniczej. Pomysł inteligentnego budynku powstał prawdopodobnie w latach 90-tych ubiegłego stulecia i pochodzi z zakładów produkujących samoloty. Wysoki stopień automatyzacji i robotyzacji procesu produkcji powodował problemy z zarządzaniem, utrzymaniem oraz zmienianiem funkcji hal produkcyjnych. Rozpoczęło się wówczas poszukiwanie rozwiązań wykorzystujących metody informatyczne do optymalizacji eksploatacji tych obiektów [1].

Współczesne wyposażenie inteligentnego domu składa się z czujników, detektorów, połączeń a także systemu koordynującego ich pracę. Informacje dostarczane są z różnych źródeł do centrali sterowniczej. Takie rozwiązanie powoduje maksymalizację funkcjonalności domu, poczucie komfortu oraz redundancję kosztów eksploatacyjnych domu.

Jednym z zastosowań takiego systemu może być reakcja na zmieniające się zewnętrzne warunki pogodowe w ogrzewaniu domowym. Ma to bardzo wielki wpływ na komfort cieplny mieszkańców domu jak również oszczędności spowodowane maksymalnym wykorzystaniem zasobów naturalnych. Sterownik zastosowany w takim rozwiązaniu kontroluje wówczas pracę pieca grzewczego tak, aby utrzymać zadaną temperaturę powietrza. Umiejętne wykorzystanie technologii sprawia, że użytkownik nie musi rozumieć zasad działania systemu, aby go poprawnie obsługiwać. Jedynym etapem konfiguracji urządzenia w takim przypadku, jest wybranie żądanej temperatury.

W niniejszej pracy zostanie opracowany system sterowania ogrzewaniem podłogowym w taki sposób, aby zapewnić jak największy komfort cieplny przy użyciu minimalnej energii. Do tego celu wykorzystana zostanie aktualna prognoza pogody, która pozwala określić w jakich momentach będzie świecić słońce. Algorytm systemu uwzględni wówczas energię dostarczaną przez wnikające do domu promienie świetlne i ograniczy przy tym zapotrzebowanie na energię pochodzącą z układu grzewczego.

Oprócz utrzymanego komfortu cieplnego, osiągnięta przy tym zostanie minimalizacja kosztów eksploatacyjnych ogrzewania oraz brak nadmiernego efektu przegrzania domu.

Praca ta składa się z czterech rozdziałów opisujących sterowanie ogrzewaniem domowym. W pierwszy rozdziale opisano teoretyczne wprowadzenie do tematu współczesnych metod ogrzewania. W kolejnym rozdziale zaprezentowano model systemu grzewczego oraz wyniki symulacji jego działania. Rozdział trzeci zawiera pełen opis środowiska uruchomieniowego. Zawarte są w nim informacje na temat architektury systemu, wykorzystanych elementów oraz technologii. Ostatni rozdział przedstawia wyniki testowania i wykorzystania aplikacji.

1 Cel i założenia projektu

Celem niniejszej pracy jest zaprojektowanie systemu do zdalnego sterowania inteligentnym domem. Aplikacja ma za zadanie umożliwić łatwe sterowanie temperaturą w domu, z wykorzystaniem ogrzewania podłogowego. Aplikacja zostanie oparta o architekturę klient-serwer, w której to dostęp będzie reprezentowany przez interfejs WWW.

W pracy zostały przeprowadzone symulacje ogrzewania domu, wraz z fizycznymi zjawiskami towarzyszącymi wymianie ciepła. Efektem końcowym jest system sterowania ogrzewaniem domu. Dodatkowym atutem tego rozwiązania jest predykcyjny sterownik pogody, który umożliwia wcześniejszą reakcję na czynnik zewnętrzny, jakim jest słońce. Symulacje pokazały że w przypadku ogrzewania z dużą bezwładnością (np. ogrzewanie podłogowe), ma to szczególne znaczenie.

Motywacją do podjęcia próby udoskonalenia współczesnych systemów grzewczych domu była możliwość zwiększenia komfortu cieplnego w okresie zimowym przy zachowaniu lub zmniejszeniu zapotrzebowania na energię.

Rozwój techniki telekomunikacyjnej sprawił, że każde urządzenie może być kontrolowane z dowolnego miejsca na ziemi. Jedynym wymaganiem jest podłączenie do Internetu. Kolejną bardzo ważną cechą takiego systemu, jest jego prostota i obsługa przez różnej klasy urządzenia, tak aby użytkownik mógł posłużyć się komputerem, telefonem komórkowym, telewizorem, a nawet zegarkiem do sterowania. Dodatkowo system powinien minimalizować koszty eksploatacyjne oraz zanieczyszczenia środowiska.

1.1 Fizyczne aspekty ogrzewania domu

W technice grzewczej budynków zachodzi ciągły proces wymiany ciepła z otoczeniem. Ma to naturalny związek z podstawowymi prawami termodynamiki. Podczas projektowania domu analizowane są odpowiednie parametry ścian, podłóg oraz dachu. Wyluczane są wówczas współczynniki opisujące właściwości cieplne obiektu. Na ich podstawie dobierane są systemy ogrzewania oraz ich wydajność.

Aby utrzymać odpowiednią temperaturę domu w zimie, trzeba dostarczać odpowiednią ilość ciepła. Dzieje się tak z powodu ciągłej wymiany ciepła z otoczeniem i zależy to od różnicy temperatur pomiędzy ośrodkami. Zjawisko to przebiega zawsze w stronę ciała zimniejszego. Stwierdzenie to jest oparte o drugą zasadę termodynamiki dla przemian nieodwracalnych, której definicję przedstawia poniższa nierówność [2]:

$$\Delta S \geq 0, \quad (1.1)$$

gdzie:

ΔS – przyrost entropii układu.

Zmiana entropii zależy od dwóch parametrów i jest opisana następującym równaniem:

$$\Delta S = S_{końc} - S_{pocz} = \int \frac{dQ}{T}, \quad (1.2)$$

gdzie:

dQ – ilość energii wymienionej pomiędzy ośrodkami,

T – temperatura układu.

W przypadku wymiany ciepła pomiędzy domem oddającym ciepło ($-Q$) oraz otoczeniem pobierającym ciepło ($+Q$) zachodzi proces o następującej nierówności:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_{otoczenia}} + \frac{-Q}{T_{domu}} > 0, \quad (1.3)$$

Aby nierówność została spełniona, temperatura domu musi być większa od temperatury otoczenia. Zatem transport energii pomiędzy dwoma ośrodkami jest możliwy tylko w przypadku różnicy temperatur tych ośrodków.

Ilość ciepła jaka zostanie wówczas przekazana może zostać obliczona na podstawie równania:

$$Q = cm\Delta T \text{ [J]}, \quad (1.4)$$

gdzie:

Q – ciepło przekazane pomiędzy dwoma ośrodkami,

c – ciepło właściwe substancji transportującej energię,

ΔT – różnica temperatur po obu stronach przegrody,

m – masa substancji.

Szybkość z jaką przepływa energia cieplna z jednego ośrodka do drugiego nosi nazwę strumienia ciepła [3]. Jest to pochodna po czasie ciepła przepływającego przez przegrodę dzielącą oba środowiska. Zależność opisująca zjawisko ma postać:

$$q = \frac{dQ}{dt} \text{ [W]}, \quad (1.5)$$

gdzie:

q – strumień ciepła,

dt – czas przepływu ciepła.

Do obliczenia wartości tej wielkości można wykorzystać równanie:

$$q = US\Delta T \text{ [W]}, \quad (1.6)$$

gdzie:

U – współczynnik przenikania ciepła,

S – powierzchnia przegrody,

Aby z kolei obliczyć współczynnik przenikania ciepła, można posłużyć się wzorem:

$$U = \frac{\lambda}{d} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right], \quad (1.7)$$

gdzie:

λ – przewodność cieplna,

d – grubość przegrody.

W praktyce najczęściej wykorzystywana jest bezwzględna wartość tego współczynnika, która jest iloczynem współczynnika przenikania ciepła i powierzchni obiektu:

$$U_{th} = US \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right]. \quad (1.8)$$

Przewodność cieplna jest natomiast wyznaczana na podstawie następującej definicji:

$$\lambda = \frac{dQ}{dt} \frac{d}{S\Delta T} \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]. \quad (1.9)$$

Pokazuje ona zdolność substancji do przewodzenia ciepła. Zatem czym większy jest współczynnik, tym więcej ciepła jest w stanie przepłynąć przez ten materiał w tych samych warunkach w jednakowym okresie czasu. Wielkość ta charakteryzuje konkretną przegrodę oraz umożliwia porównanie jej na tle innych co pokazuje tabela 1.1.

Tabela 1.1 Wartości współczynnika ciepła dla wybranych materiałów budowlanych
(http://materialy.budowlane.edu.pl/Wsp%C3%B3%C5%82czynnik_przewodzenia_ciep%C5%82a,
31.12.2013)

Materiał	Współczynnik przewodzenia ciepła λ [W/(m*K)]
Wełna mineralna	0.03 – 0.04
Styropian	0.032 – 0.045
Drewno	0.04 – 0.17
Cegła	0.15 – 1.31
Beton	0.8 – 1.28

Znajomość powyższych zależności, pozwala opisać własności cieplne budynków i procesy zachodzące przy wymianie ciepła z otoczeniem. Rekompensata ubytku energii w okresie zimowym nosi nazwę ogrzewania cieplnego. Proces ten polega na dostarczaniu energii termicznej do ciała, aby utrzymać lub podnieść jego temperaturę. Dostarczane ciepło jest możliwe na kilka różnych sposobów. Może to być czynnik zewnętrzny jak np. wpadające przez okno promienie świetlne, świadome użycie systemów ogrzewania, energia wytworzona poprzez gotowanie, pranie, kąpiel, ludzkie ciało czy też sprzęt elektroniczny.

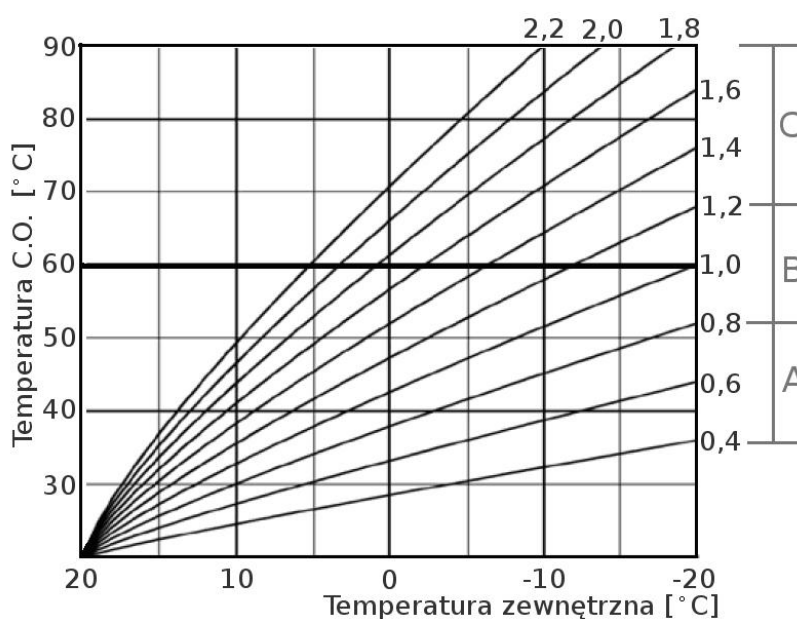
W domach z dużą liczbą okien od strony południowej, występuje znaczny wpływ energii dostarczanej przez słońce. Podczas pory zimowej ma to pozytywny efekt, ponieważ mniej ciepła musi zostać dostarczone poprzez system grzewczy. Natomiast w lecie jest to efekt niepożądany z powodu wysokich temperatur zewnętrznych. Projektanci domu wykorzystują wówczas elementy architektoniczne blokujące dopływ ciepła w tym okresie i przepuszczające zimą.

1.2 Współczesne systemy grzewcze

Ogrzewanie domu można zrealizować na wiele sposobów. Coraz częściej tradycyjne kaloryfery czy kominki są zamieniane na ogrzewanie podłogowe. Jest to bardzo dobre rozwiązanie dla budynków mieszkalnych, które pozwala na uzyskanie stałej temperatury. W porównaniu do ogrzewania kaloryferem lub powietrzem, rozwiązanie to pozwala zachować idealny gradient temperatury - wyższa temperatura przy podłodze, niższa w okolicy głowy. Efektem jest mniejsze uczucie duszności i uczucie komfortu cieplnego przy niższej temperaturze. Elementy są dodatkowo zabudowane i niewidoczne dla użytkownika. Najpoważniejszą wadą systemu jest bardzo duża bezwładność cieplna, która musi być uwzględniona w urządzeniach sterujących.

W skład takiego systemu obok pieca grzewczego wchodzi sterownik. Kontroluje on przepływem ciepłej wody przez elementy grzewcze w zależności od preferencji użytkownika, a także temperatury zewnętrznej. Do jego poprawnej pracy wymagany jest zewnętrzny czujnik temperatury. Jest on źródłem informacji, na podstawie których kontroler ustawia odpowiednią temperaturę wody dostarczanej do systemu grzewczego.

Najbardziej powszechny algorytm sterowania ogrzewaniem podłogowym wykorzystuje zależności pomiędzy temperaturą zewnętrzną i temperaturą wody grzewczej nazywaną krzywą grzewczą. Parametry krzywej zależą od preferencji użytkownika oraz właściwości termicznych domu. Przykładowa krzywe grzewcze pokazano na rysunku 1.3. Wadą takiego rozwiązania jest brak informacji, o tym jak zależy temperatura wewnętrzna od temperatury czynnika zasilającego obieg. Obliczenia takie powinny być wykonane podczas konfiguracji urządzenia przez osoby wykwalifikowane z uwzględnieniem strat budynku oraz ilości i rozmiaru urządzeń grzewczych. Na tej podstawie ustawiana jest odpowiednia krzywa grzewcza pod konkretny dom. Niekiedy jednak wymagane są dodatkowe czynności polegające na wybieraniu krzywej mniejszej bądź większej od wyliczonej [4]. Spowodowane jest to niedokładnościami wynikającymi z tolerancji materiałów warstw izolacyjnych domu.



Rys. 1.1 Przykładowa krzywa grzewcza

(<http://www.metalfachtg.com.pl/sterowniki-do-kotlow-seg-i-sd.html>, 20.12.13)

Jak widać na rysunku 1.1, każda funkcja ma swój identyfikator w postaci liczbowej. Przykładowa zależność pokazuje, że czym większy numer krzywej grzewczej, tym temperatura wody grzewczej jest większa dla tej samej temperatury zewnętrznej. Najlepsze i najbardziej dokładnie sterowniki ogrzewania podłogowego wykorzystują kontrolery typu PID.

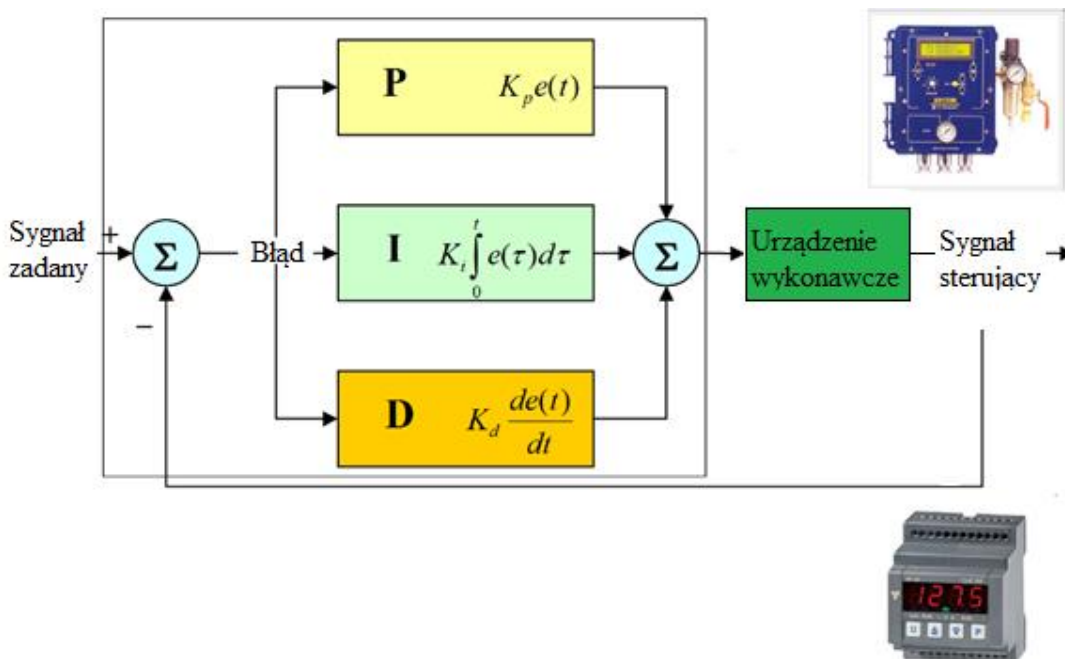
1.3 Sterownik PID

Sterownik PID jest jednym z podstawowych regulatorów stosowanych wspólnie w przemyśle. Szacuje się, że w ostatnim dziesięcioleciu wykorzystywanych było ponad 90% sterowników tego typu [5]. Kontroler PID nie dostarcza optymalnej metody sterowania, lecz osiąga bardzo dobre rezultaty przy prostej strategii działania. Dlatego też nie jest wymagana specyficzna wiedza na temat obiektu regulacji, aby zastosować ten rodzaj sterownika. Konfiguracja przebiega najczęściej za pomocą dobrze znanej i łatwej metody Zieglera-Nicholsa, która zostanie opisana szczegółowo poniżej. Dodatkowo ważnym aspektem kontrolera PID jest zwalczanie takich problemów jak efekt nasycenia zwany Wind-up całkowania. Jest to typowy problem w układach sterowania wykorzystujących pętlę sprzężenia zwrotnego. Regulatory PID znalazły zastosowanie w szerokim zakresie przemysłu. Używane są m.in. do kontroli temperatury, ciśnienia, składu chemicznego, sterowania samolotów, statków czy samochodów. Sterownik występować może w kilku formach, jako standardowa pętla, zaprogramowany komponent systemu lub wbudowany w układ robotyki np. odtwarzacz CD. W sytuacjach, w których nałożone są ekstremalne warunki sterowania (stabilność układu, bardzo szybki czas narastania, mała wartość przeregulowania) stosuje się inne typy kontrolerów np. MPC, RST, SFO, Fuzzy. W przypadku w których obiekt sterowania jest silnie nieliniowy, sterownik PID nie jest również stosowany. Pomimo tego w wielu z tych sterowników jako pierwszy stopień wejścia wykorzystywany jest właśnie regulator PID.

Regulator PID działa pod wpływem pętli sprzężenia zwrotnego. Wylicza on błąd bieżący, który jest różnicą pomiędzy wartością zadaną, a aktualnie zmierzoną na jego wyjściu. Jego działanie powoduje zmniejszenie błędu do zera i osiągnięcie ustawionej wartości[6].

Sterownik PID składa się z trzech elementów przedstawionych na rysunku 1.2:

- element proporcjonalny P, który odpowiada za kompensację błędu bieżącego,
- element całkujący I, zmniejsza błąd skumulowany z przeszłości,
- element różniczkujący D, reaguje na szybkie zmiany błędu, jest swego rodzaju predykcją błędu z przyszłości.



Rys. 1.2 Budowa kontrolera PID

(<http://academic.amc.edu.au/~hnguyen/JEE326/lecture09.pdf>, 21.12.13)

Każda z trzech części posiada współczynnik, który pokazuje jak wielki jest jego wpływ na proces sterowania. Suma ważona tych trzech wartości jest sygnałem wejściowym dla urządzenia sterowanego. Ogólny wzór przedstawiający zasadę działania kontrolera można przedstawić w następujący sposób:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.9)$$

gdzie:

$e(t)$ – aktualny błąd pomiędzy wartością zadaną i otrzymaną na wyjściu sterownika,

K_p – wzmacnienie części proporcjonalnej,

K_i – wzmacnienie części całkującej,

K_d – wzmacnienie części różniczkującej.

Prawidłowe działanie regulatora PID zależy od doboru odpowiednich współczynników elementów. Podczas tego procesu jest brana pod uwagę przede wszystkim stabilność układu i jest to zasadniczym wymogiem działania regulatora. Poza tym wymagane są również takie parametry jak krótki stan przejściowy, najmniejsze przeregulowanie, szybka stabilizacja. W niektórych przypadkach nie są potrzebne wszystkie składowe regulatora PID. Zależy to głównie od charakterystyki obiektu i kryteriów (celu) regulacji. Poprawnie przeprowadzony proces regulacji nie wymaga wcześniejszej wiedzy na temat regulowanego obiektu. Wykorzystywane są do tego celu

doświadczalne metody, stosowane na rzeczywistym obiekcie lub jego przybliżonym modelu matematycznym. W przypadku znajomości transmitancji obiektu, stosuje się inne metody polegające na bezpośrednim wyliczeniu wartości współczynników. W niniejszej pracy zastosowano pierwszy typ regulacji polegający na metodach doświadczalnych. W przybliżony sposób za pomocą równań fizycznych opracowany został model regulowanego obiektu. Istnieje kilka metod nastaw kontrolera.

Przykładową metodą regulacji jest tzw. metoda Good Gain [7]. Na początku wszystkie współczynniki kontrolera PID zostają wyzerowane i zwiększaniu ulega współczynnik części proporcjonalnej do momentu, w którym system przestaje być stabilny. Następnie wartość tego współczynnika zostaje ustawiona na 80% oraz odczytywany jest czas T_{ou} , który określa przedział pomiędzy największą i najmniejszą wartością sygnału po osiągnięciu wartości zadanej. Zostało to przedstawione na rysunku 1.3. Czas całkowania T_i , który jest odwrotnością współczynnika części całkującej obliczany jest z następującej zależności:

$$T_i = 1.5T_{ou}, \quad (1.10)$$

gdzie:

T_i – czas całkowania,

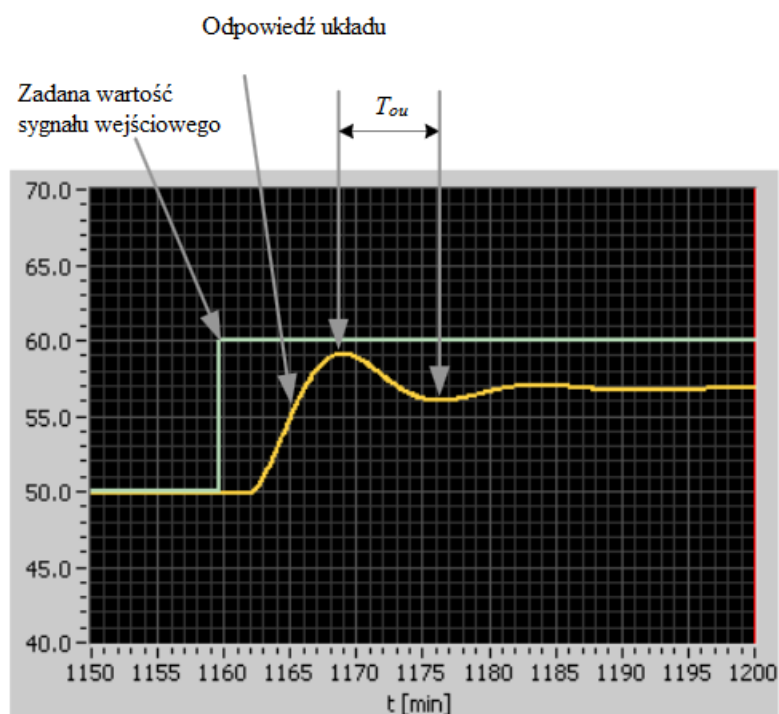
T_{ou} – czas pomiędzy maksymalną a minimalną wartością sygnału.

W przypadku w której wymagany jest szybki czas ustalania, dodany zostaje element różniczkujący. Wartość tego współczynnika obliczana jest z okresu różniczkowania, który wynosi:

$$T_d = \frac{T_i}{4}, \quad (1.11)$$

gdzie:

T_d – okres różniczkowania.



Rys 1.3 Odczyt czasu pomiędzy dwoma skrajnymi punktami sygnału po osiągnięciu zadanej wartości
(http://techteach.no/publications/articles/good_gain_method/good_gain_method.pdf 30.12.2013)

Inny powszechnie stosowany sposób regulacji nastaw nosi nazwę Metody Zieglera-Nicholsa [8]. Polega ona na pomiarze wielkości oscylacji. Jej początkowy przebieg jest podobny do metody Good Gain. Zwiększanie współczynnika elementu proporcjonalnego trwa do momentu, w którym sygnał wyjściowy zacznie oscylować i wyznacza on krytyczne wzmocnienie układu K_c oraz okres oscylacji T_c . Następnie wykorzystywane są zależności pomiędzy tymi wielkościami i wartościami współczynników, co pokazano w tabeli 1.1.

Tabela 1.2 Dobór nastaw metodą Zieglera-Nicholsa

(<http://courses.csail.mit.edu/6.141/spring2011/pub/lectures/Lec03-MotorControl.pdf>, 21.12.2013)

	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_c$		
PI	$0.45K_c$	$1.2K_p/T_c$	
PID	$0.5K_c$	$2K_p/T_c$	$K_pT_c/8$

2 Symulacje

Prawidłowe podejście do każdej pracy badawczo-technicznej wymaga od inżyniera wiedzy na dany temat oraz znajomości narzędzi, którymi będzie się posługiwał. Przed przystąpieniem do realizacji projektu przygotowano odpowiednie środowisko robocze. Wybrano najbardziej odpowiednie programy, które będą służyć do symulacji modelu obiektu.

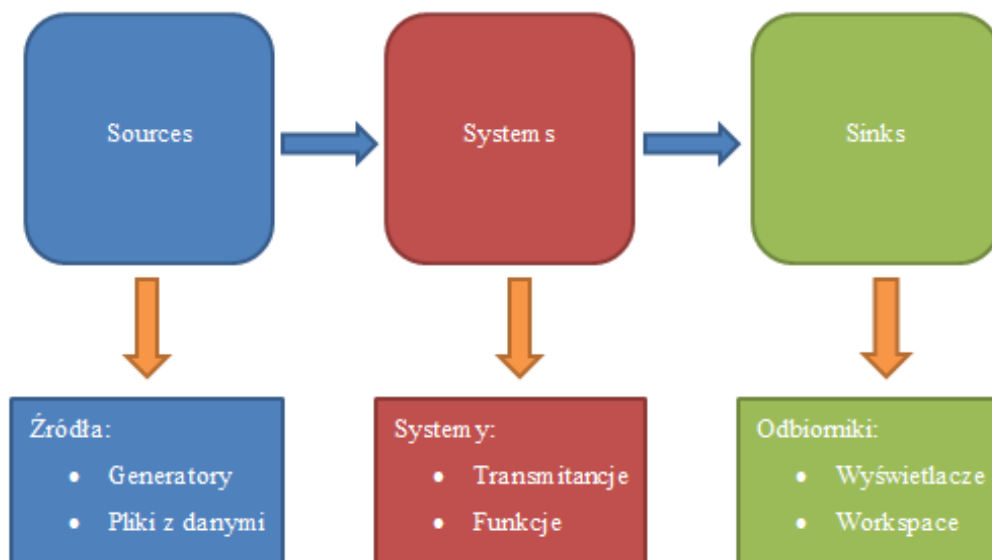
2.1 Narzędzie symulacyjne Simulink

Do symulacji wymiany ciepła pomiędzy dwoma ośrodkami, autor posłużył się programem Simulink firmy The MathWorks [9]. Słuszność w jego wyborze jest udowodniona przez wielu specjalistów z całego świata. Program ten służy przede wszystkim do [10]:

- graficznego projektowania systemów z różnych dziedzin techniki np. systemów mechanicznych, elektrycznych w jednym spójnym środowisku,
- wykonywania obliczeń technicznych i pisanie algorytmów,
- modelowania systemów opartych na schematach blokowych, których algorytm przedstawiony jest w postaci diagramu,
- symulacji w czasie ciągłym lub dyskretnym zestawionego układu (bloki mogą być napisane w języku C/C++),
- analizy wyników zebranych podczas symulacji.

Tak zaawansowane narzędzie wymaga jednak sporych nakładów finansowych i stanowi to główne ograniczenie w wyborze tego oprogramowania. W wersji przeznaczonej dla studentów trzeba zapłacić około 300zł za podstawowy pakiet Matlaba i prawie 80zł za każdy dodatkowy moduł.

Realizacja modelu większego systemu jest zbiorem połączeniem kilku bloków. Każdy blok reprezentuje inną funkcjonalność oraz własne parametry konfiguracyjne. W programie Simulink wyróżnić można trzy najważniejsze grupy modeli co zostało przedstawione na rysunku 2.1.

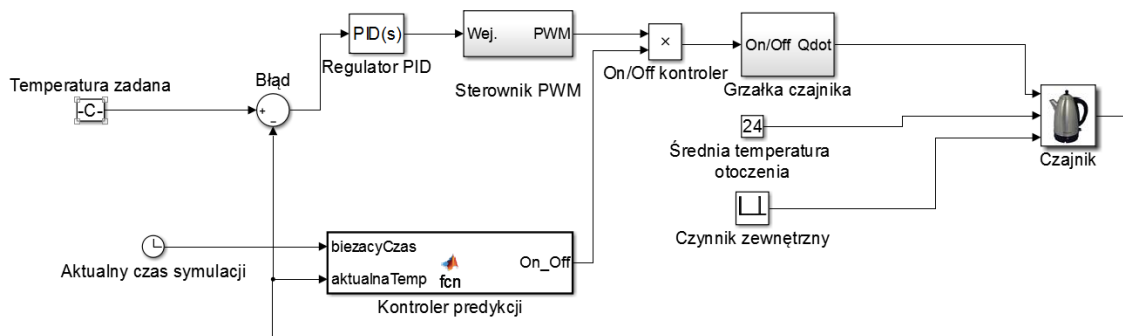


Rys. 2.1 Modele wykorzystywane w programie Simulink

(http://home.elka.pw.edu.pl/~mwyrzyk/mzmo_mwyrzyk/SIMULINK-wyklad.pdf, 21.12.2013)

2.2 Opracowanie modelu badań

W niniejszej pracy został opracowany model systemu grzewczego. Opracowano go na podstawie przykładu dostępnego ze środowiska Simulink [11] i przedstawiono na rysunku 2.2. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone symulacje zostały wykonane dla obiektu, który nie był budynkiem, lecz czajnikiem elektrycznym. Powodem tej decyzji jest brak rzeczywistego systemu ogrzewania podłogowego, na którym to mogłyby zostać wykonane testy końcowe. W przypadku czajnika elektrycznego, elementy jego budowy dobrze odpowiadają składnikom domu. Czajnik jako obiekt materialny posiada obudowę, która może być odpowiednikiem ścian budynku. W dodatku system grzewczy znajduje się również w dolnej części obiektu. Dokładniejsze uzasadnienie tego wyboru zostanie przedstawione w rozdziale następnym.



Rys 2.2 Model ogrzewania w programie Simulink

W modelu tym można wyróżnić kilka połączonych ze sobą bloków:

- *Set Temp* – temperatura zadana przez użytkownika,
- *Terr* – różnica temperatury bieżącej i zadanej, tzw. uchyb bieżący,
- *PID Controller* - wbudowany w środowisko kontroler PID,
- *PWM* – sterownik modulacji PWM,
- *On/Off Controller* – połączenie kontrolera predykcyjnego z sterownikiem PWM,
- *Heater* – źródło energii obiegu wewnętrznego,
- *Avg Room Temp* – średnia temperatura otoczenia,
- *Out Heater* – dodatkowe źródło energii zewnętrznej,
- *Kettle* – główny obiekt doświadczenia,
- *Predictive Controller* – kontroler predykcji czynnika zewnętrznego
- *Clock* – aktualny czas symulacji

Bardzo ważnym elementem sterującym grzałką czajnika jest sterownik modulacji PWM. W najprostszych układach regulacji temperatury stosuje się przełącznik dwustanowy z histerezą. Bazuje on na cyklicznym załączaniu i wyłączeniu pełnej mocy grzałki. Podczas załączenia grzałki temperatura obiektu rośnie do momentu w którym osiągnie wartość zadaną. Następuje wtedy odłączenie źródła mocy. Takie działanie prowadzi do oscylacji temperatury oraz do jej przeregulowania spowodowanego bezwładnością grzałki. W przypadku sterowania PWM metoda regulacji polega na wypełnieniu średniej mocy grzałki. Realizowane jest to poprzez modulację szerokości impulsu prądu lub napięcia w stałym okresie czasu. Sterownik PWM steruje mocą grzałki od wartości zerowej do wartości maksymalnej w zależności od sygnału wejściowego. Gdy wartość tego sygnału jest mała, na wyjściu sterownika pojawi się bardzo krótki impuls stanu wysokiego. Natomiast kiedy sygnał sterujący będzie duży, stan wysoki będzie utrzymywany przez większość czasu.

Tak przygotowany model jest w stanie zasymulować działanie systemu w zależności od temperatury zadanej i czynnika zewnętrznego. Po ustawieniu temperatury docelowej, jest ona odejmowana od temperatury bieżącej obiektu. Sygnał T_{err} reprezentuje wówczas błąd, który z kolei trafia do kontrolera PID. Współczynniki elementów regulatora zostały dobrane metodą doświadczalną w taki sposób, aby

odpowiadały zakresowi pracy sterownika PWM. W tym przypadku zakres sygnału sterującego wynosił 0-1. Dlatego też ich wartości są niewielkie i prezentują się następująco:

- $K_p = 0.05$

- $K_i = 0.0001$

- $K_d = 0.00002$

Tak dobrane parametry, powodowały że sygnał wyjściowy z kontrolera PID zawierał się w przedziale 0-2.5 sterując temperaturą w zakresie 40-70°C. Kolejno wyjście ze sterownika PWM podawane było na blok, który realizował funkcję logiczną AND. Drugim wejściem tego bloku był sygnał pochodzący z regulatora predykcyjnego czynnika zewnętrznego. W przypadku, gdy ich wartości były logiczną prawdą, system grzewczy zaczynał pracować. Czynniki, które mają bezpośredni wpływ na symulowany blok to temperatura otoczenia oraz zewnętrzne źródło ciepła.

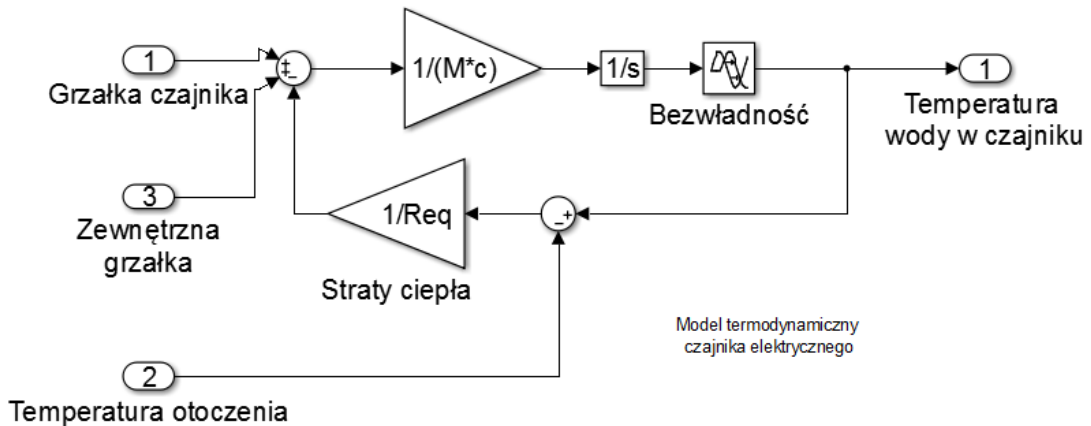
W procesie ogrzewania domu ważnym czynnikiem dostarczającym ciepło jest słońce. Aby móc wykorzystać dodatkowy strumień energii w sposób pozytywny potrzebna jest jego predykcja. Polega ona na wykorzystaniu ciepła pochodzącego ze słońca prognozowanego w przyszłości. Sterowanie predykcyjne jest wówczas wymagane ze względu na dużą bezwładność systemu ogrzewania podłogowego, który wynosi około 4-6h [12].

Dla uproszczenia, źródło energii zewnętrznej zostało przedstawione w postaci funkcji prostokątnej, która była znana kontrolerowi predykcyjnemu. Jego realizacja była oparta wówczas o funkcję napisaną w języku MATLAB. Wejścia kontrolera stanowiły aktualny czas symulacji oraz temperatura obiektu. Znając moc wymuszenia oraz przedziały w których będzie ono występowało, algorytm mógł sterować ogrzewaniem w sposób zapobiegający przegrzewaniu pomieszczeń oraz minimalizujący pobór energii z systemu grzewczego.

Fizyczna realizacja procesów zachodzących w obiekcie opisana jest zależnościami (1.4)-(1.9). Wejścia regulowanego obiektu prezentowane są w postaci temperatury otoczenia oraz dwóch strumieni ciepła (patrz rysunek 2.3). Źródła energii trafiają bezpośrednio na blok sumujący, w którym odejmowana zostaje część energii oddawana do otoczenia. Pomnożenie przez odwrotność iloczynu masy i ciepła

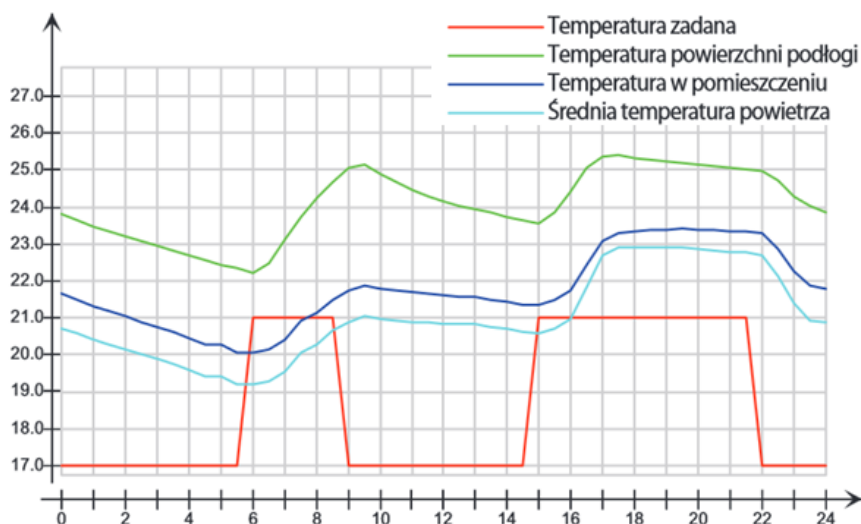
właściwego substancji, oraz scałkowanie takiego sygnału powoduje, że na jego wyjściu otrzymywana jest temperatura:

$$T_{in} = \int \frac{1}{Mc} (Q_{heater} - Q_{losses} + Q_{out heater}) [^{\circ}C]. \quad (2.1)$$



Rys 2.3 Reprezentacja modelu obiektu symulacji

W modelu zaprezentowanym na rysunku 2.2 został uwzględniony blok reprezentujący opóźnienie. Ma on na celu symulację bezwładności jaka występuje w analizowanym zjawisku fizycznym. W przypadku ogrzewania podłogowego, włączając źródło energii, użytkownik nie odczuwa jego działania przez pierwszych 4-6h godzin (patrz rysunek 2.4). Dzieje się tak z powodu dużej bezwładności elementów grzewczych systemu. Zjawisko to występuje również podczas odłączania źródła ciepła. Wtedy energia dostarczana jest jeszcze przez pewien czas od nagranych składników układu.

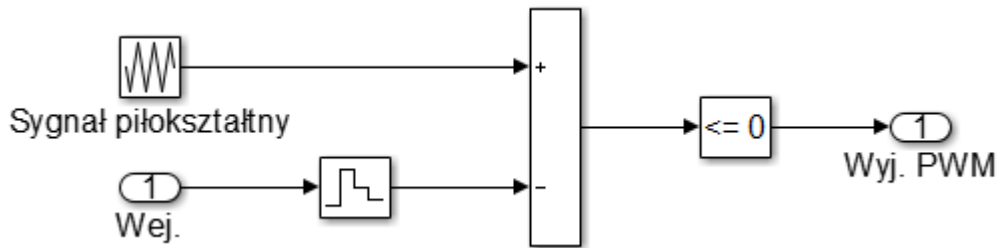


Rys 2.4 Przykładowy wykres temperatur w domu wykorzystującym ogrzewanie podłogowe
(http://pl.heating.danfoss.com/PCMPDF/Handbook_Introduction_VGDYA149.pdf 30.12.2013)

Do obliczenia strumienia ciepła oddawanego z obiektu do otoczenia, wykorzystywany jest bezwzględny współczynnik przenikania ciepła R_{eq} :

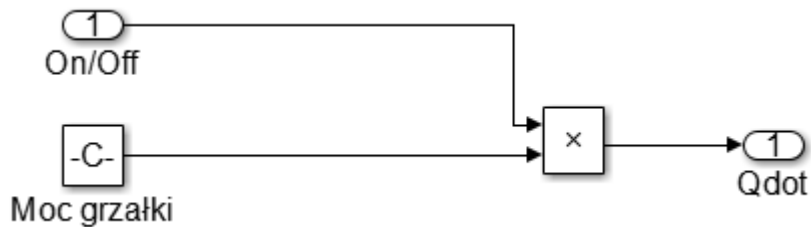
$$\frac{dQ_{losses}}{dt} = \frac{T_{in} - T_{out}}{R_{eq}} [W]. \quad (2.2)$$

Pozostałe bloki wykorzystane w modelu przedstawiają rysunki 2.5 i 2.6:



Rys 2.5 Sterownik PWM

(<http://www.mathworks.com/help/slcontrol/ug/models-with-pulse-width-modulation-pwm-signals.html>, 22.12.2013)



Rys 2.6 Jedno poziomowy włącznik układu grzewczego

2.3 Wyniki symulacji

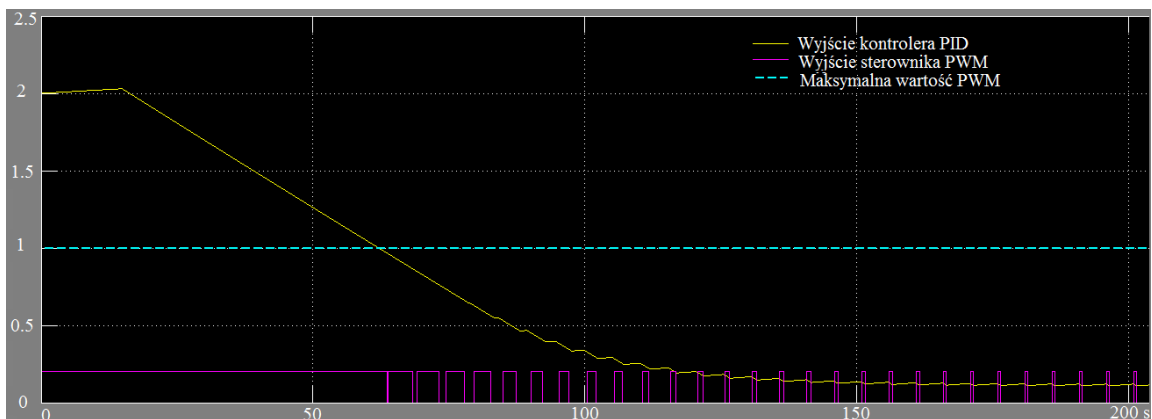
Pierwszym etapem podczas symulacji było wyznaczenie metodą doświadczalną nastaw regulatora PID, tak by spełniał swoje założenie sterowania temperaturą w zakresie 40-70 °C. Podczas realizacji tego zadania pomocne okazały się wykresy zaprezentowane na rysunku 2.6 i 2.10.

Na początku została oszacowana wartość współczynnika części proporcjonalnej. Obliczenia te uwzględniały zakres sterowania temperaturą oraz zakres pracy sterownika PWM (0-1). Do tego celu przyjęta została średnia wartość temperatury otoczenia na poziomie 20 °C. Przy maksymalnie zadanej wartości temperatury błąd bieżący wynosił 70-20=50. Przy takiej wartości należało obliczyć współczynnik elementu proporcjonalnego, dla którego zostanie otrzymany maksymalny sygnał wejściowy sterownika PWM:

$$50Kp = 1. \quad (2.3)$$

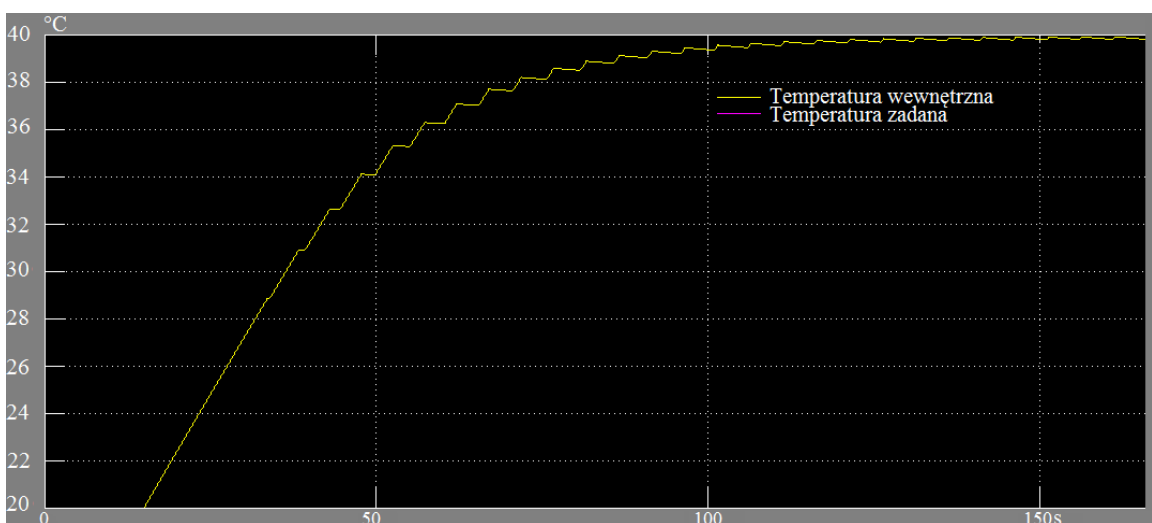
Na tej podstawie wyliczono przybliżony współczynnik części proporcjonalnej, który wyniósł 0.02. Wartość ta była stopniowo zwiększana aż do wartości 0.05, która okazała

się graniczna z powodu występujących oscylacji. Kolejno eksperymentalnie wyznaczony został współczynnik całkujący, który jak wiadomo powinien być mniejszy od współczynnika proporcjonalnego. Stopniowe obniżanie jego wartości, umożliwił otrzymanie zadanej temperatury przy dobrej dokładności na poziomie 0.5 °C. Brak współczynnika całkującego powodował, że otrzymywana temperatura była zawsze mniejsza o 2-4 °C od temperatury zadanej. W końcowym etapie regulacji dodano współczynnik różniczkujący, który nie miał jednak większego znaczenia w sterowaniu temperaturą. Pozwolił on nieznacznie zmniejszyć czas ustalania zadanej temperatury.

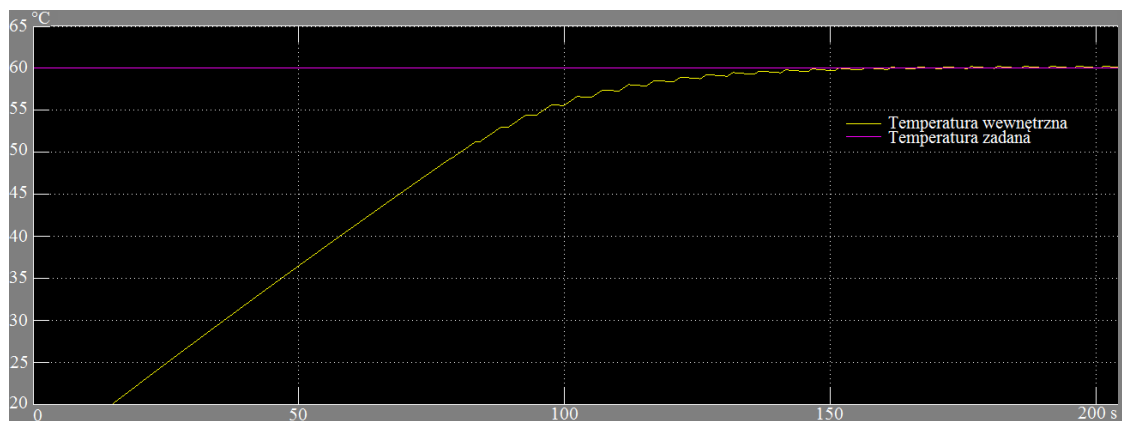


Rys. 2.6 Przykładowe wartości kontrolera PID oraz sterownika PWM

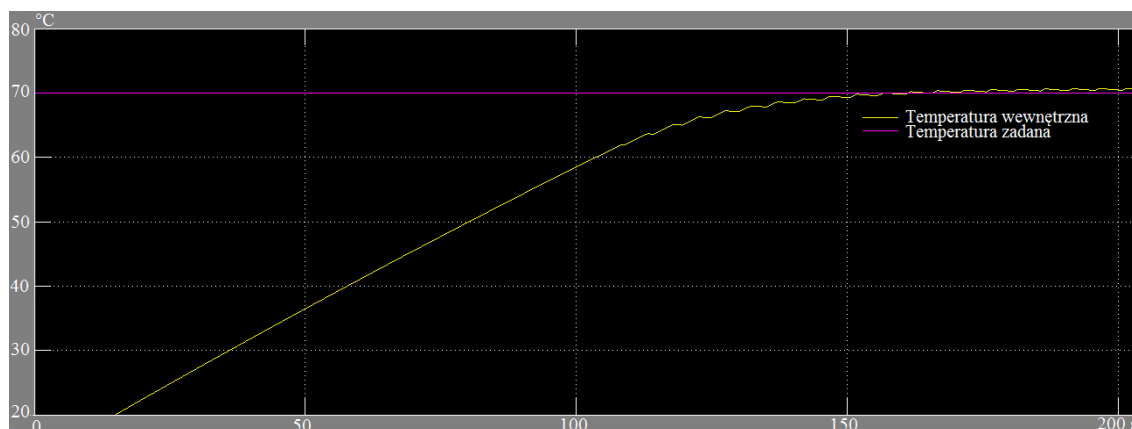
Rysunek 2.6 przedstawia przykładowe sygnały wyjść sterowników PID oraz PWM. Wykres pokazuje jak zmienia się wypełnienie impulsów sterujących grzałką w zależności od wartości regulatora PID. Takie dane okazały się bardzo przydatne podczas doboru współczynników kontrolera PID.



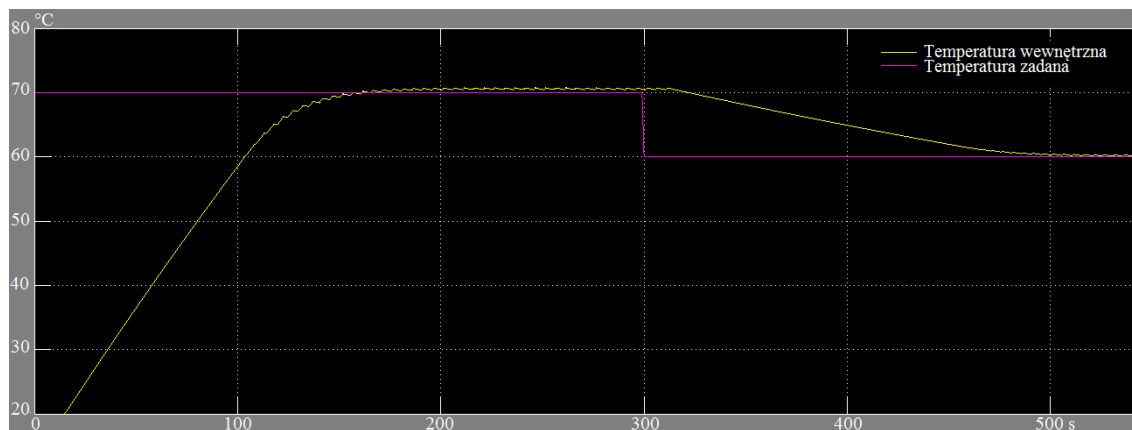
Rys. 2.7 Ogrzewanie do temperatury 40 °C



Rys. 2.8 Ogrzewanie do temperatury 60 °C



Rys. 2.9 Ogrzewanie do temperatury 70 °C

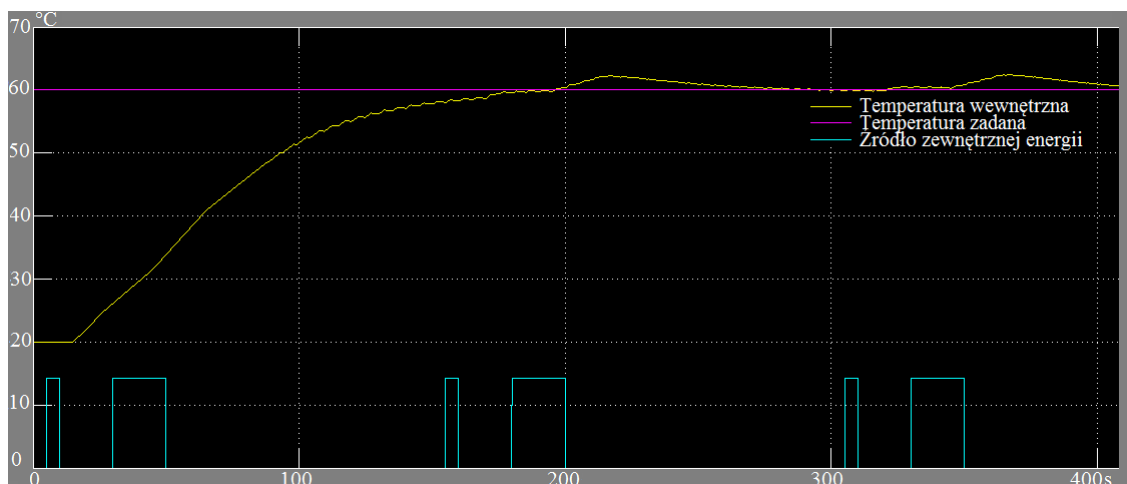


Rys. 2.10 Przejściowe ogrzewanie do temperatury 70 °C i 60 °C

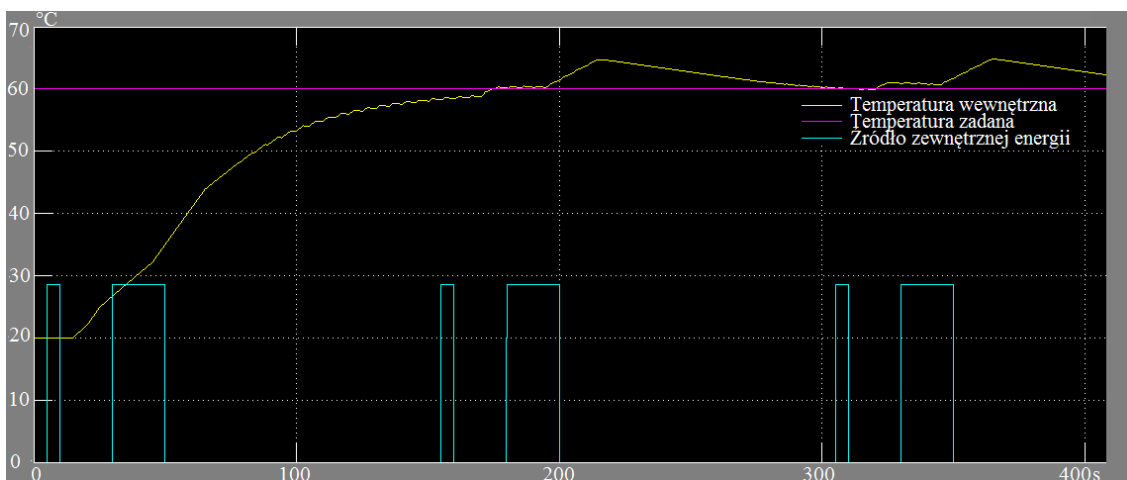
Rysunki 2.7 i 2.9 przedstawiają sterowanie temperaturą obiektu w zakresie 40-70 °C. Tak dostrojony regulator pozwala kontrolować grzałkę czajnika, aby w możliwie krótkim czasie została otrzymana zadana temperatura wody. Ustalanie temperatury nie wywołuje początkowego efektu przeregulowania. Jest to spowodowane stopniowym wychładzaniem grzałki w skutek coraz krótszych impulsów prądu dostarczanego do jej styków. Dobrze widać to podczas zbliżania się temperatury obiektu do wartości zadanej. Dokładność systemu jest również na bardzo wysokim poziomie, ponieważ

utrzymana wartość temperatury nie odbiega więcej niż $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ od temperatury zadanej. Procesu ogrzewania nie da się bardziej przyspieszyć, ponieważ jest to ograniczone możliwościami składnika grzewczego. Ponadto na rysunku 2.10 zaprezentowano działanie systemu umożliwiającego zmianę temperatury z $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. W tym przypadku regulator PID także dobrze spełnia swoje założenia. Argumenty te dowodzą, że kontroler PID został prawidłowo dostrojony do swojego systemu działania.

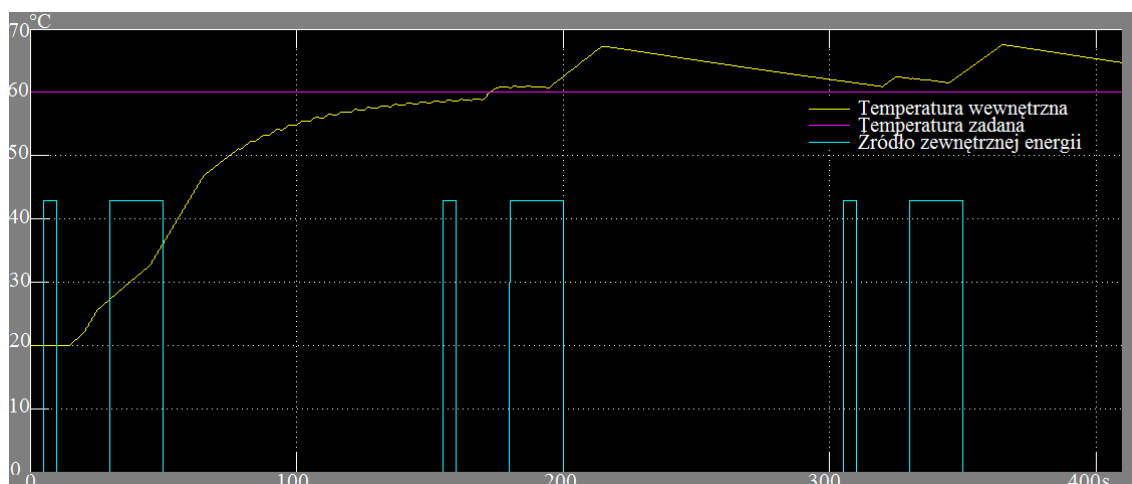
Następnie do tak zbudowanego systemu dodane zostało źródło energii, które reprezentuje słońce w rzeczywistym układzie. Jest to niezależny czynnik, którym nie da się sterować, ale można przewidzieć kiedy zacznie działać. Celem dodania takiego źródła jest opracowanie kontrolera predykcji umożliwiającego wykorzystanie dodatkowej energii pochodzącej z tego źródła. Jego wpływ został zasymulowany dla trzech wymuszeń różniących się wielkością mocy. Przedstawione zostało to na rysunkach 2.11 i 2.13



Rys 2.11 Wpływ czynnika zewnętrznego na temperaturę obiektu



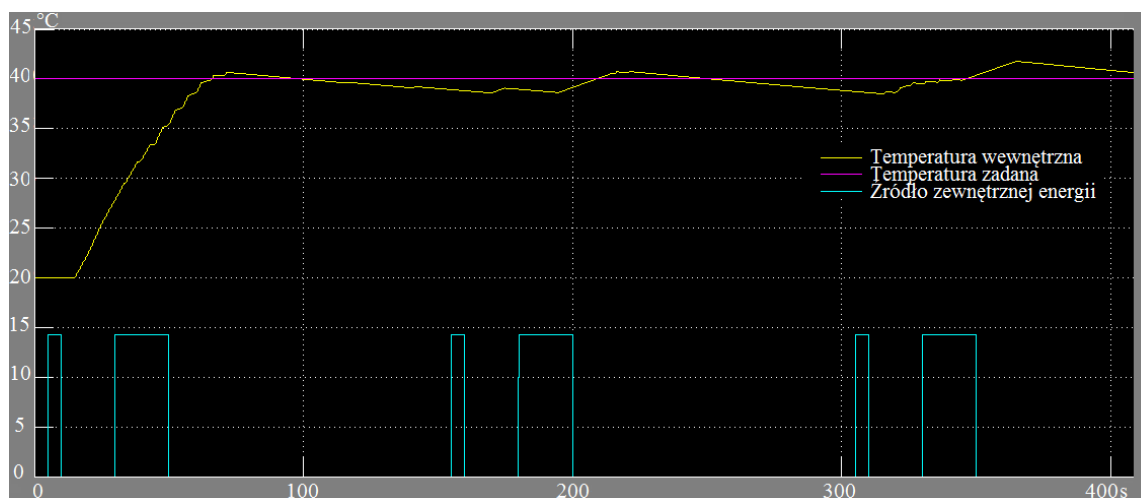
Rys 2.12 Wpływ czynnika zewnętrznego o mocy dwa razy większej



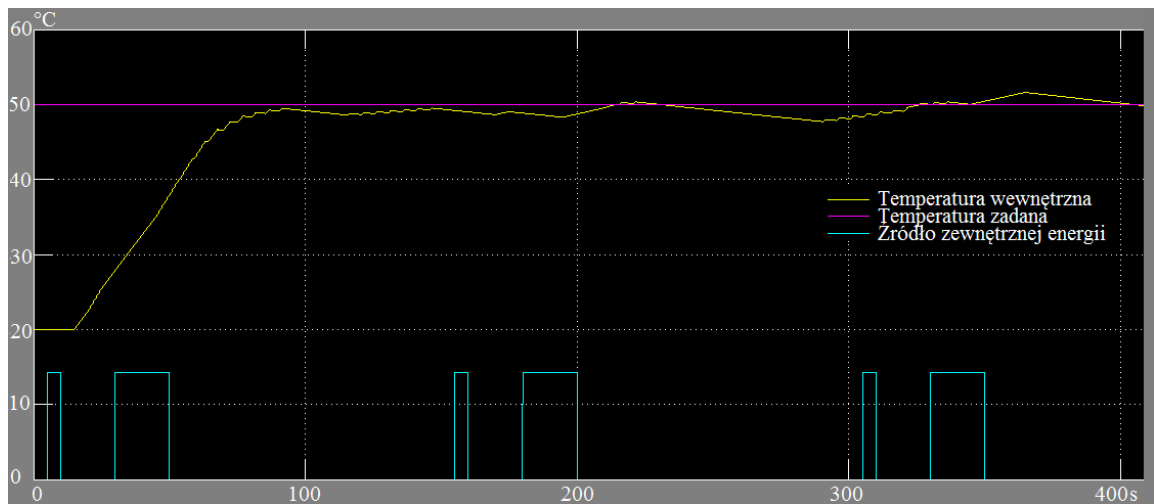
Rys 2.13 Wpływ czynnika zewnętrznego o mocy trzy razy większej

Końcowym etapem symulacji było opracowanie funkcji sterownika predykcyjnego, umożliwiającego wcześniejsze zapobieganie przegrzewania obiektu. Skutkiem rozwiązania tego problemu było uśrednienie błędu temperatury pomiędzy przegrzaniem, a niedogrzaniem. Użytkownik takiego systemu będzie odczuwał mniejszy dyskomfort w przypadku, gdy temperatura będzie wahała się o $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ od temperatury zadanej, niż gdyby pomieszczenie zostało przegrzane o $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Następnym pozytywnym efektem predykcyjnego sterowania jest wyłączenie ogrzewania zanim czynnik zewnętrzny zacznie działać co, zmniejszy koszty eksploatacji systemu grzewczego, oraz pośrednio zanieczyszczenie środowiska.

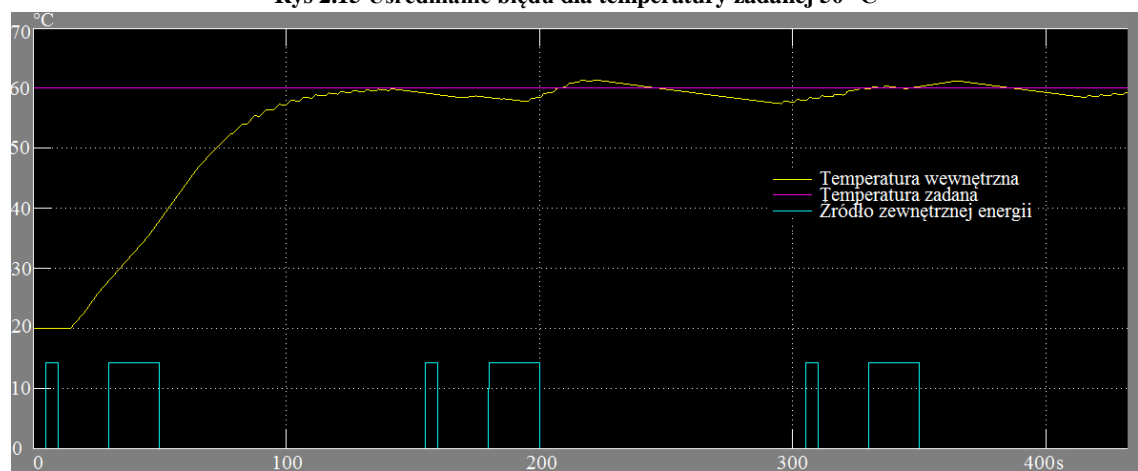
Rysunki 2.14 i 2.17 przedstawiają opisany sposób predykcji czynnika zewnętrznego dla różnych wartości temperatury zadanej.



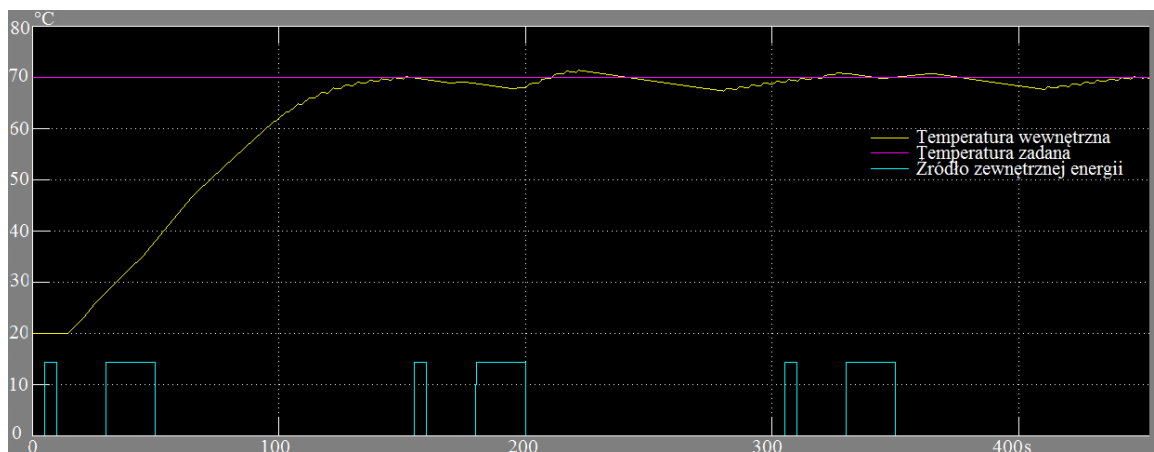
Rys 2.14 Uśrednianie błędu dla temperatury zadanej $40\text{ }^{\circ}\text{C}$



Rys 2.15 Uśrednianie błędu dla temperatury zadanej 50 °C



Rys 2.16 Uśrednianie błędu dla temperatury zadanej 60 °C



Rys 2.17 Uśrednianie błędu dla temperatury zadanej 70 °C

Predykcyjny algorytm spełnia dobrze swoją rolę niezależnie od wielkości mocy czynnika zewnętrznego (patrz tabela 2.1). Do jego poprawnej pracy wymagana jest jedynie znajomość wartości wymuszenia i czasu wystąpienia. Jak można zauważyć na rysunkach 2.14 i 2.17, obiekt jest bardziej niedogrzany niż przegrzany. Spowodowane

jest to tym, że kontroler PID podaje bardzo małą wartość, gdy błąd jest bliski zeru. Sterownik PWM ustawia wówczas na swoim wyjściu stan wysoki na zbyt krótką chwilę. Temperatura obiektu zbliża się bardzo powoli do temperatury zadanej. Przyczyna leży w implementacji algorytmu zakładającej stały strumień ciepła oddawanego przez obiekt. Wiadomo jednak, że wielkość ta zależy liniowo od różnicy temperatur pomiędzy obiektem, a otoczeniem. Dlatego też im większa temperatura obiektu, tym straty z powodu oddawania ciepła są większe niż zakładane przez algorytm.

Tabela 2.1 Porównanie algorytmów z predykcją i bez predykcji

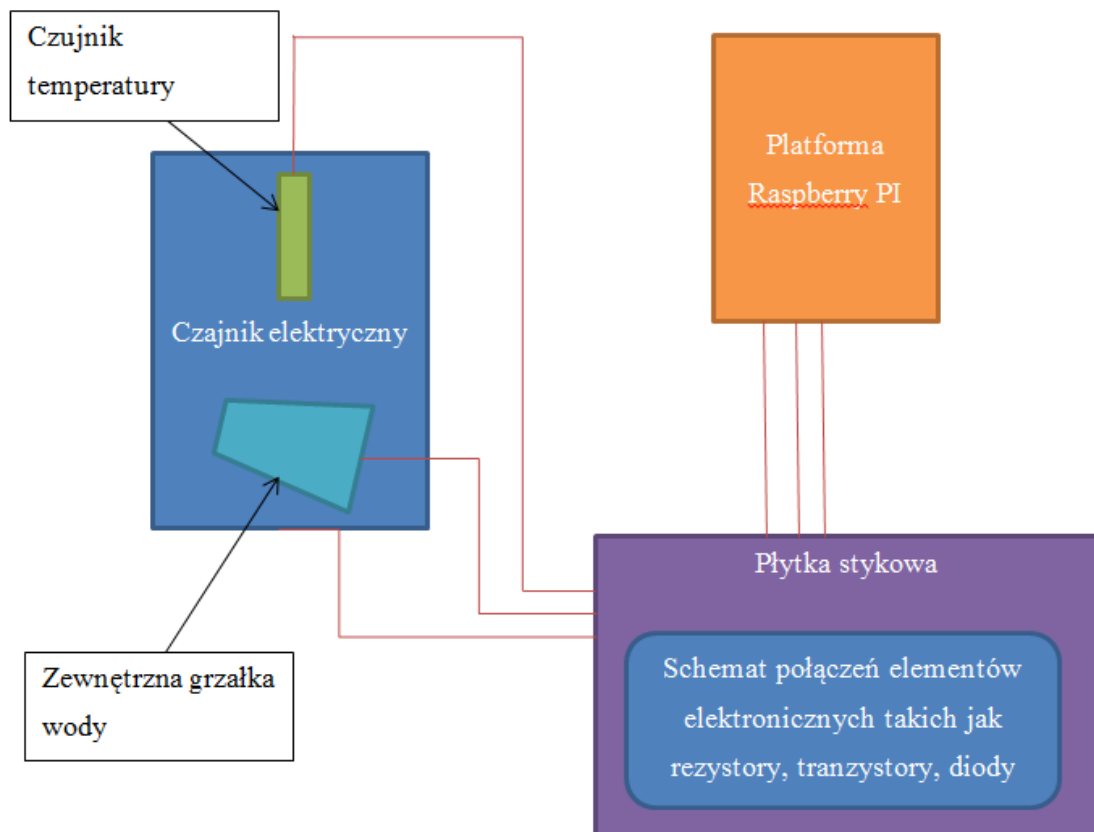
Temperatura zadana [°C]	Błąd średni [°C] dla: Moc grzałki czajnika: 2 kW Moc grzałki zewnętrznej: 0.5 kW		Błąd średni [°C] dla: Moc grzałki czajnika: 0.5 kW Moc grzałki zewnętrznej: 1 kW	
	Z predykcją	Bez predykcji	Z predykcją	Bez predykcji
40	0.692	1.025	11.018	15.818
50	1.244	0.937	2.577	6.158
60	1.391	1.782	2.948	5.416
70	1.493	1.655	2.932	5.054

Dane zawarte w tabeli 2.1 pokazują zalety stosowania sterownika predykcyjnego. Zaprezentowano średnie wartości błędów temperatury obiektu odbiegające od temperatury zadanej. Przy wzroście mocy czynnika zewnętrznego algorytm predykcyjny zyskuje coraz większą przewagę. W pierwszym przypadku nie widać znacznej różnicy pomiędzy działaniem algorytmów, ponieważ średnia moc zewnętrznego źródła energii okazała się zbyt mała, aby wpłynąć znacznie na temperaturę obiektu. W przypadku zwiększenia mocy czynnika zewnętrznego, algorytm wykorzystujący predykcję pozwala na mniejszy błąd temperatury. Wysoki błąd przy temperaturze zadanej 40 °C jest spowodowany zbyt wolnym oddawaniem ciepła z obiektu. Obiekt nie jest w stanie oddać ciepła pobranego z czynnika zewnętrznego przed jego kolejnym nadejściem.

3 Implementacja

3.1 Realizacja ogrzewania podłogowego

Kolejnym etapem pracy było zestawienie i sprawdzenie działania układu w praktyce. Z powodu braku dostępu do rzeczywistego systemu ogrzewania opracowano alternatywny sposób jego realizacji. Posłużono się zatem analogią do czajnika elektrycznego. Użyto następujących elementów: czajnik elektryczny o mocy 2kW, grzałka do wody o mocy 0.5kW, czujnik temperatury DS18B20, elementy elektroniczne (tranzystory bipolarne, rezystory, diody prostownicze, przekaźniki), płytki stykowe, przewody elektryczne [13]. Ideowy schemat fizycznego układu przedstawia się następująco:



Rys 3.1 Schemat ideowy zrealizowanego układu

Uzasadnieniem takiego podejścia są podobieństwa występujące pomiędzy domem i ogrzewaniem podłogowym, a czajnikiem elektrycznym co podsumowano w tabeli 3.1.

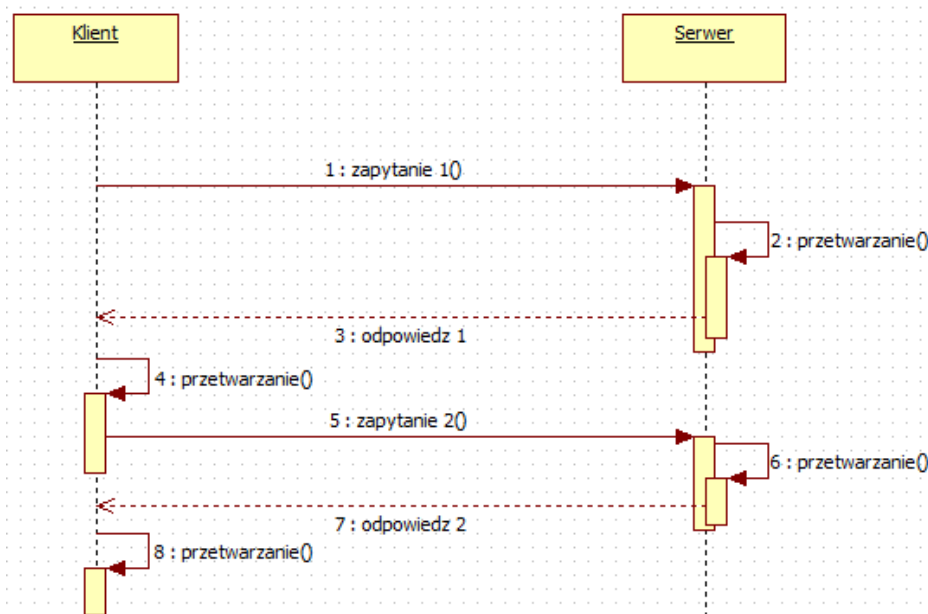
Tabela 3.1 Podobieństwa pomiędzy ogrzewaniem podłogowym i czajnikiem elektrycznym

	Ogrzewanie podłogowe	Czajnik elektryczny
Budowa	Dom prezentowany jest poprzez ściany, okna i dach. Znane są wszystkie parametry opisujące materiał i wielkość domu.	Obudowa czajnika. Można policzyć powierzchnie oraz współczynnik przewodnictwa cieplnego.
Element grzewczy	System rurek umieszczonych pod podłogą. Przepływająca woda oddaje ciepło podłodze.	Grzałka czajnika elektrycznego, również umieszczona jest na dnie obudowy.
Czynnik zewnętrzny	Słońce jako naturalne źródło energii. Jest niezależne i potrzebna jest jego predykcja.	Dodatkowa grzałka do wody odzwierciedla alternatywne i niezależne źródło ciepła.
Ośrodek	Powietrze ogrzewane w pomieszczeniu.	Woda ogrzewana w czajniku.
Zjawiska przyrodnicze	Wymiana ciepła pomiędzy wnętrzem budynku, a środowiskiem zewnętrznym. Przegrodę stanowią ściany zewnętrzne, okna i dach.	Wymiana ciepła pomiędzy wodą w czajniku, a otoczeniem zewnętrznym. Barierej stanowi obudowa czajnika.

Uwzględnione zostały również znaczne dysproporcje w czasie. W ogrzewania podłogowym stała czasowa budynku jest zdecydowanie większa od jej odpowiednika w czajniku. W przypadku czajnika, proces nagrzewania i oddawania ciepła zajmuje kilka minut, natomiast w domu jest to rząd kilku godzin. Zaprezentowany algorytm sterowania jest uniwersalny dlatego też, równie dobrze mógłby zostać wykorzystany w rzeczywistym systemie grzewczym po uwzględnieniu nowych parametrów systemu co wymaga, ponownego strojeniem regulatora PID.

3.2 Architektura systemu

Sposób w jakim użytkownik może zdalnie sterować domem oparty został o architekturę klient-serwer. Systemy o takiej architekturze coraz częściej zostają wdrożone do zarządzania automatyką inteligentnego domu. Dzieje się to za sprawą dynamicznego rozwoju sieci telekomunikacyjnych i łatwego dostępu do sieci Internet. Serwer pełni w takim przypadku rolę dostawcy usług, z których korzysta klient. Wymiana danych pomiędzy dwoma stronami może odbywać się w sposób synchroniczny lub asynchroniczny [14]. Każde żądanie klienta, jest przetwarzane po stronie serwera a następnie zwracana jest stosowna odpowiedź, co zaprezentowano na rysunku 3.2.



Rys 3.2 Komunikacja pomiędzy klientem i serwerem

Interfejsem klienta jest zazwyczaj przeglądarka internetowa lub rzadziej dedykowane oprogramowania np. aplikacja dla systemu Android lub iOS. Jest to uwarunkowane założeniami bezpieczeństwa oraz łatwej obsługi przez każdego użytkownika Internetu. Do komunikacji jest wykorzystywany dobrze ustandaryzowany model protokołów TCP/IP. W tak zaprojektowanej aplikacji internetowej, całość oprogramowania skupiona jest po stronie serwera, który jest sercem całego systemu.

3.3 Platforma Raspberry PI

Do realizacji strony serwerowej została wykorzystana platforma o nazwie Raspberry PI, model B [15]. Jej główną zaletą jest bardzo mały rozmiar, wielkości karty kredytowej, niskie zużycie energii (maksymalnie 5 W) oraz zintegrowanie wszystkich niezbędnych modułów na jednej płycie głównej. Jej pierwotnym zastosowaniem była nauka w szkołach z zakresu podstaw działania komputerów. Jednakże dzisiaj, platforma ta jest wykorzystywana zarówno przez amatorów, jak i przez profesjonalistów z różnych dziedzin. O tym jak bardzo dużym zainteresowaniem cieszy się platforma pokazuje informacja, mówiąca o sprzedaniu 2 milionów egzemplarzy [16]. Zastosowania w jakich może być wykorzystywana, zależą głównie od wyobraźni użytkownika. Jako system operacyjny wykorzystuje się zazwyczaj rodzinę systemów Linux dla architektury ARM. W tym przypadku podstawowa dystrybucja to Raspbian. Z tego powodu można go używać jako zamiennika dla zwykłego komputera.



Rysunek 3.3 Wygląd komputera Raspberry PI oraz logo firmy
(<http://www.kamami.pl/index.php?productID=196694>, 22.12.13)

Najważniejsze wyposażenie platformy:

- 2 porty USB,
- 2 wyjścia wideo: Composite RCA oraz HDMI,
- Wyjście audio – 3.5 mm jack,
- Karta sieciowa 10/100 Ethernet (RJ45),
- 8 nisko-poziomowych, ogólnego zastosowania portów wejścia/wyjścia.

Dodatkowo mogą zostać dołączone kolejne peryferia np. bezprzewodowa karta WiFi, bezprzewodowy zestaw klawiatury i myszy, dodatkowy hub USB. Kluczowym wykorzystaniem tej platformy są nisko-poziomowe wyjścia, uniwersalne i programowalne porty we/wy, za pomocą których można sterować różnymi urządzeniami elektronicznymi.

3.4 Struktura aplikacji i wykorzystane technologie

Kolejnym niezaprzeczalnym dowodem na to jak bardzo popularna i chętnie używana jest platforma Raspberry PI jest istnienie co najmniej trzydziestu dystrybucji systemów operacyjnych dla tej platformy sprzętowej [17]. Są one dostosowane do konkretnych celów np. centrum multimedialne, emulacja środowiska Android, systemy nastawione na bezpieczeństwo czy też ogólnego zastosowania. W niniejszej pracy wykorzystano dystrybucję z ostatniej grupy o nazwie Raspbian. Jest to bardzo dobrze rozwinięty i stabilny system co potwierdzają użytkownicy całego świata. Dodatkowym atutem jest prostota obsługi i standardowa konfiguracja. Oparty jest on o projekt wolnej dystrybucji systemu operacyjnego Debian, który cieszy się opinią bardzo stabilnego systemu. Sposób instalacji i użytkowania platformy jest bardzo przejrzyste udokumentowany, co wpływa również na łatwość jej używania.

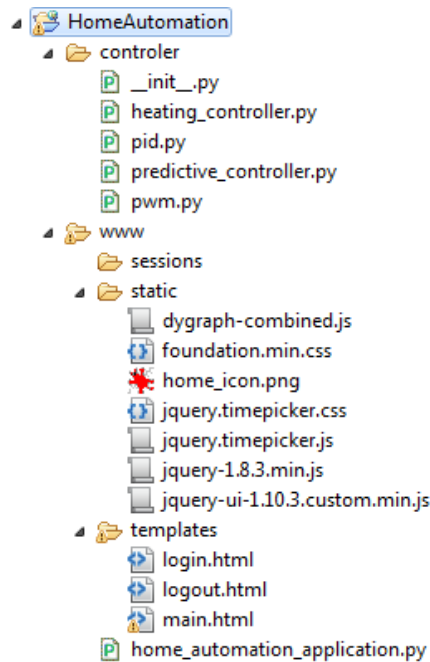
Zalecanym przez producenta językiem programowania na platformie Raspberry PI jest Python [18]. Nie ogranicza to jednak w żaden sposób możliwości korzystania tylko z tego narzędzia. Dostępne są również najbardziej popularne języki programowania jak np. C, C++, czy Java. Większość obecnie dostępnych programów oraz bibliotek dla tej platformy jest napisanych w języku Python [19].

Napisane oprogramowanie systemu zostało rozdzielone na dwie części (patrz rysunek 3.4). Pierwsza z nich stanowiła nisko-poziomowy sterownik grzałką czajnika, a druga służy do zarządzania prezentacją graficzną. W skład części pierwszej należą skrypty sterujące wyjściami GPIO, pracą regulatora PID, sterownika predykcyjnego oraz PWM. Natomiast część druga służy jako interfejs WWW w skład której wchodzi pliki HTML z odpowiednią treścią:

- login.html służy do logowania i ma to na celu uniemożliwienie dostępu do systemu osobom trzecim,

- main.html przedstawia widok panelu sterującego temperaturą domową. Jest bardzo prosty, lecz było to jednym z celów pracy,
- logout.html pokazuje użytkownikowi informację o pomyślnym wylogowaniu z systemu,
- home_automation_application.py służy do załadowania interfejsu na serwer.

W katalogu static znajdują się pliki z bibliotekami zewnętrznymi oraz ikoną strony.



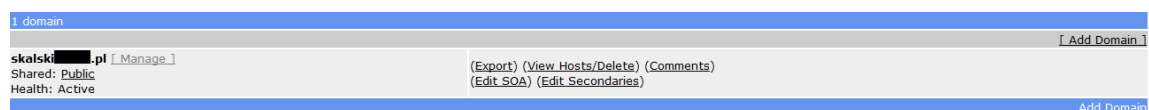
Rys. 3.4 Struktura plików po stronie serwera

Środkiem komunikacji wewnątrz procesowej, pomiędzy aplikacją WWW oraz sterownikiem ogrzewania posłużyła baza danych PostgreSQL [20]. Nie jest to najprostszyspósb w osiągnięciu punktu wymiany informacji, lecz jest to profesjonalne podejście do przetrzymywania wszelkich danych. Do realizacji niniejszej pracy wykorzystano tylko dwie tabele. Jedna z nich służyła do zapisania aktualnych ustawień systemu. Przechowywana w niej jest data oraz godzina planowanego użycia systemu, a także zadana temperatura. Kiedy użytkownik wprowadzi parametry systemu na stronie internetowej, nadpisywany jest pierwszy wiersz tabeli. Sterownik odczytuje wówczas zawartość wiersza i stosuje odpowiedni algorytm działania. Druga tabela zawiera informację o przebiegu temperatury obiektu. Trzymana w niej jest wartość temperatury oraz czas jej zmierzenia.

Wygląd interfejsu WWW został oparty o silnik Foundation [21]. Umożliwia on łatwe rozpoczęcie projektowania stron internetowych, przeznaczonych dla urządzeń z różnymi rozdzielczościami ekranów. Jest on używany przez wiele znanych i współczesnych portali np. National Geographic, mozilla, The Washington Post. Do zdefiniowania interfejsu wizualnego strony użytkownik posługuje się kolumnami oraz wierszami, definiując przy tym jaki procent ekranu mają zajmować jego komórki. Dodatkowym jego atutem jest możliwość dostosowania stylu do własnych potrzeb. Semantyka plików HTML [22] pozostaje przy tym wolna od dodatkowych znaczników, co sprawia że kod dalej wygląda czytelnie. Aby zobrazować przebieg temperatury obiektu w czasie rzeczywistym został wykorzystany zewnętrzny komponent o nazwie dygraphs [23]. Jego wybór uwarunkowany był bardzo dobrą dokumentacją, wieloma przykładami użycia oraz prostą konfiguracją.

Aby móc korzystać ze strony internetowej, musi zostać ona umieszczona na serwerze WWW. Do tego celu wykorzystano serwer aplikacji web.py [24], ponieważ zajmuje mało miejsca i ma wystarczające możliwości do tego zadania.

Znajomość adresu IP serwera, umożliwia bezproblemową komunikację z systemem. W niniejszej pracy posłużono się rozwiązaniem opartym o dynamiczny serwer DNS o nazwie freedns [25], ponieważ sieć Internet była dostępna przez dynamiczne IP. Pozwala on na dodanie własnych domen internetowych i powiązaniu ich z konkretnym, zmiennym adresem IP. Na rysunkach 3.5 i 3.6 przedstawiono konfigurację domeny.



Rys 3.5 Przegląd zarejestrowanych domen

Aktualizacja adresu ma miejsce podczas wysłania specyficznego zapytania dla danej domeny, z konkretnego serwera co pokazano na rysunku 3.6. Możliwe jest to poprzez link bezpośredni, skrypt wget, curl, oraz wpis do tablicy cron. Ostatnie rozwiązanie jest idealne dla systemów operacyjnych Linux i jest to również wykorzystane w niniejszej pracy.

5 dynamic update candidates! (A records)						
skalski[REDACTED].pl						[add]
skalski[REDACTED].pl	Direct URL	Wget Script	Curl Script	Edit Record	quick cron example	83.4.201.181
ftp.skalski[REDACTED].pl	Direct URL	Wget Script	Curl Script	Edit Record	quick cron example	83.4.201.181
irc.skalski[REDACTED].pl	Direct URL	Wget Script	Curl Script	Edit Record	quick cron example	83.4.201.181
mail.skalski[REDACTED].pl	Direct URL	Wget Script	Curl Script	Edit Record	quick cron example	83.4.201.181
www.skalski[REDACTED].pl	Direct URL	Wget Script	Curl Script	Edit Record	quick cron example	83.4.201.181

Rys 3.6 Aktualizacja adresu IP powiązanego z domeną

Jedynym wydatkiem takiego podejścia, jest wykupienie domeny. Po wpisaniu w oknie przeglądarki nazwy domeny, użytkownik zostanie przekierowany na adres 83.4.201.181.

Po stronie serwerowej, do poprawnego sterowania wyjściami niskopoziomowymi wykorzystana została biblioteka o nazwie raspberry-gpio-python [26]. Sterowanie przekaźnikiem grzałki polega na ustawianiu na zmianę stanu wysokiego oraz niskiego tak, aby odpowiednio wysterować wypełnienie okresu wynoszącym pięć sekund. Długość okresu została ustawiona na podstawie kompromisu pomiędzy szybką reakcją sterownika PWM na zmieniający się sygnał sterujący PID oraz żywotnością przekaźnika. W rzeczywistych sterownikach PWM długość okresu jest zdecydowanie krótsza. Powoduje to lepszą dokładność kontrolowania wypełnieniem. W przypadku sterowania przekaźnikiem, jego żywotność byłaby stosunkowo krótka z powodu zniszczenia powierzchni styków. Dlatego też w przypadku przekaźników, dąży się do tego aby był on przełączany jak najrzadziej.

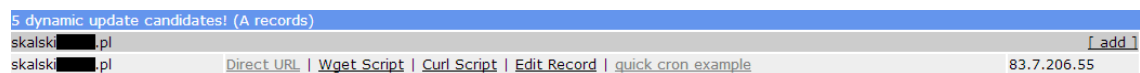
Noty katalogowe przekaźnika wykorzystanego w niniejszej pracy nie podają informacji na temat minimalnej ilości przełączeń. Jednak średnia liczba cykli przekaźników wynosi około 100 000. W przypadku sterownika PWM o okresie wypełnienia 0.1 sekundy pracowałby on tylko około 7 dni. Dodatkową wadą w stosowaniu tego elementu jest charakterystyczny dźwięk pochodzący podczas zwierania i rozwierania styków. Dlatego też przekaźniki nie są używane do takich celów. Rozwiązaniem tych problemów jest zastosowanie tranzystorów.

4 Testy

Ostatnim etapem w pracy, było przeprowadzenie testów i weryfikacja działania aplikacji. Polegało to na sprawdzeniu części serwerowej, jak i klienckiej.

4.1 Część serwerowa

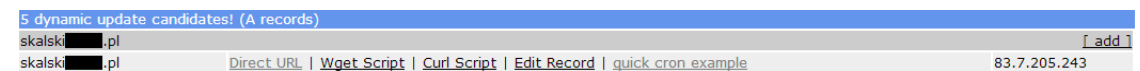
Testy rozpoczęto od sprawdzenia odświeżania adresu domeny. W tym przypadku interwał wysyłający ramkę do serwera DNS, został ustawiony na jedną minutę. Dla uzyskania dynamicznego adresu IP, wykorzystano usługę Neostrada. Przed rozłączeniem połączenia internetowego konfiguracja przedstawiała się następująco:



5 dynamic update candidates! (A records)	
skalski[REDACTED].pl	[add]
skalski[REDACTED].pl	Direct URL Wget Script Curl Script Edit Record quick cron example 83.7.206.55

Rys 4.1 Adres IP domeny przed rozłączeniem połączenia

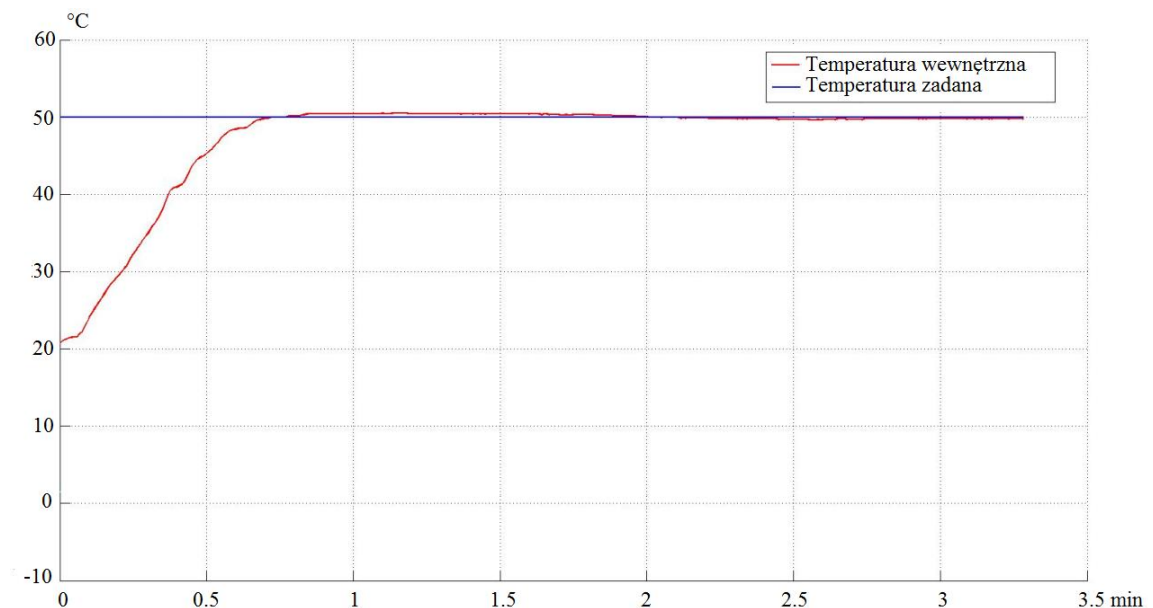
Po ponownym połączeniu i wysłaniu ramki, aktualizacja wykonała się automatycznie (patrz rysunek 4.2). Wadą tego rozwiązania jest niedostępność systemu przez kilka minut po aktualizacji adresu. Spowodowane jest to propagacją danych pomiędzy serwerami dns.



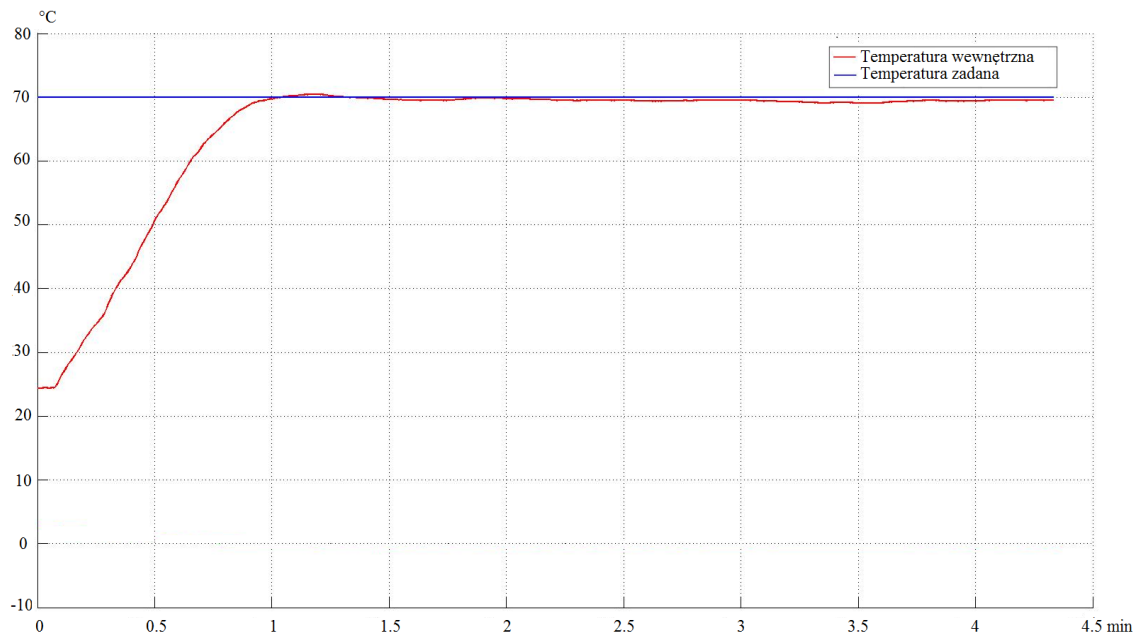
5 dynamic update candidates! (A records)	
skalski[REDACTED].pl	[add]
skalski[REDACTED].pl	Direct URL Wget Script Curl Script Edit Record quick cron example 83.7.205.243

Rys 4.2 Adres IP domeny po rozłączeniu połączenia

Kolejnym testem było sprawdzenie ogrzewania i utrzymywania zadanej temperatury wody w czajniku. W tym celu ustawione zostały różne temperatury co pokazują rysunki 4.3 i 4.5.

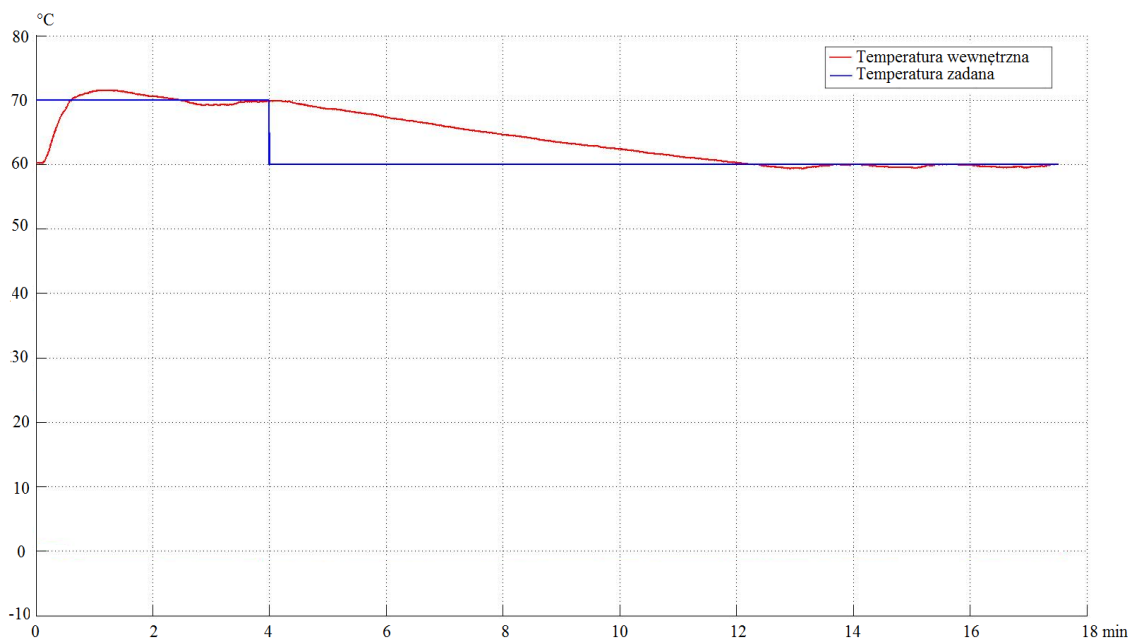


Rys 4.3 Wykres ogrzewania do 50 °C



Rys 4.4 Wykres ogrzewania do 70 °C

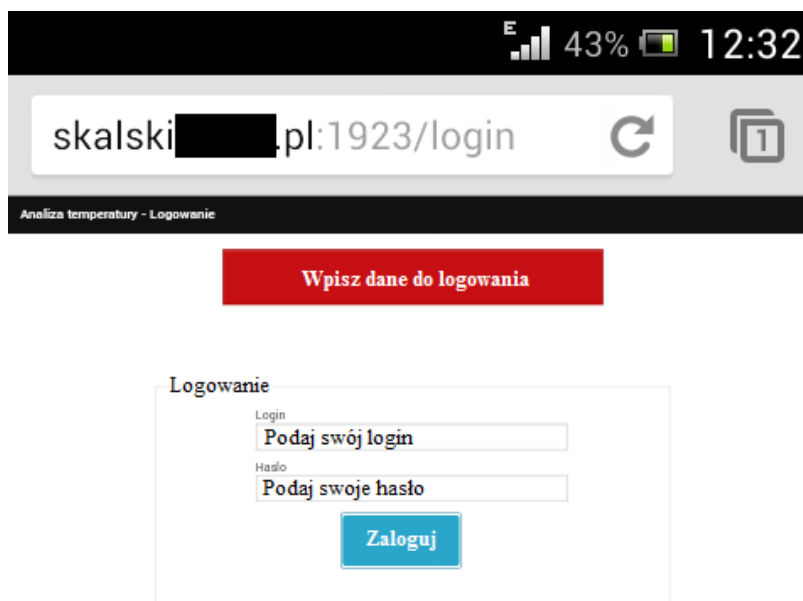
Rysunki 4.3 oraz 4.4 przedstawiają przebieg temperatury wody w czajniku ogrzewanej od temperatury spoczynkowej do temperatury zadanej. Zaimplementowany algorytm prezentuje się równie dobrze jak podczas symulacji. Woda nie jest przegrzewana a jej temperatura stabilizuje się z dobrą dokładnością na ustawionym poziomie. Rysunek 4.5 pokazuje zmianę ustawienia zadanej temperatury pomiędzy dwoma wartościami. Algorytm bez problemu dogrzewa wodę od temperatury 60 °C do 70 °C, stabilizuje jej wartość po czym wraca do początkowo zadanej wartości 60 °C.



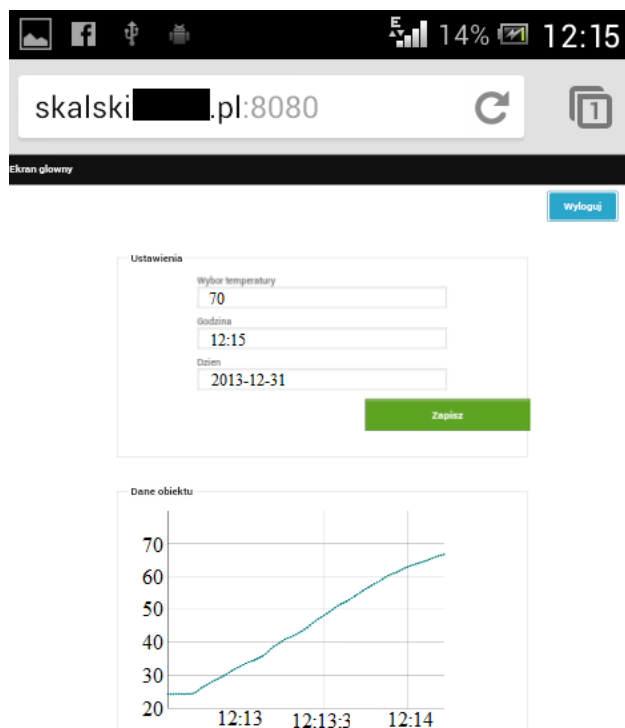
Rys 4.5 Wykres przejściowego ogrzewania z 70 °C do 60 °C

4.2 Część kliencka

Do testów wykorzystano dwa urządzenia: komputer PC z rozdzielczością ekranu 1920x1080 oraz telefon komórkowy Sony Xperia J. W obu przypadkach strona internetowa prezentowała się bardzo dobrze. Na terminalu mobilnym zostały użyte przeglądarki Google Chrome oraz wbudowana w system przeglądarka o nazwie Internet. Rysunki 4.6 i 4.8 pokazują wygląd interfejsu WWW.

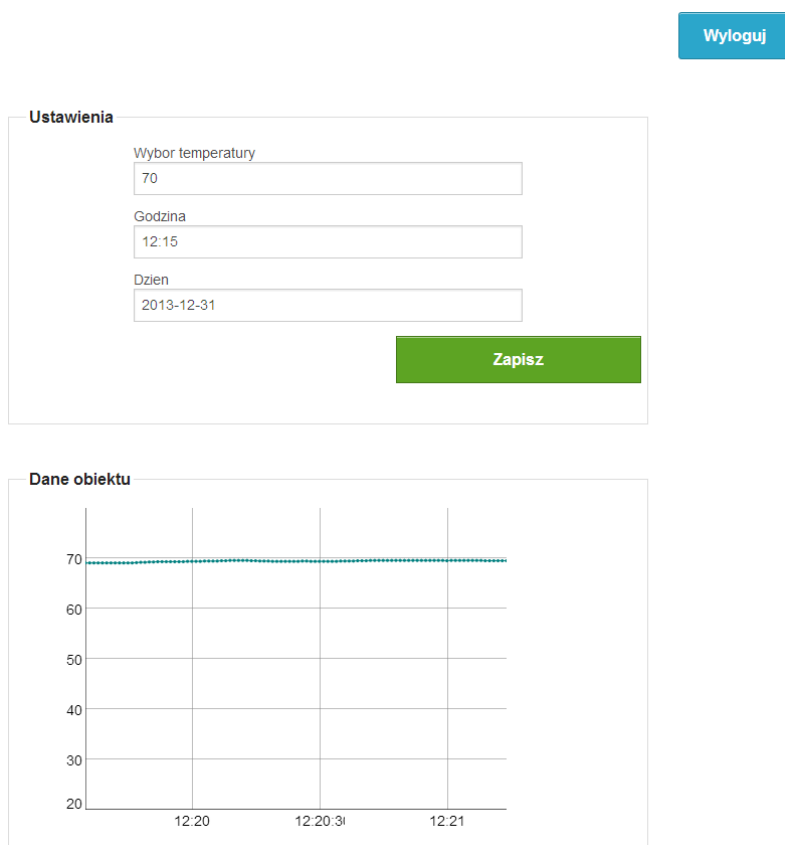


Rys 4.6 Ekran logowania z terminalu mobilnego



Rys 4.7 Wygląd głównego ekranu z terminalu mobilnego

Rysunek 4.6 przedstawia pierwszy widoczny dla użytkownika ekran, który wymaga podania prawidłowego identyfikatora oraz hasła. W przypadku błędnego wprowadzenia danych pokazana zostaje stosowna informacja zwrotna. Po pomyślnym zalogowaniu zapisywana jest zmienna sesji, potwierdzająca prawidłowe uwierzytelnianie użytkownika. Rysunki 4.7 i 4.8 pokazują prosty panel zarządzający ogrzewaniem. Na samej górze umieszczone zostały pola pozwalające skonfigurować system. Użytkownik wybiera temperaturę, godzinę oraz datę ogrzewania obiektu. Po kliknięciu na przycisk „Zapisz” konfiguracja zostaje zaktualizowana w bazie. W dolnej części interfejsu zawiera się wykres pokazujący temperaturę obiektu w kilku ostatnich minutach. Aktualizacja danych z czujnika temperatury jest automatycznie odświeżana i pokazywana w czasie rzeczywistym.



Rys 4.8 Wygląd interfejsu WWW z komputera PC

Wnioski

Podstawowe cele pracy zostały zrealizowane. Zaprojektowano, wykonano oraz przetestowano na modelu numerycznym i fizycznym system do zdalnego sterowania ogrzewaniem domu, który cechuje się dużą uniwersalnością. Może on zostać łatwo rozbudowany o dodatkowe funkcjonalności.

Opracowany system sterowania ogrzewaniem podłogowym wykorzystuje serwer WWW do jego obsługi. Oprogramowanie zostało napisane w języku Python, a interfejs użytkownika zbudowany został w technologiach takich jak HTML, CSS, JavaScript, AJAX. Do ogrzewania domu system wykorzystuje dodatkowe źródło energii pochodzącej od słońca. Jego algorytm działania opiera się o predykcyjny sterownik umożliwiający zwiększenie komfortu termicznego oraz energooszczędność ogrzewania.

W pracy wykorzystano wysokopoziomowe programowanie, symulację, komunikację przez sieć Internet jak również niskopoziomowe sterowanie obiektem za pomocą uniwersalnych wejść/wyjść platformy Raspberry PI. Wybrana platforma Raspberry PI jest bardzo ekonomicznym i elastycznym rozwiązaniem do celów sterowania inteligentnego domu. System do sterowania temperaturą ogrzewania podłogowego to tylko jedno z usług jakie może oferować. Jego uniwersalność pozwala na rozbudowę o nowe usługi w bardzo łatwy sposób.

W przyszłości taki system można rozbudować o możliwość ustawiania temperatury w kilku zakresach pory dnia, dodanie modułu liczącego koszty ogrzewania, a także historię ostatnich ustawień użytkownika. Automatyczne pobieranie dokładnych danych meteorologicznych z Internetu, będzie również niezbędne do efektywnego działania systemu. Niestety nie zostało to wykonane w niniejszej pracy i jednym z powodów był brak odpowiedzi na wysłaną prośbę o udostępnienie danych pogodowych z portalu meteo.pl.

Bibliografia

1. Andrzej Urbaniak, Inteligentne systemy budynków,
<http://wazniak.mimuw.edu.pl/images/9/97/Sw3.6-m13-1.2-k.pdf> (30.12.2013).
2. David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Podstawy Fizyki*, Tom 2, 2006.
3. Transport energii cieplnej - podstawowe zagadnienia,
<http://www.builddesk.pl/files/BuildDesk/PL%20Education/PL%20Academy/PL%20Documents/Transport%20energii%20cieplnej%20-%20podstawowe%20zagadnienia.pdf> (22.12.2013).
4. Jan Siedlaczek, *Regulatory pogodowe w instalacjach centralnego ogrzewania*,
Magazyn instalatora, nr 1, styczeń 2011.
5. K.J. Åström, T.Hägglund, The future of PID control.
6. Robert Lacoste, PID Control Without Math.
7. Finn Haugen, The Good Gain method for PI(D) controller tuning,
http://techteach.no/publications/articles/good_gain_method/good_gain_method.pdf (30.12.2013).
8. Daniela Rus, Motor Control, Wykład 3.
9. Dokumentacja programu Simulink
http://www.mathworks.com/help/simulink/index.html?s_tid=simb_pr_doc
(21.12.2013).
10. Bernadeta Pyrz i Paweł Bytnar, opis programu Simulink,
<http://www.ont.com.pl/webinarium/Simulink/Simulink.html> (21.12.2013).
11. Przykład termicznego modelu domu,
http://www.mathworks.com/products/simulink/examples.html?file=/products/demos/shipping/simulink/sldemo_househeat.html (21.12.2013).
12. Poradnik – Wodne ogrzewanie podłogowe firmy Danfoss,
http://pl.heating.danfoss.com/PCMPDF/Handbook_Introduction_VGDYA149.pdf
(30.12.2013).
13. Horowitz Paul, Hill Winfield, *Sztuka elektroniki. Część I i II*, 2013.
14. J. Ułasiewicz, Programowanie aplikacji współbieżnych i rozproszonych.
15. Nieoficjalna dokumentacja Raspberry PI, http://elinux.org/RPi_Hub
(21.12.2013).

16. Oficjalna informacja o ilości sprzedanych sztuk platformy Raspberry PI, <http://www.raspberrypi.org/archives/5265> (30.12.2013).
17. Wykaz dystrybucji systemów na platformę Raspberry PI, http://elinux.org/RPi_Distributions (23.12.2013),
18. Zbiór najczęstszych pytań dla Raspberry PI, <http://www.raspberrypi.org/faqs#softwareOS> (21.12.2013).
19. Mark Lutz. *Python. Wprowadzenie*. Wydanie III, 2009.
20. Richard Stones, Neil Matthew, *Bazy danych i PostgreSQL. Od podstaw*, 2002.
21. Dokumentacja silnik Foundation, <http://foundation.zurb.com/docs/> (27.12.2013).
22. Włodzimierz Gajda, *HTML, XHTML i CSS. Praktyczne projekty*. Wydanie II, 2011.
23. Przykłady użycia komponentu dygraphs, <http://dygraphs.com/gallery/> (29.12.2013).
24. Kurs wykorzystania serwera web.py, <http://webpy.org/cookbook/> (28.12.2013).
25. Dynamiczny serwer DNS, <http://freedns.afraid.org/> (27.12.2013).
26. Przykłady wykorzystania biblioteki nisko-poziomej raspberry-gpio-python, <http://sourceforge.net/p/raspberry-gpio-python/wiki/Examples/> (30.12.2013).