UNIWERSYTET ROLNICZY
im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I ENERGETYKI

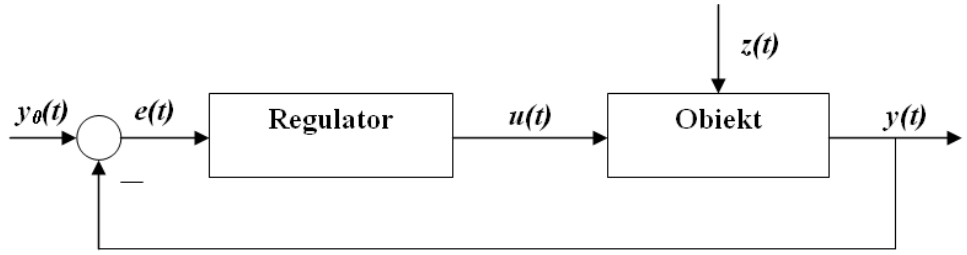
Stanisław Lis

Proces prototypowania układu regulacji automatycznej w oparciu o modelowanie i symulację komputerową w środowisku Matlab-Simulink

Kraków - 2024

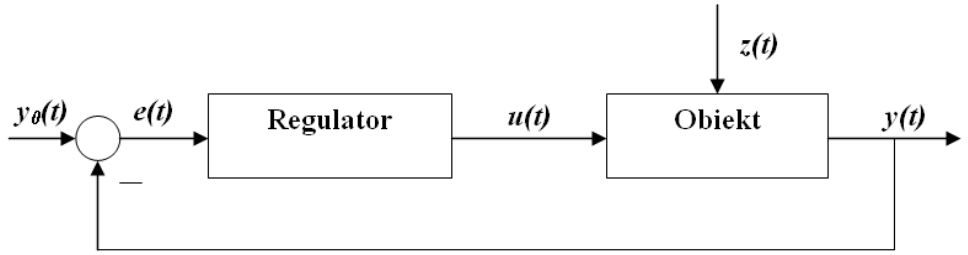
Cel

Przedstawienie metodyki prototypowania zamkniętego układu sterowania automatycznego z zastosowaniem modelowania i symulacji komputerowej



Zakres omawianej metodyki

- rejestracja charakterystyki skokowej dla obiektu sterowania
- sformułowanie modelu symulacyjnego obiektu sterowania
- opracowanie modelu symulacyjnego układu sterowania
- implementacja algorytmu sterowania w pamięci mikrokontrolera



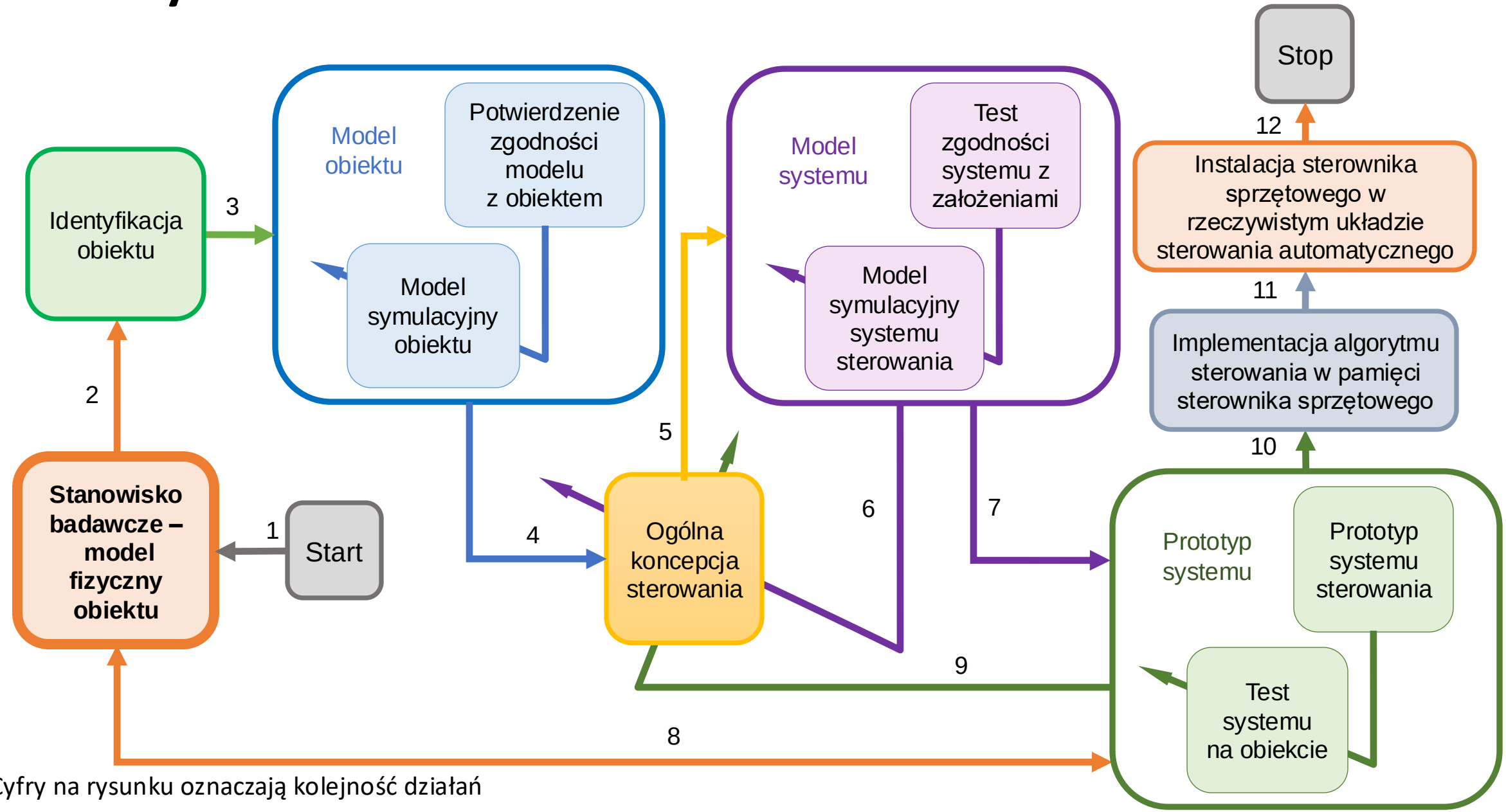
Ariane-5

Therac-25

NASA Mars Climate Orbiter

Metodyka

Metodyka

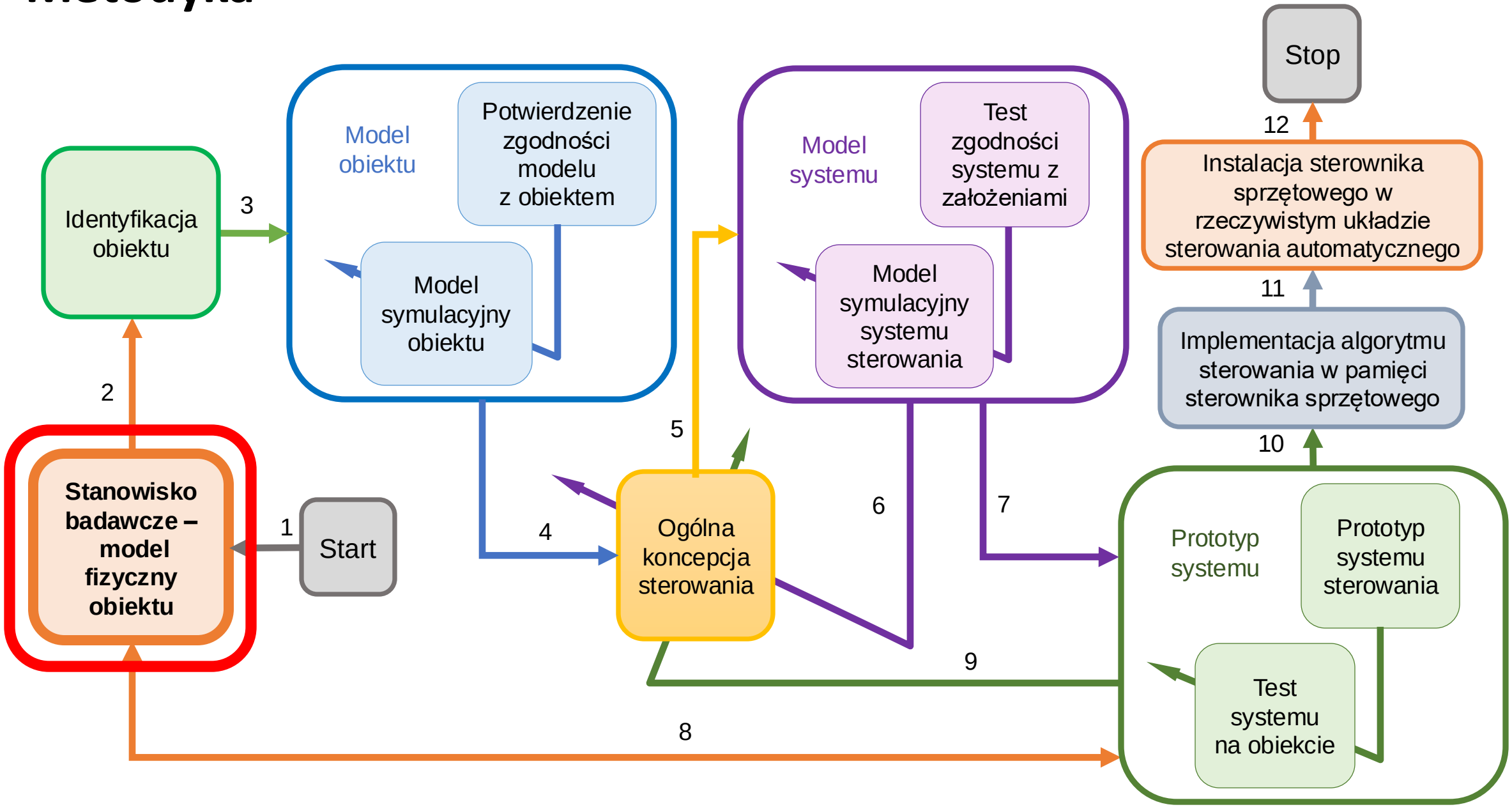


Cyfry na rysunku oznaczają kolejność działań

Złamane strzałki reprezentują działanie korygujące bloku funkcjonalnego względem innego bloku

Model obiektu sterowania

Metodyka

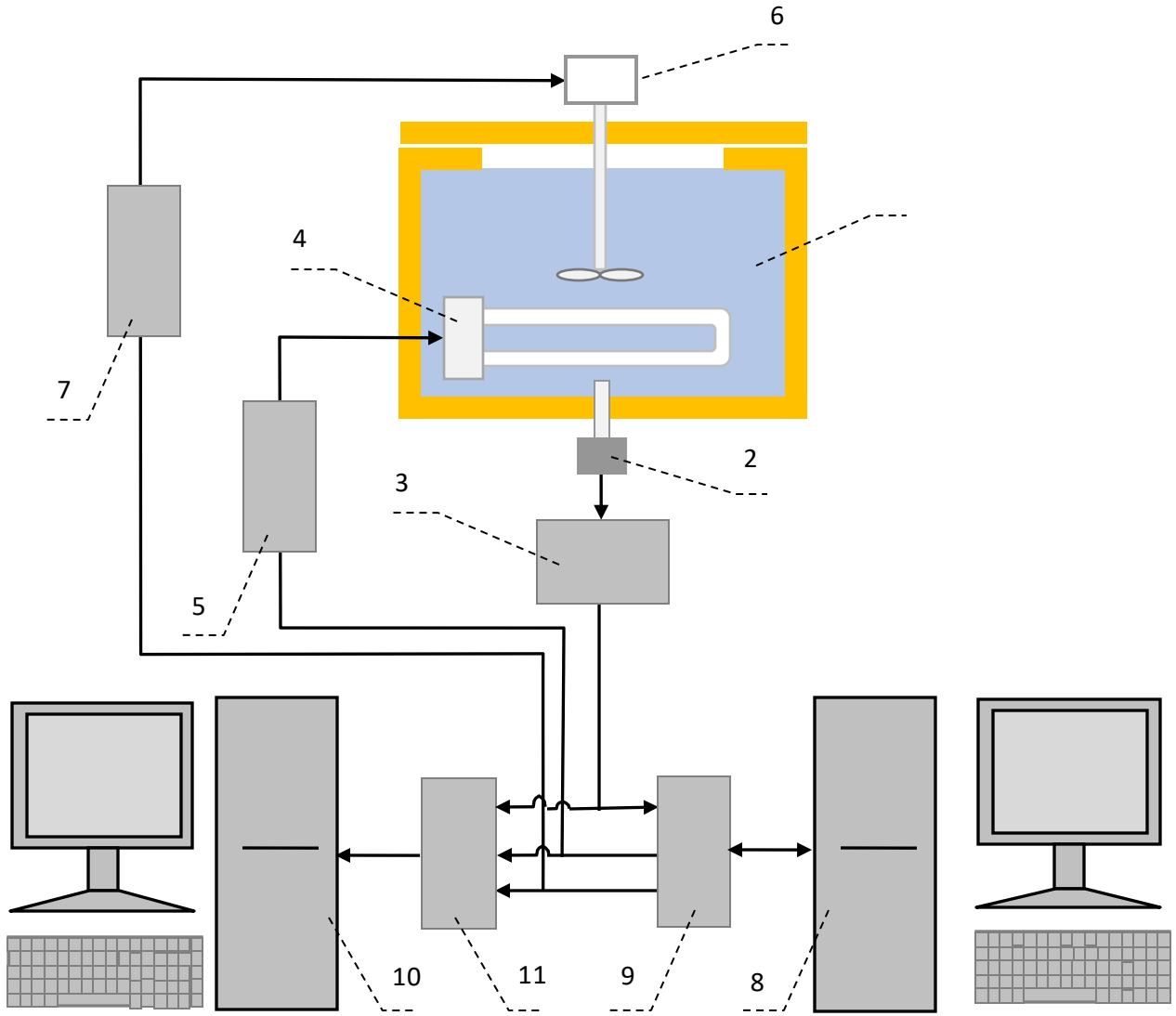

Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Identyfikacja obiektu
3
2
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
5
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

Proces zacierania słodu na piwo

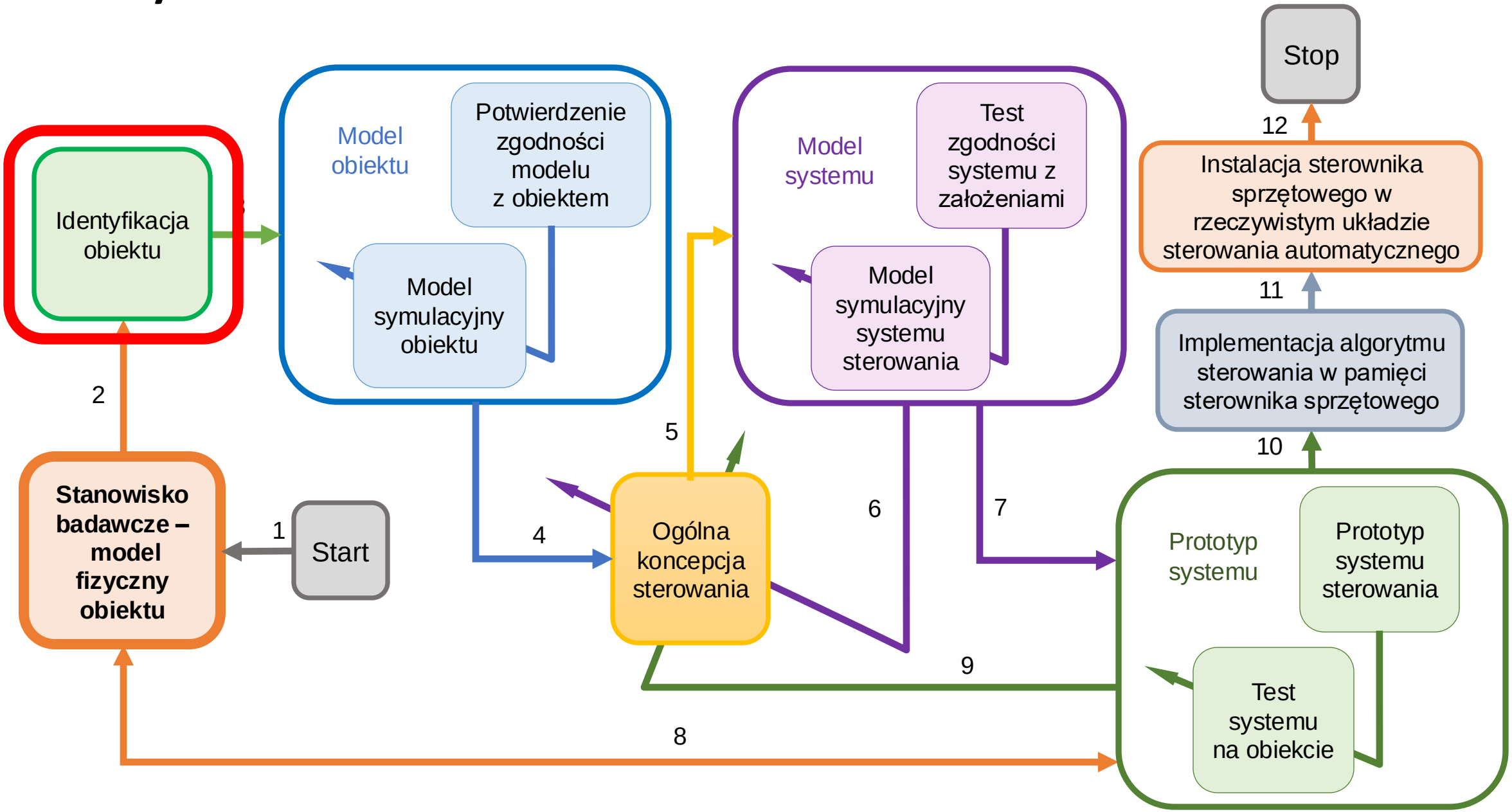
Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego

- model fizyczny obiektu (1)
- element pomiarowy czujnik temperatury (2)
- wzmacniacz sygnału – czujnika temperatury (3)
- element wykonawczy – grzałka (4)
- wzmacniacz sygnału sterującego (5)
- mieszadło (6)
- wzmacniacz sygnału mieszadła (7)
- komputer rejestrujący (8)
- terminal zaciskowy karty I/O komputera rejestrującego (9)
- komputer sterujący (10)
- terminal zaciskowy karty I/O komputera sterującego (11)



Metodyka

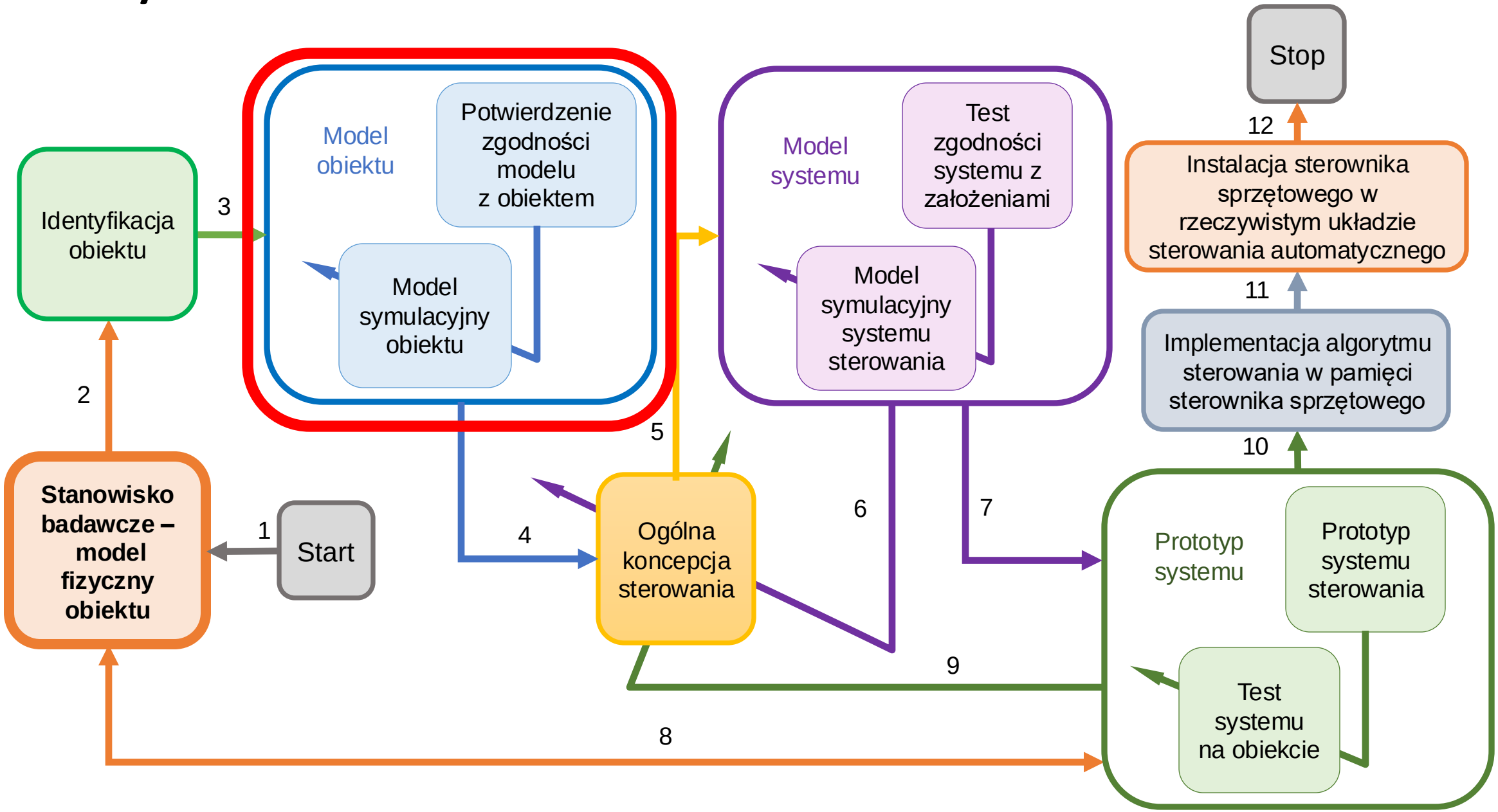

Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Identyfikacja obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
Start
Ogólna koncepcja sterowania
1
2
4
5
6
7
8
9

Identyfikacja obiektu

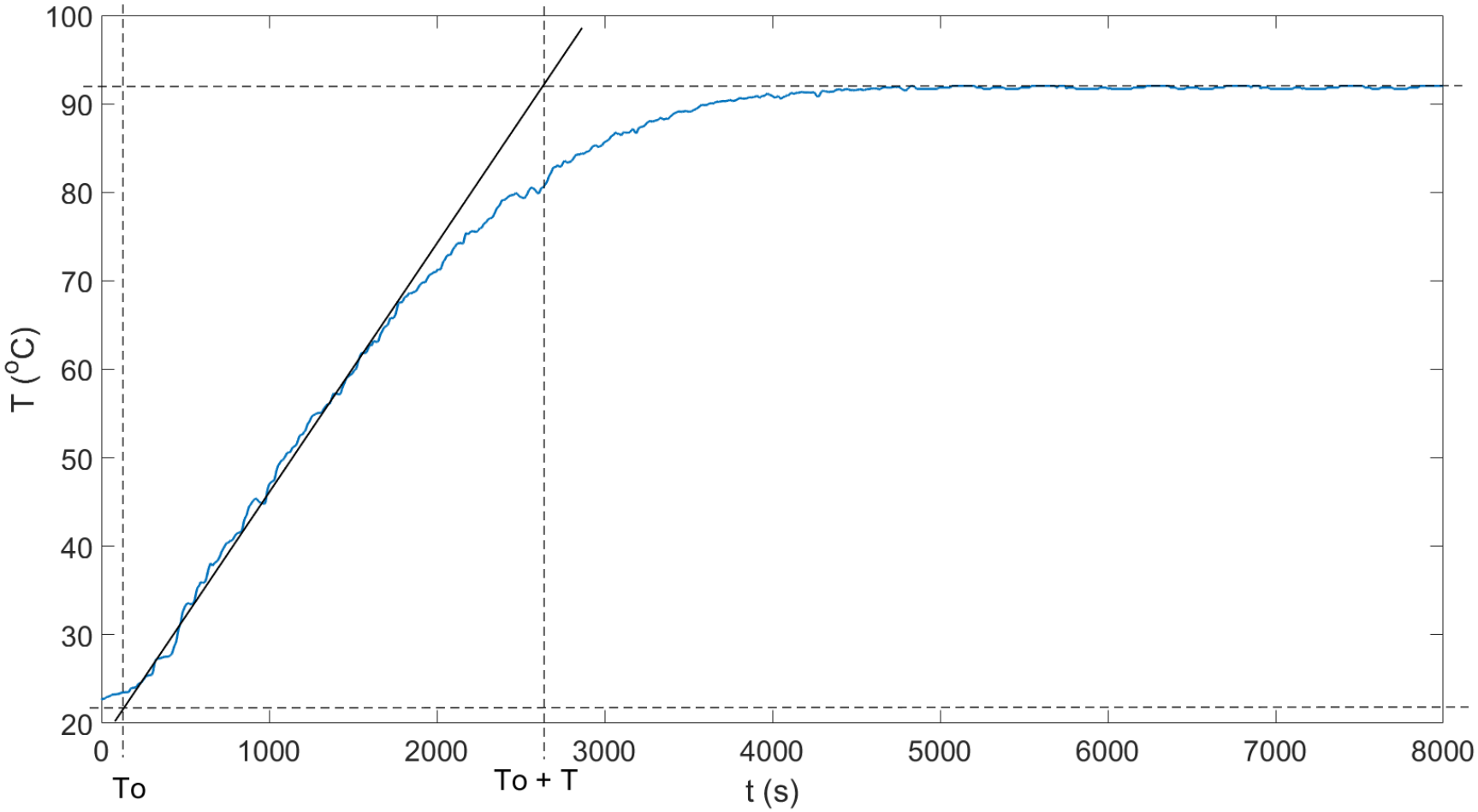
Podczas eksperymentu zbiornik modelu fizycznego reprezentującego obiekt wypełnia się wodą i ześrutowanym słodem, przykładowo w proporcjach: 3 dm^3 wody i 1 dm^3 słodu

Wyznacza się charakterystykę skokową, która jest zmianą sygnału wyjściowego – temperatury T(t), w odpowiedzi na wymuszenie w postaci skoku sygnału wejściowego – mocy grzałki P(t)

Metodyka

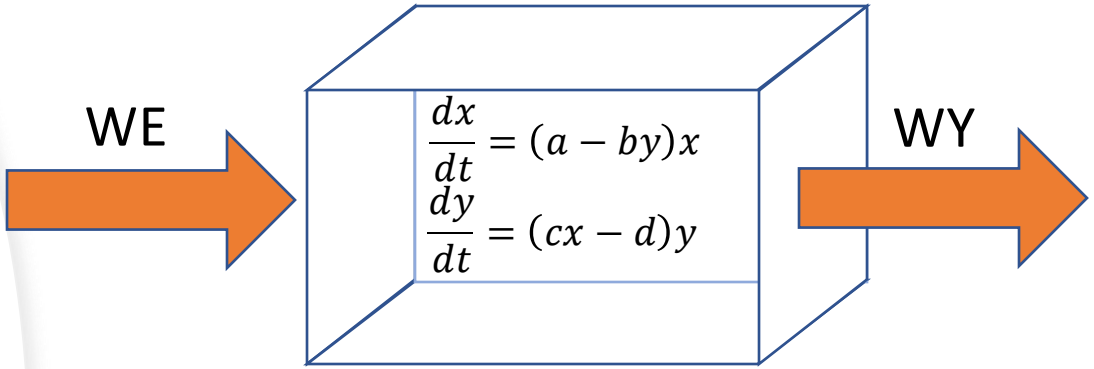

Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Identyfikacja obiektu
3
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
2
5
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

Identyfikacja obiektu



Wybór metody modelowania

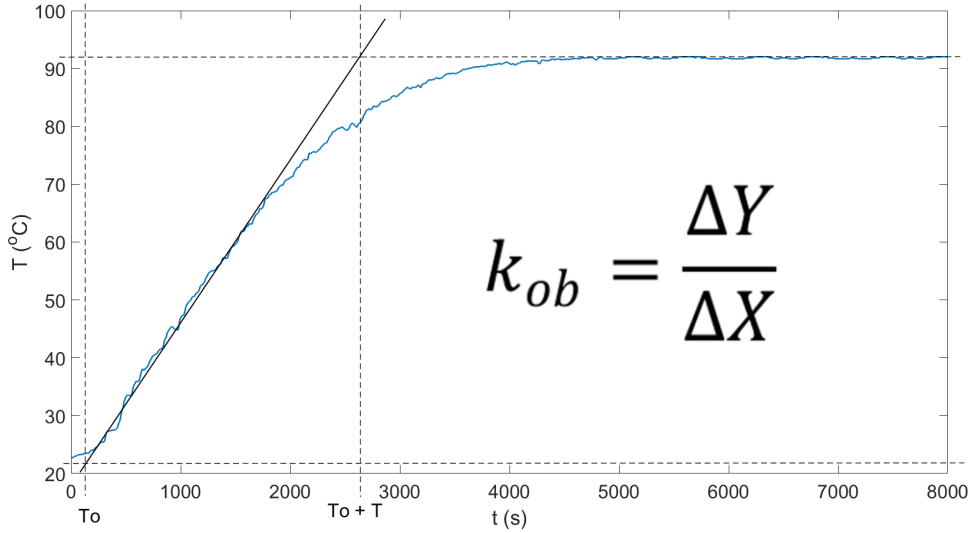
white box?



a może black box?

Schemat stanowiska badawczego

Wartość stałej czasowej T i opóźnienia T_0 wstępnie odczytuje się z wykresu.
Współczynnik wzmocnienia statycznego obiektu k_{ob}, oblicza się jako stosunek zmiany sygnału wyjściowego (Δy) do zmiany sygnału wejściowego (Δx).
Indeks s w zależności oznacza operator Laplace'a.



$$k_{ob} = \frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$G(s) = k_{ob} \cdot \frac{1}{T_S + 1} \cdot e^{-T_{os}}$$

$$G(s) = 0{,}135 \frac{1}{1500\,s + 1.17} e^{-300}$$

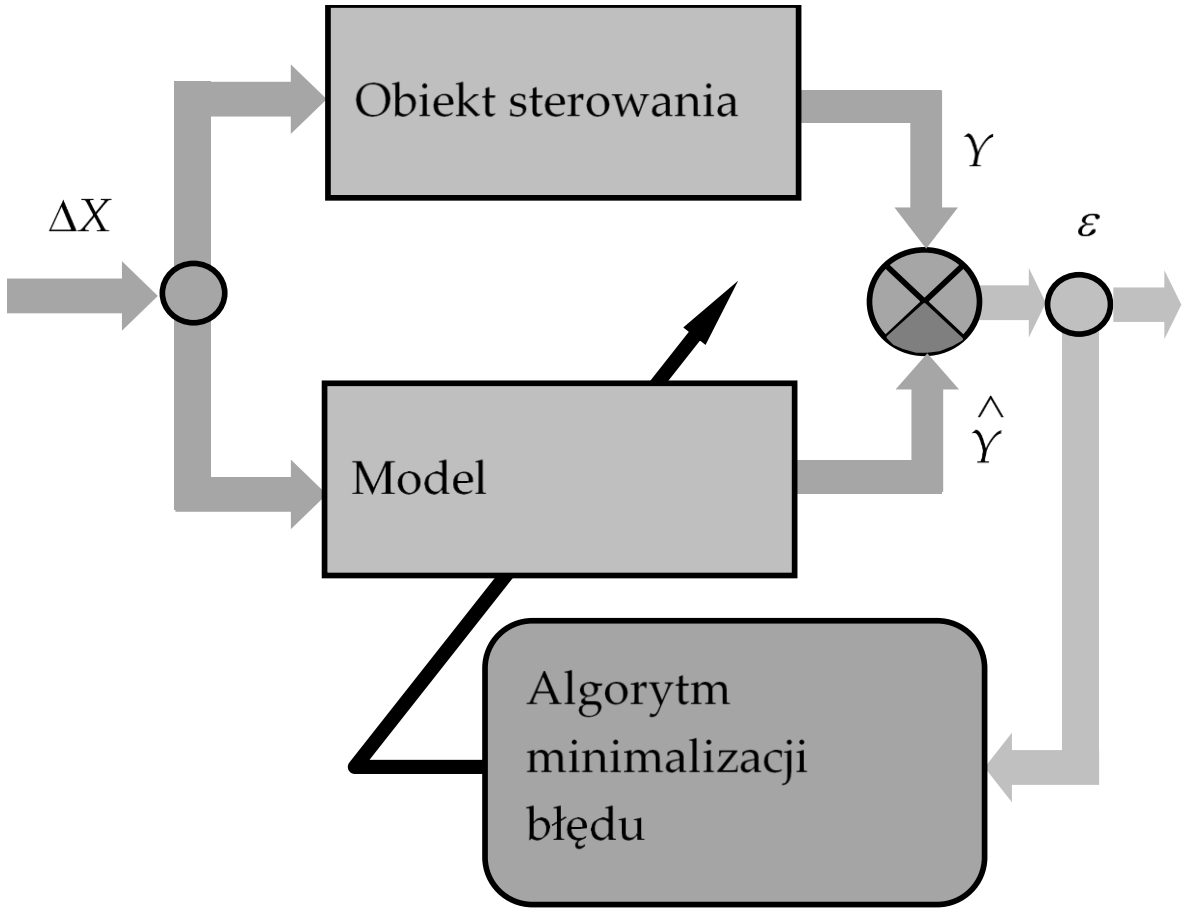
Zgodność modelu z obiektem sterowania

X – skok sygnału wejściowego

Y – zmiana sygnału wyjściowego w obiekcie fizycznym

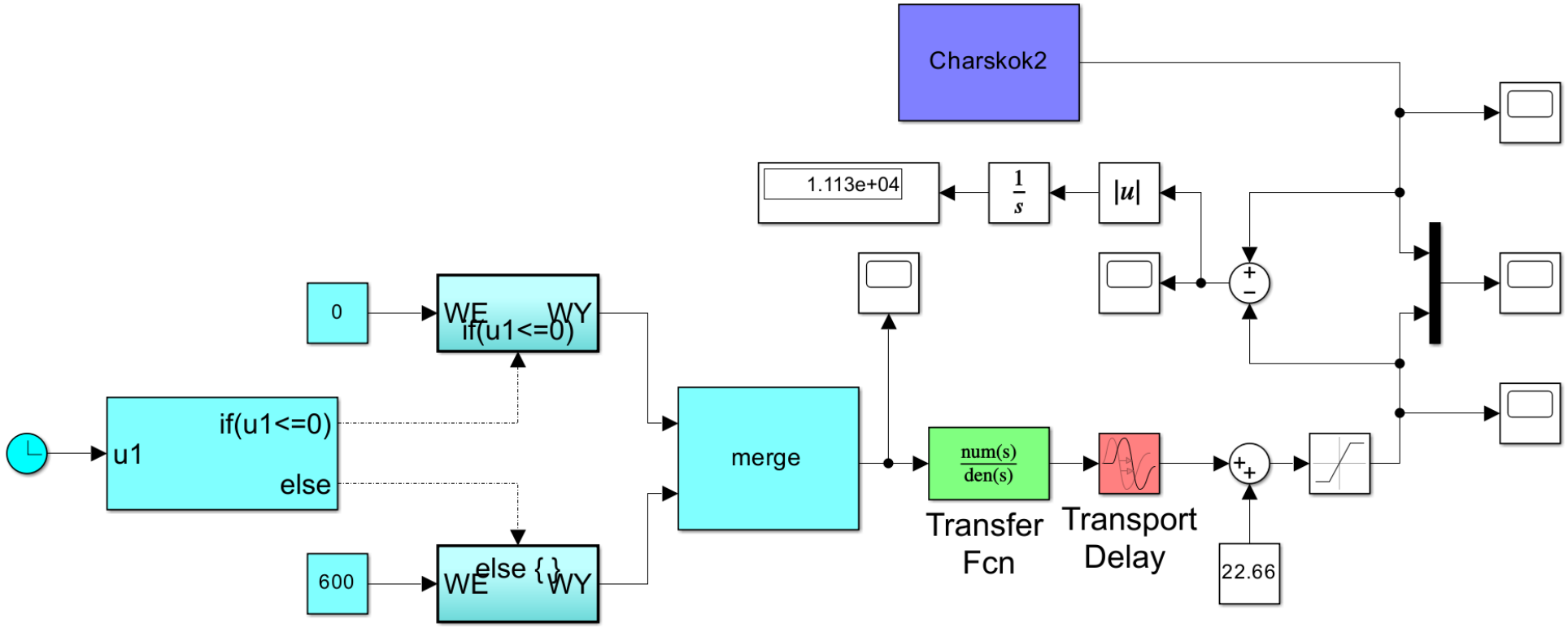
$\hat{Y}$ – zmiana sygnału wyjściowego obliczona przez model obiektu

ε – stopień niedoskonałości modelu

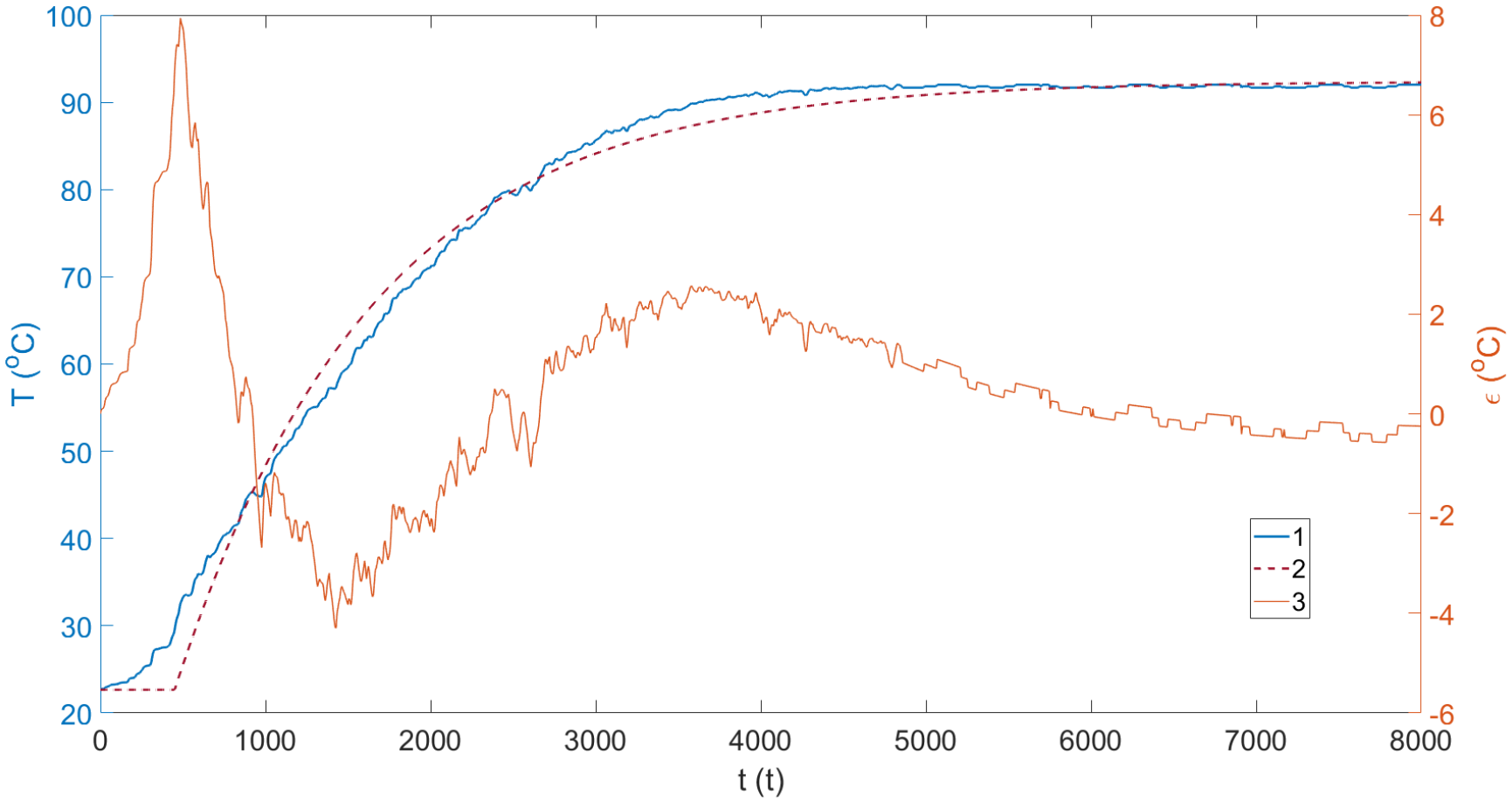


$$\varepsilon = Y - \hat{Y}$$

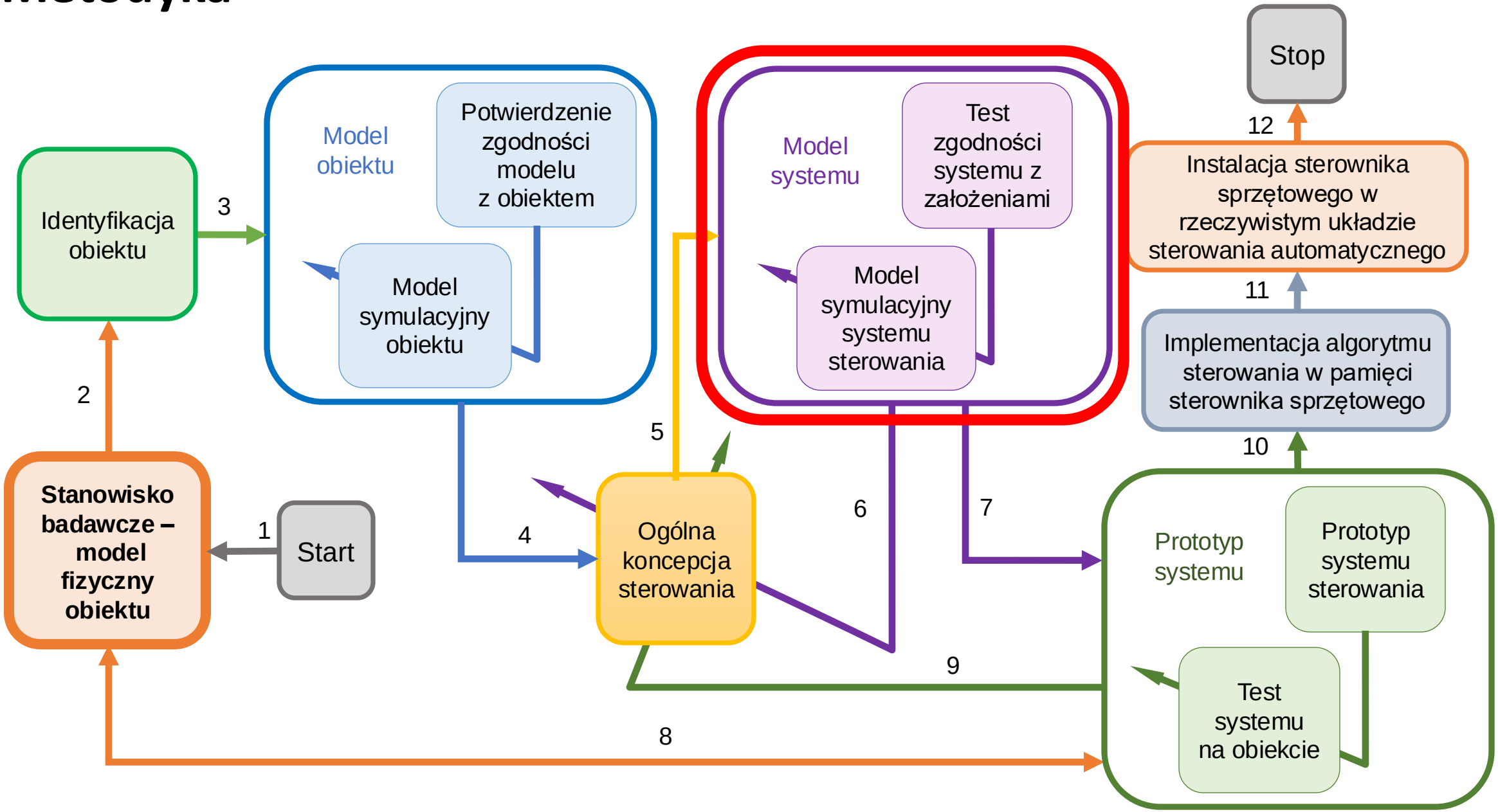
Zgodność modelu z obiektem sterowania



Zgodność modelu z obiektem sterowania

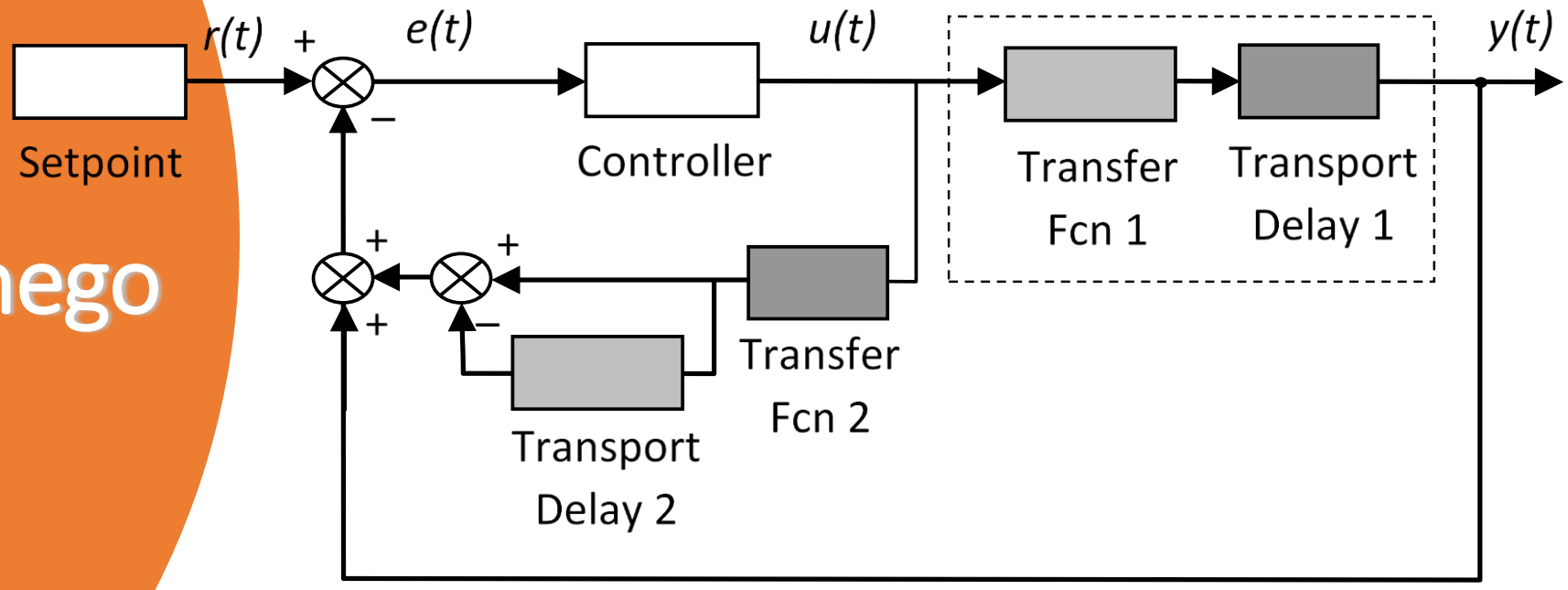


Metodyka

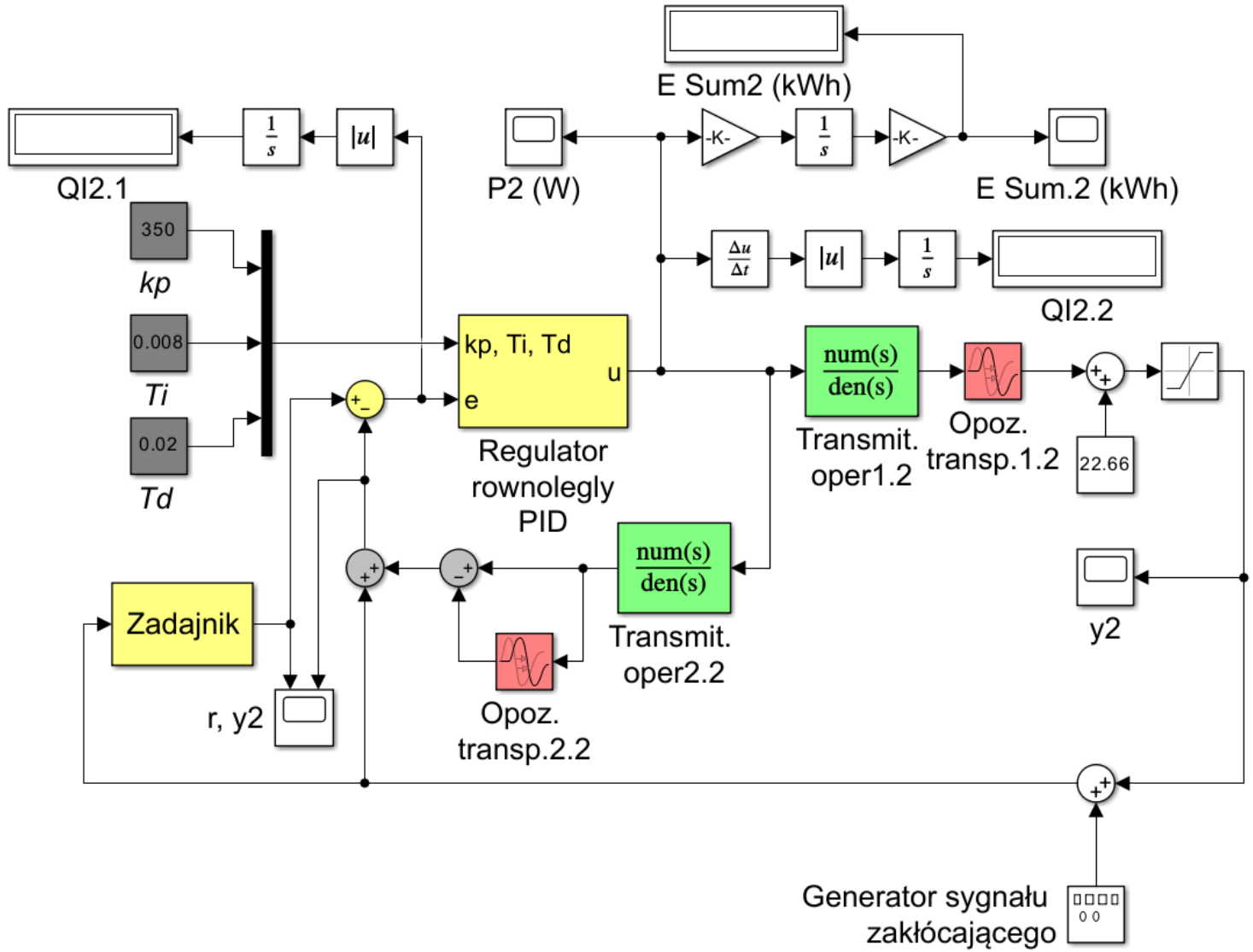

Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Identyfikacja obiektu
3
2
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
5
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

Model układu sterowania automatycznego

Układ sterowania automatycznego



Model systemu sterowania



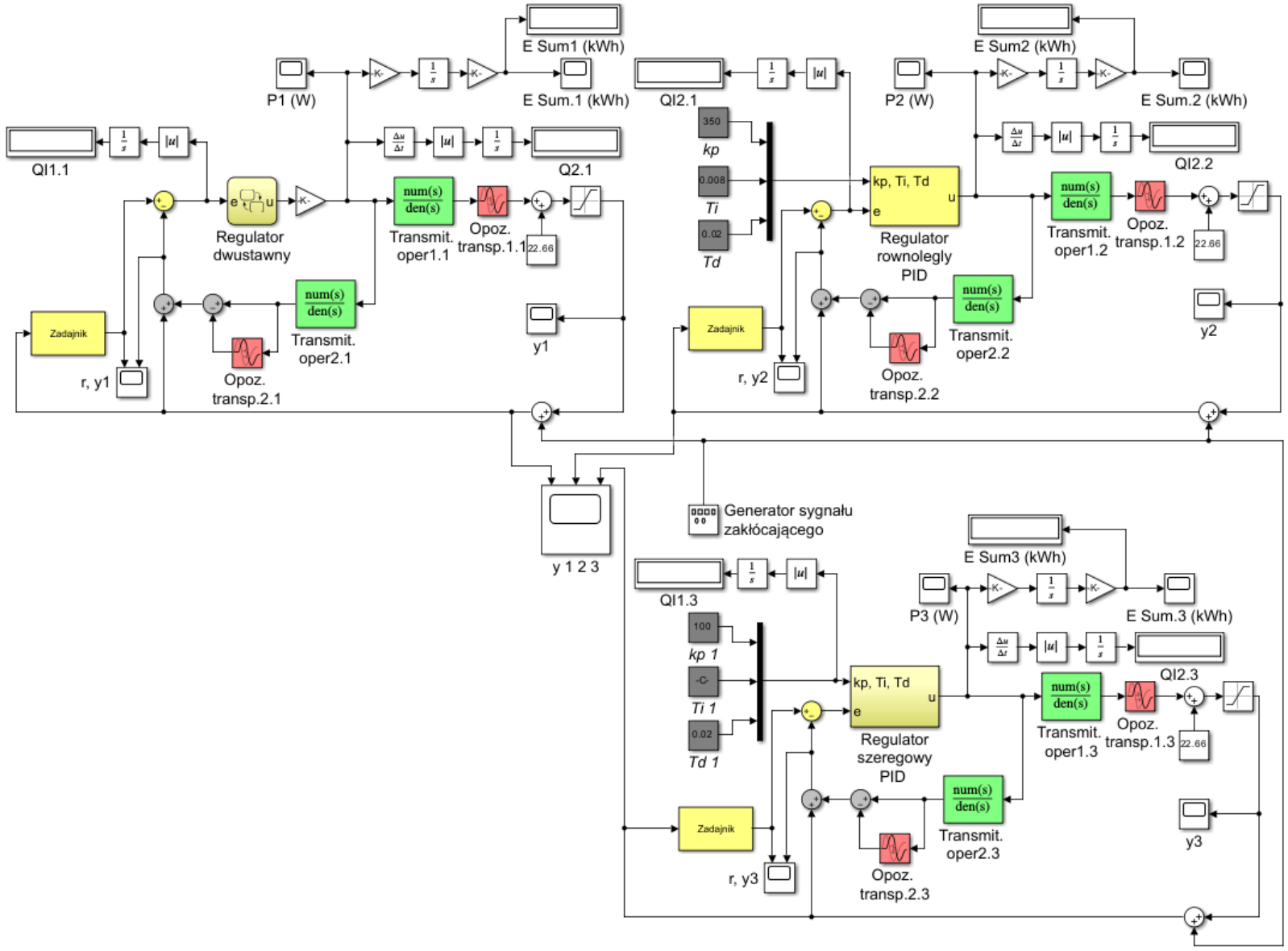
Zagregowane modele układów sterowania

Modele układów sterowania:

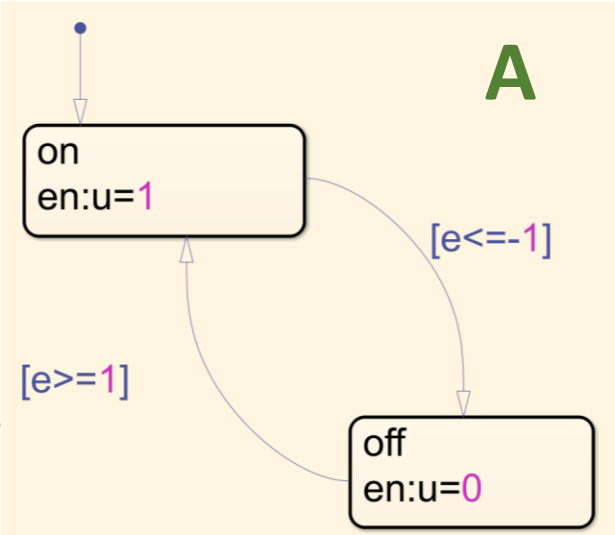
1 – z regulatorem dwustawnym

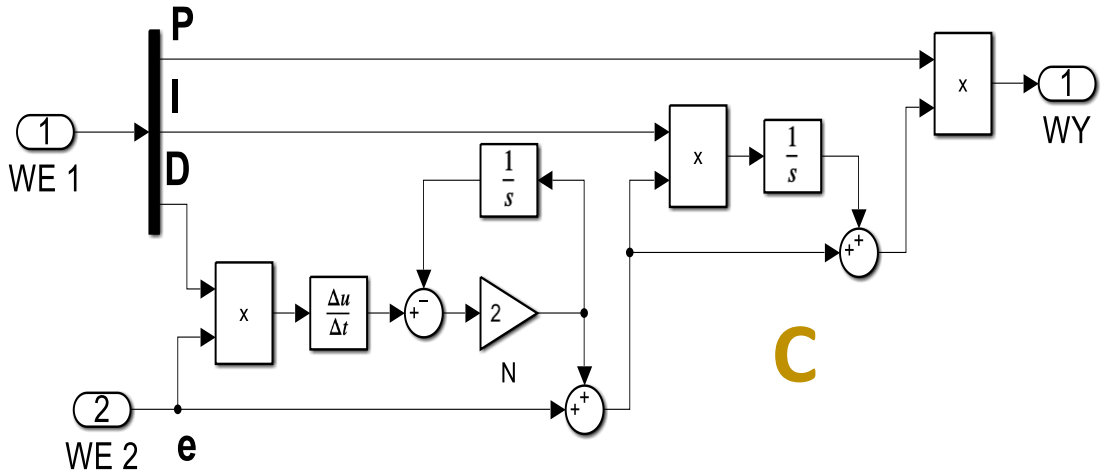
2 – z regulatorem równoległym PID

3 – z regulatorem szeregowym PID



Analizowane regulatory



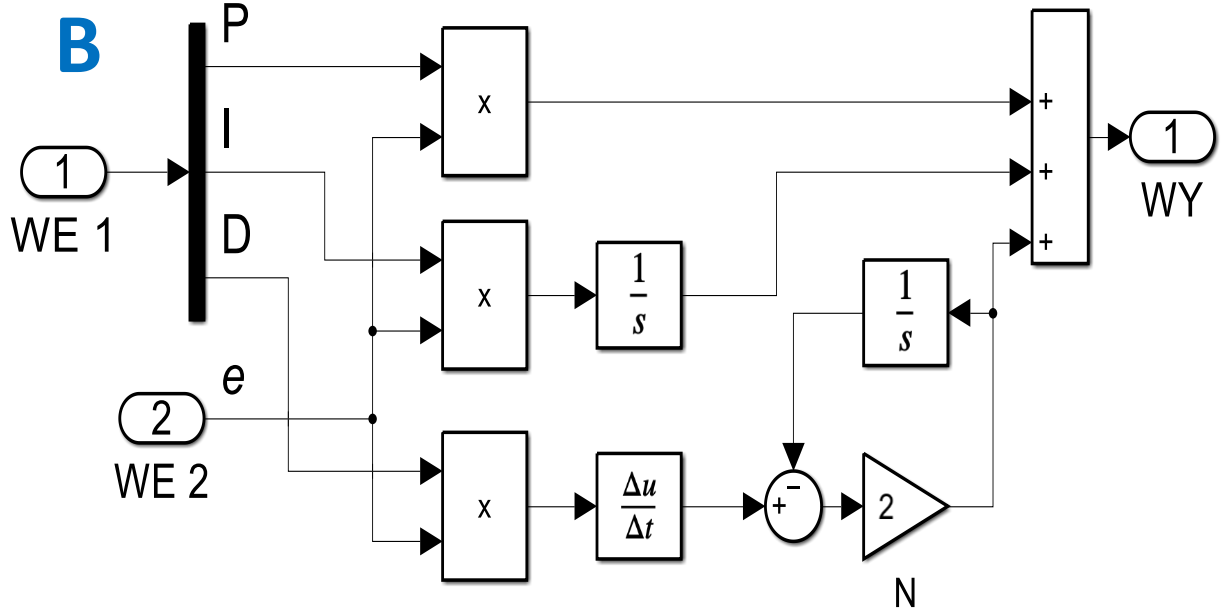


Schematy:

A – typu stateflow regulatora dwustawnego

B – blokowy regulatora równoległego PID

C – blokowy regulatora szeregowego PID



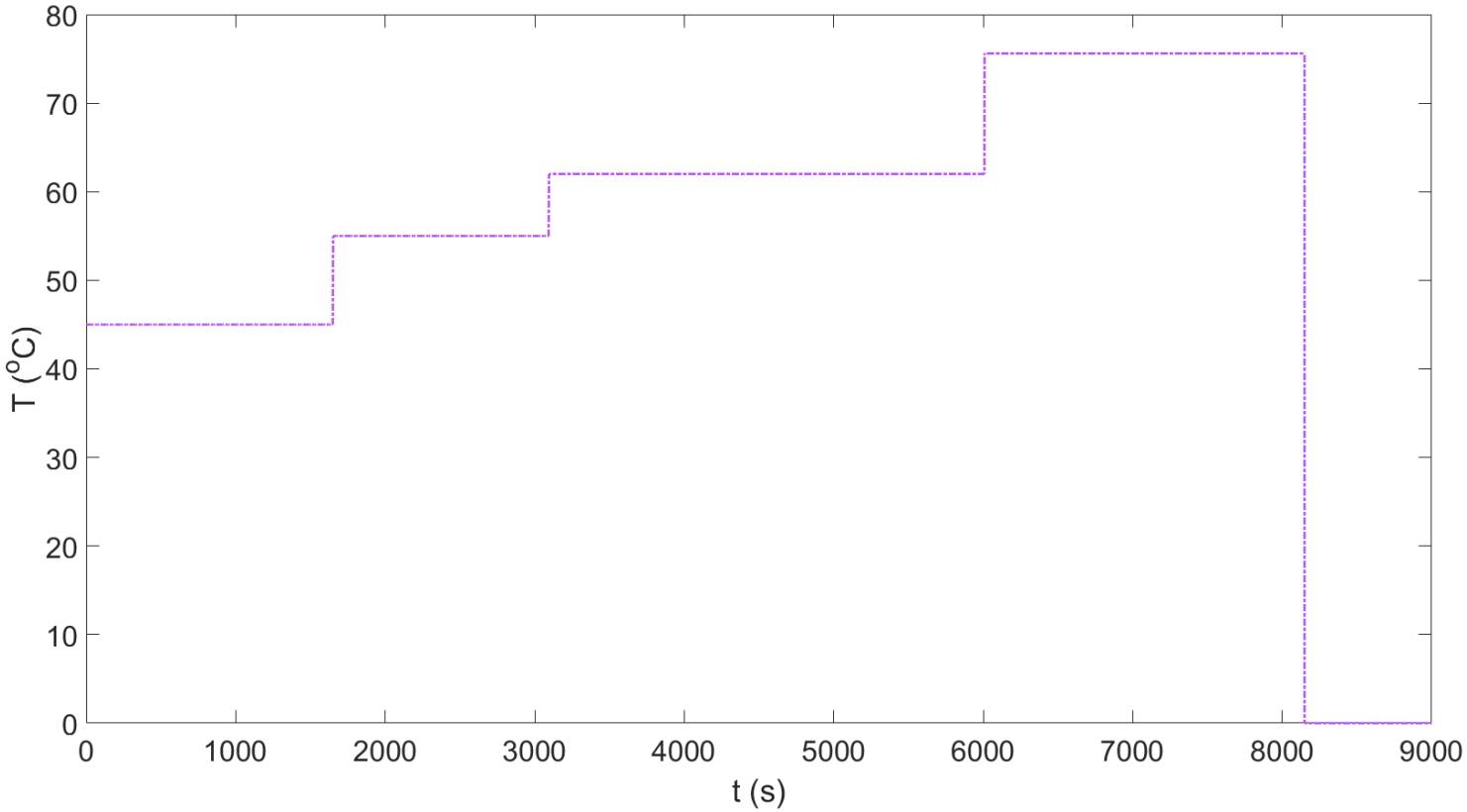
Sygnał sterujący

1 – przerwa nr 1 (temperatura 45 ^{o}C) przez 30 minut

2 – przerwa nr 2 (temperatura 55 ^{o}C) przez 30 minut

3 – przerwa nr 3 (temperatura 62 ^{o}C) przez 50 minut

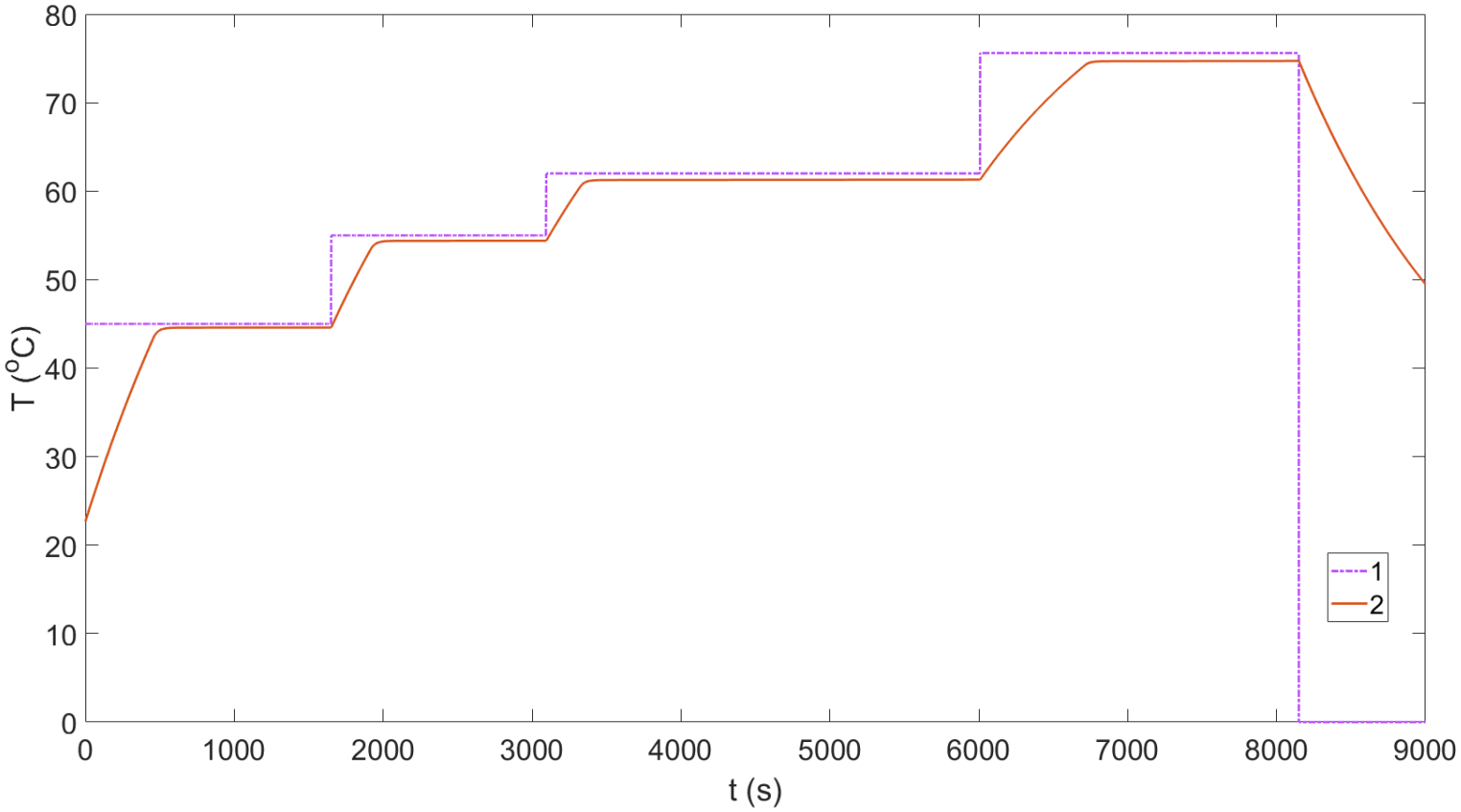
4 – przerwę nr 3 (temperatura 75 ^{o}C) przez 35 minut



Weryfikacja algorytmu sterowania

1 – sygnał zadany

2 – sygnał wyjściowy zamodelowanego układu sterowania



Całkowe wskaźniki jakości

$$QI1 = \int_{tp}^{t_f} |e| dt$$

$$QI2 = \int_{t_p}^{t_f} \left| \frac{du}{dt} \right| dt$$

QI1 – całka z wartości bezwzględnej błędu regulacji

QI2 – całka z wartości bezwzględnej pochodnej sygnału sterującego

e – błąd regulacji

$\frac{du}{dt}$ – pochodna sygnału sterującego

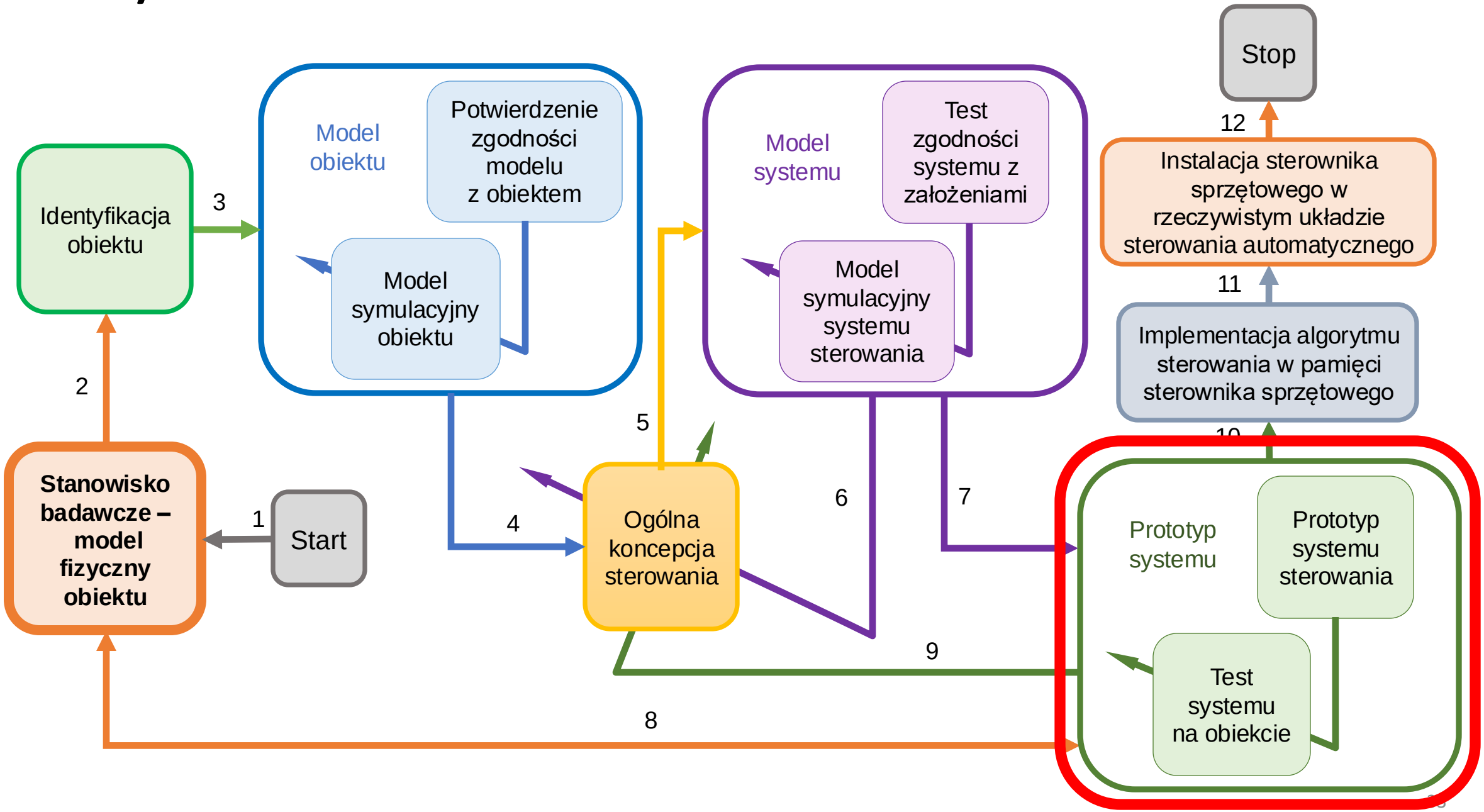
t – czas

tp – początek interwału czasowego sterowania

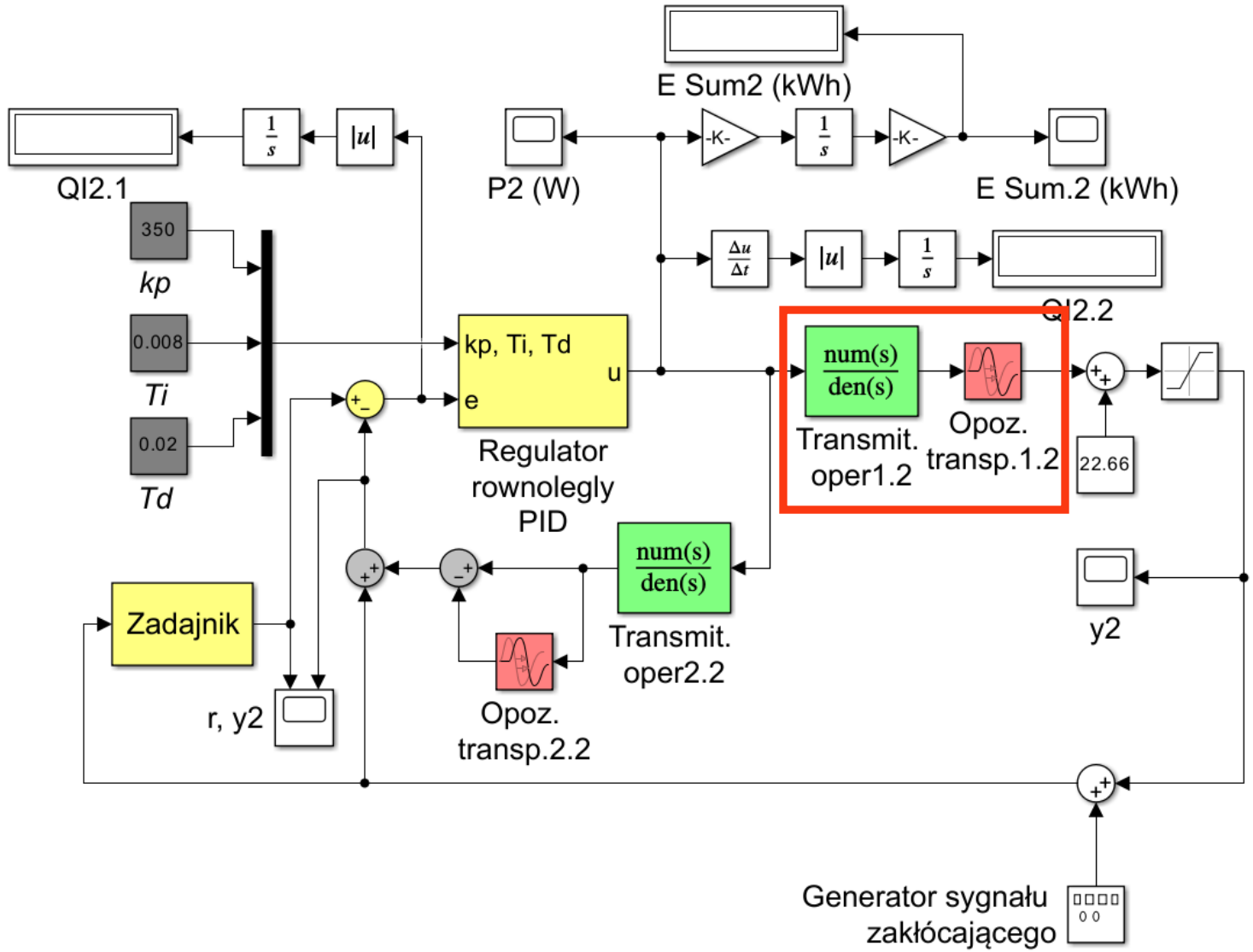
tf – koniec interwału czasowego sterowania

Weryfikacja algorytmu sterowania automatycznego na obiekcie rzeczywistym

Metodyka

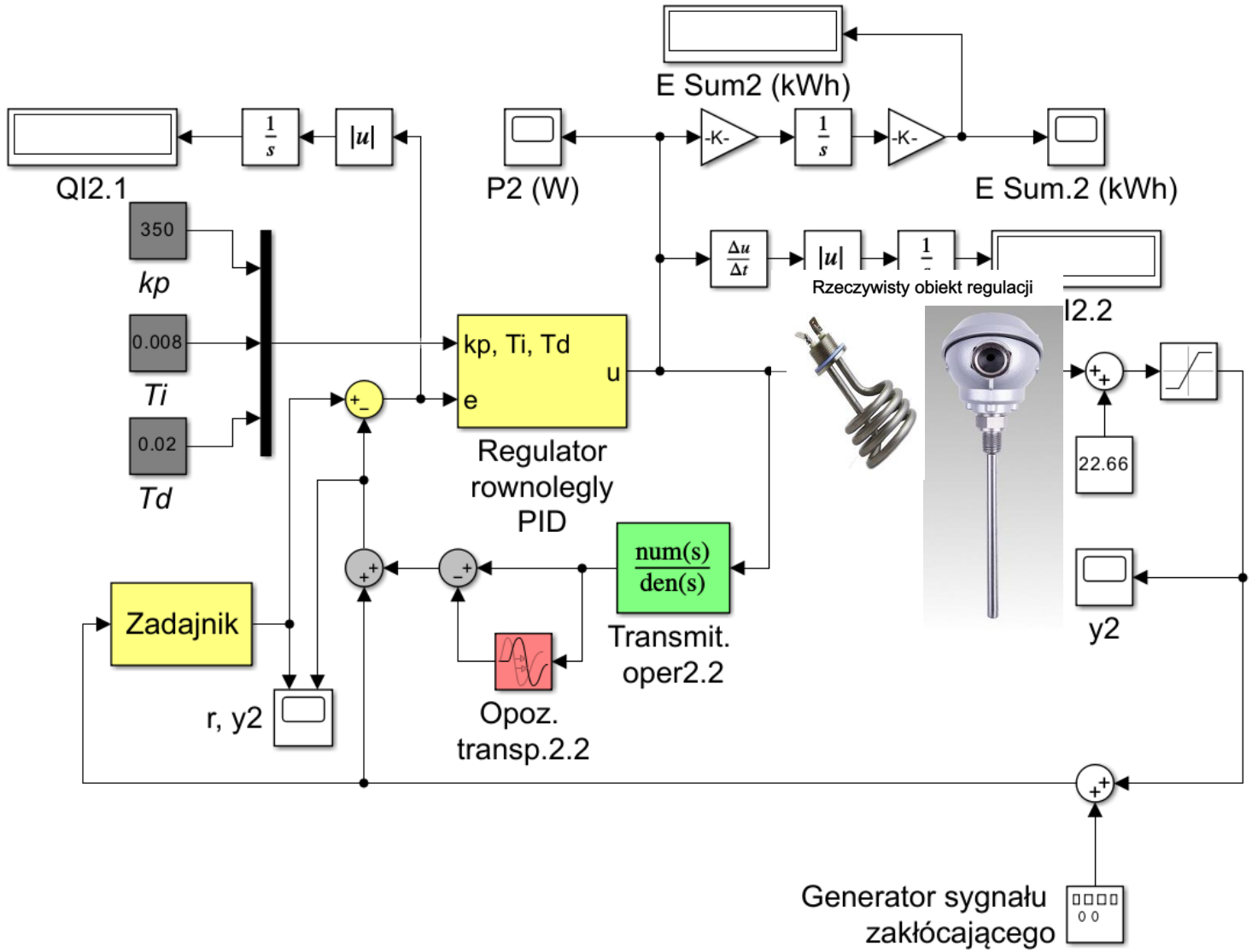

Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Identyfikacja obiektu
3
2
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
5
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

Model systemu sterowania



Model systemu sterowania

komunikujący się z otoczeniem

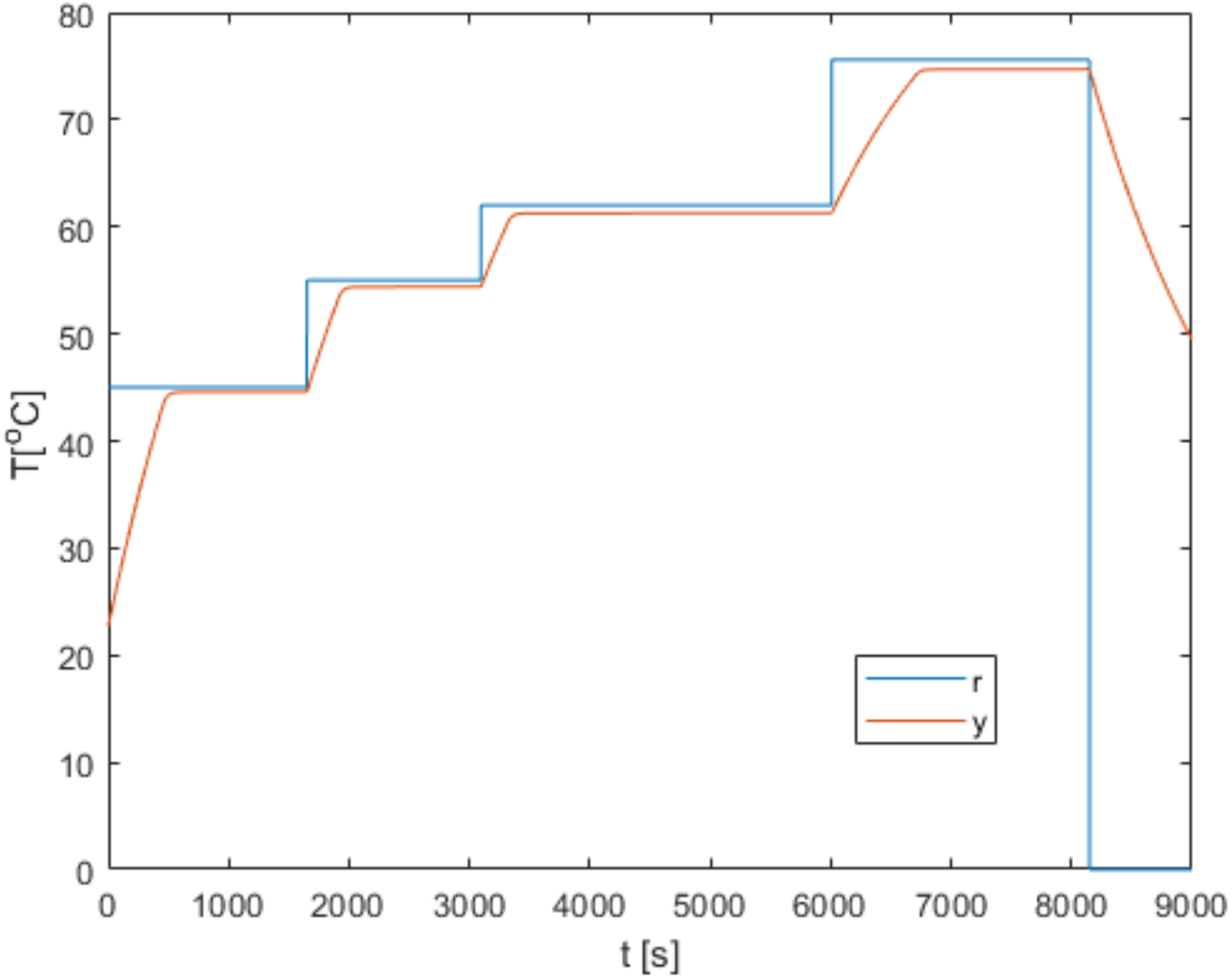


Stanowisko badawcze

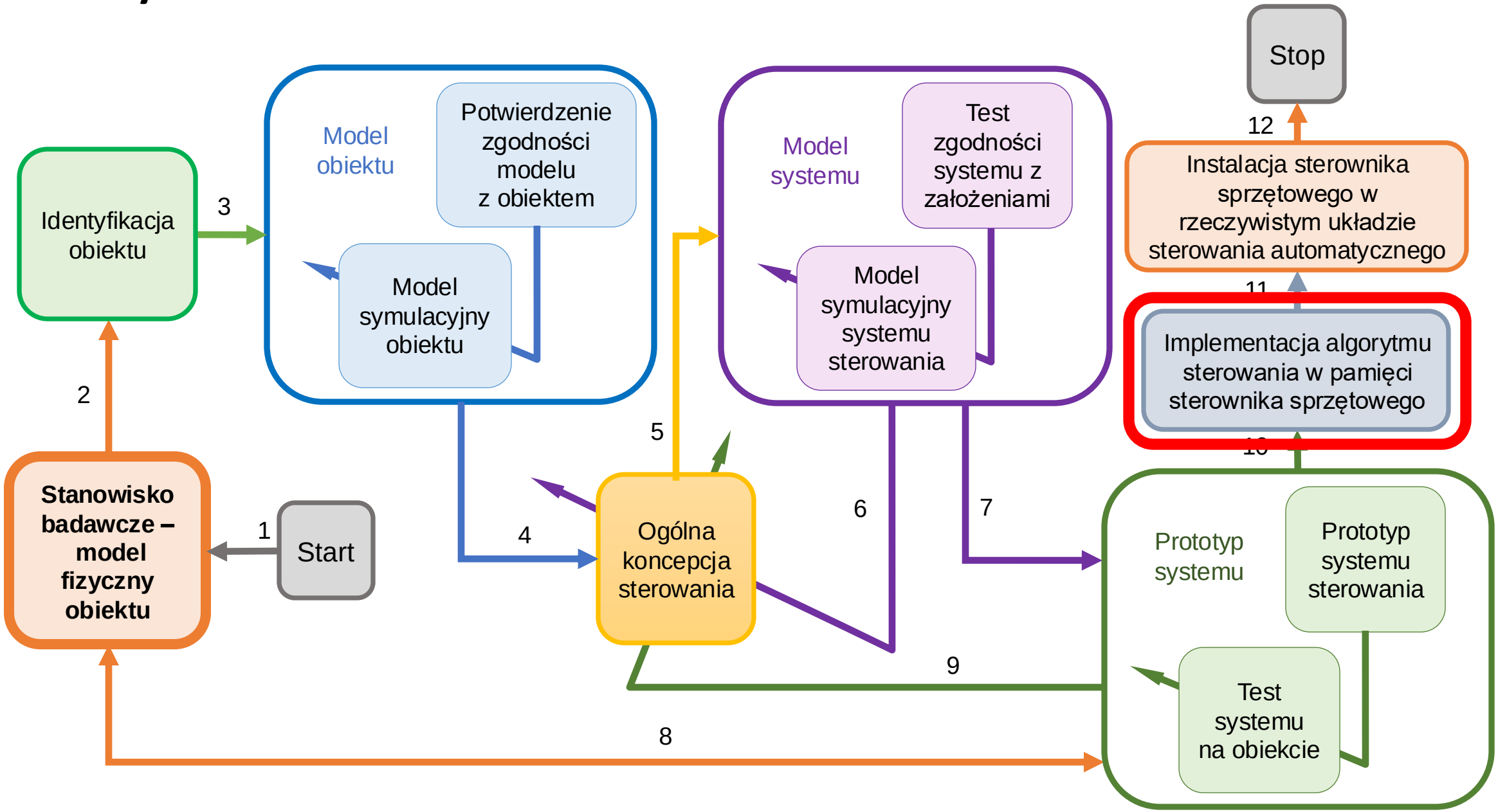
weryfikacja algorytmu

Weryfikacja algorytmu

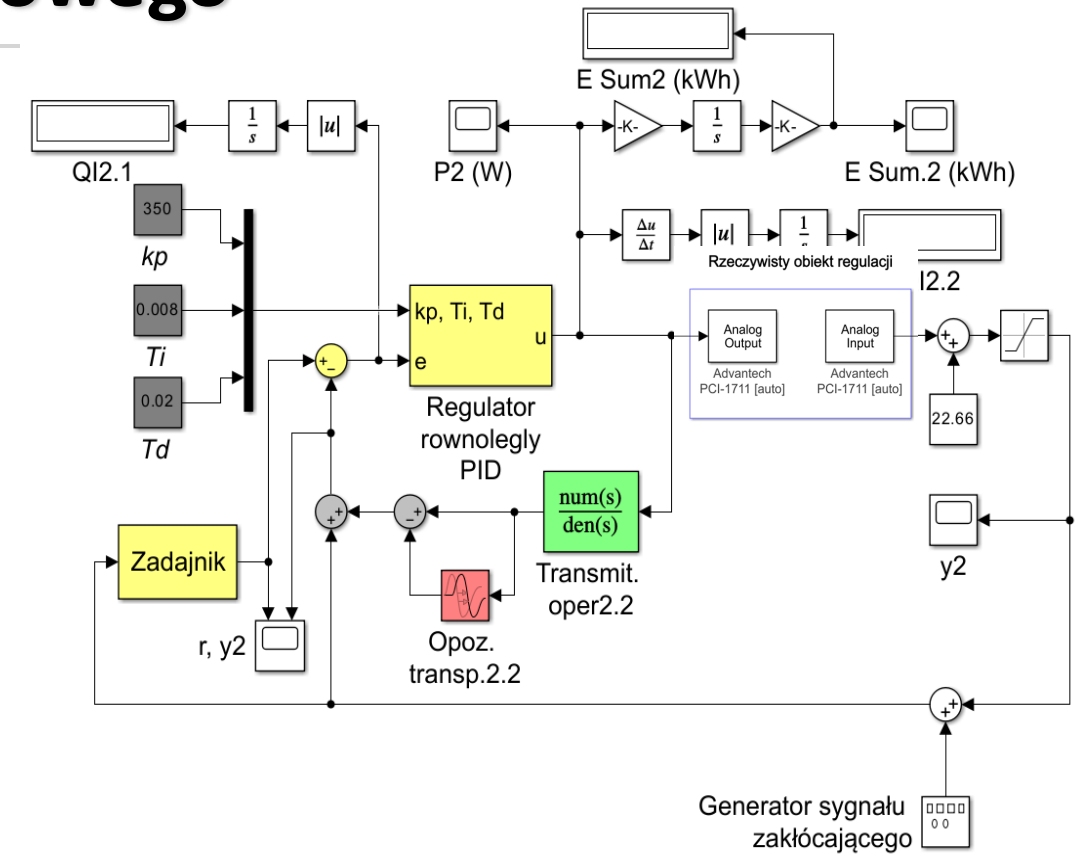
na obiekcie rzeczywistym

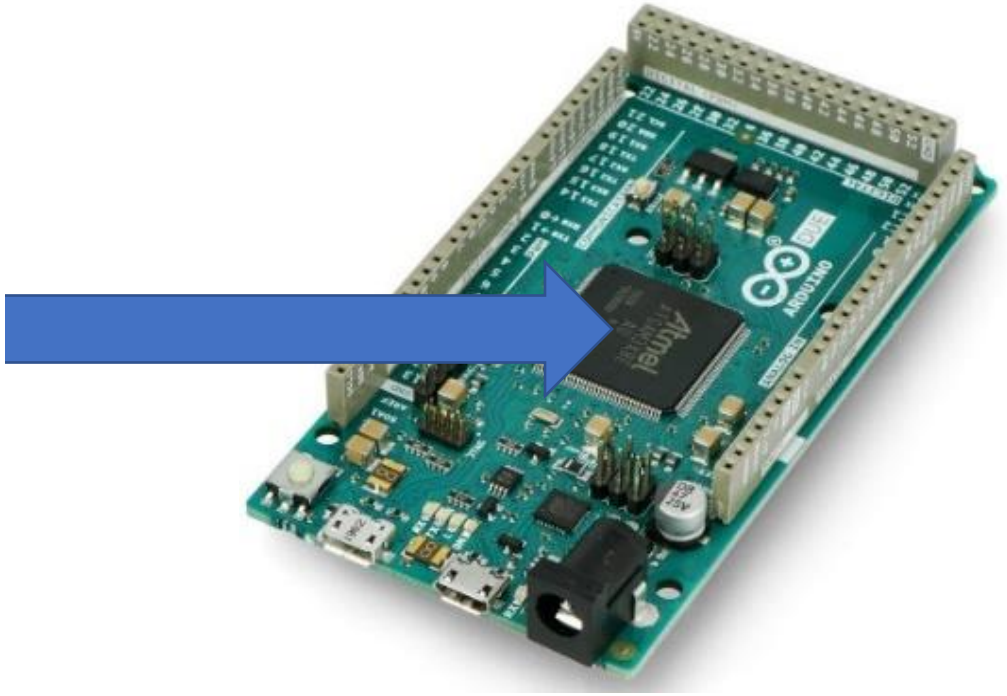


Metodyka


Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Identyfikacja obiektu
3
2
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
5
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

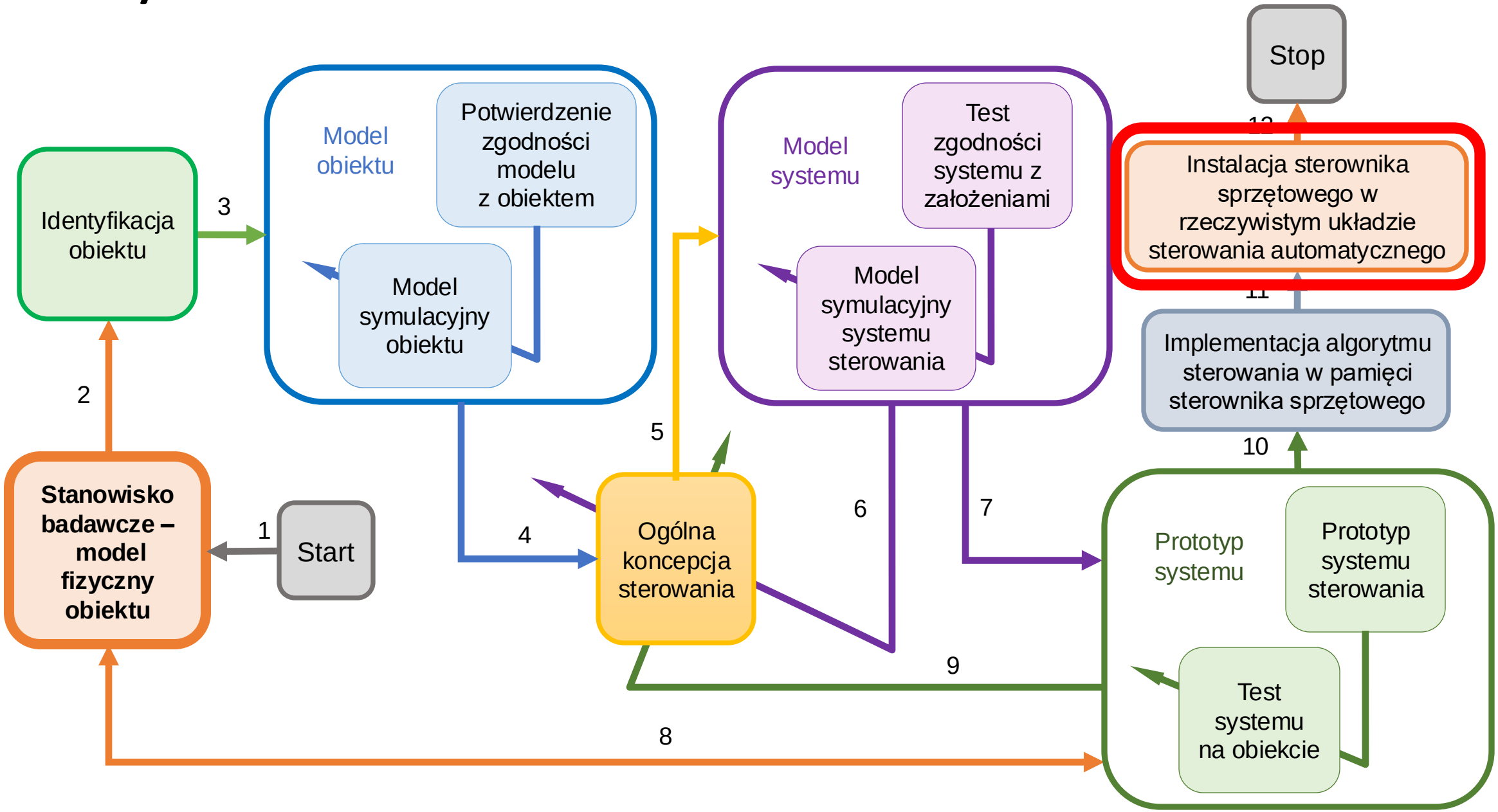
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego



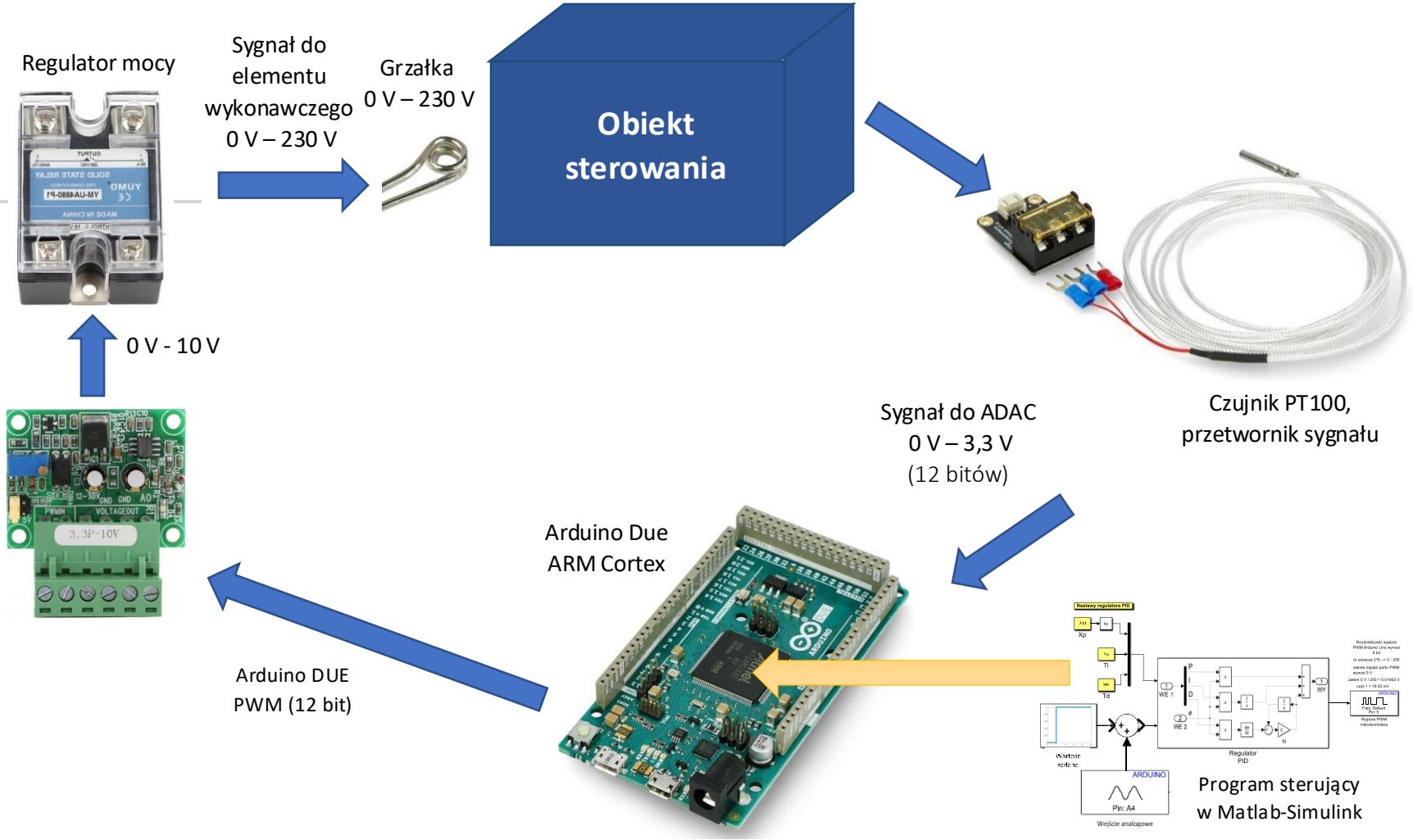


Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego

Metodyka


Stop
12
Instalacja sterownika sprzętowego w rzeczywistym układzie sterowania automatycznego
11
Implementacja algorytmu sterowania w pamięci sterownika sprzętowego
10
Model obiektu
Potwierdzenie zgodności modelu z obiektem
Model symulacyjny obiektu
Model systemu
Test zgodności systemu z założeniami
Model symulacyjny systemu sterowania
Identyfikacja obiektu
3
2
Stanowisko badawcze – model fizyczny obiektu
1
Start
4
5
Ogólna koncepcja sterowania
6
7
Prototyp systemu
Prototyp systemu sterowania
Test systemu na obiekcie
9
8

Elementy rzeczywistego zamknięty układ sterowania



Najlepszym potwierdzeniem poprawności zastosowanej metodyki prototypowania systemu jest dobrej jakości produkt wyjściowy

Podsumowanie

Przedstawiona metodyka prototypowania systemów sterowania realizowana z zastosowaniem modelowania i symulacji komputerowej na etapie projektowania może przyczynić się do skuteczne wykrycie i usunięcie błędów we wstępnej fazie powstawania produktu. Koszty związane z usunięciem ewentualnych błędów na tym etapie są najniższe.

Metodyka umożliwia optymalizację algorytmów sterowania i ich nastaw w funkcji niezawodności wyrażającej się m.in. odpornością systemu na zakłócenia.

Dziękuję za uwagę

UNIWERSYTET ROLNICZY
im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI I ENERGETYKI

Stanisław Lis

Proces prototypowania układu regulacji automatycznej w oparciu o modelowanie i symulację komputerową w środowisku Matlab-Simulink

Kraków - 2024