

Wydział Elektryczny
Zespół Automatyki (ZTMAiPC)

LABORATORIUM TEORII STEROWANIA

Ćwiczenie 6

RD

Badanie układu dwupołożeniowej regulacji temperatury

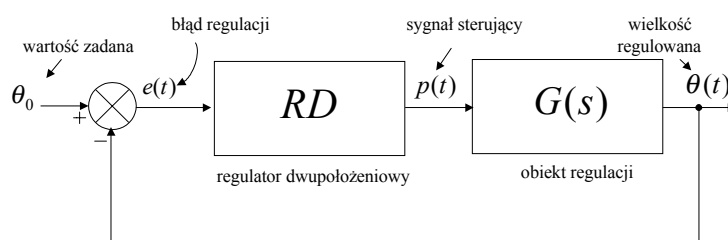
1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości regulacji dwupołożeniowej oraz możliwości poprawy jej jakości przez korekcyjne dynamiczne sprzężenie zwrotne.

2. Wprowadzenie teoretyczne

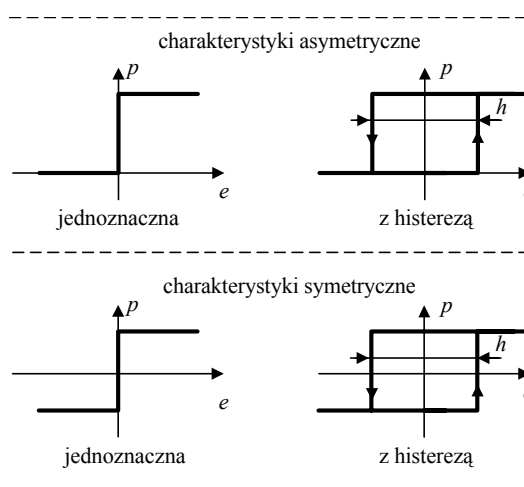
2.1. Pojęcia podstawowe

Układem regulacji dwupołożeniowej nazywa się taki układ, w którym regulator może nastawiać tylko dwie wartości wielkości sterującej obiektem regulacji. Schemat blokowy układu regulacji dwupołożeniowej przedstawia rys. 6.1.



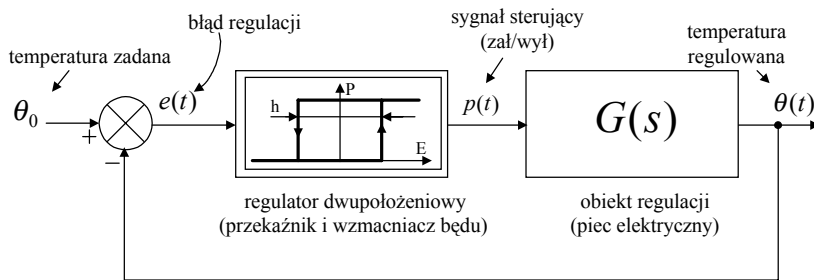
Rys. 6.1. Schemat układu regulacji dwupołożeniowej

Zgodnie z podaną definicją regulator dwupołożeniowy RD musi posiadać taką charakterystykę statyczną, aby na jego wyjściu regulatora istniały dwa stany stabilne. Jest to tzw. charakterystyka przekaźnika. Przykłady tego typu charakterystyk przedstawia rys. 6.2.



Rys. 6.2. Charakterystyki statyczne elementów dwupołożeniowych

Najprostszym układem regulatora jest przekaźnik dwupołożeniowy współdziałający ze wzmacniaczem błędu. Układ tego typu realizowany jest elektronicznie i ma charakterystykę asymetryczną z histerezą (rys. 5.3).



Rys. 6.3. Układ regulacji dwupołożeniowej z regulatorem elektronicznym

Regulatory dwupołożeniowe z przekaźnikiem znalazły szerokie zastosowanie do regulacji temperatury w urządzeniach ogrzewanych elektrycznie - układ, w którym pracują przedstawia rys. 6.3.

2.2. Obiekt regulacji

Obiekt regulacji w postaci pieca elektrycznego można zazwyczaj traktować jako liniowy człon inercyjny wyższego rzędu z opóźnieniem o transmitancji:

$$G_p(s) = \frac{ke^{-sT_r}}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)...(T_ns + 1)}; \tag{6.1}$$

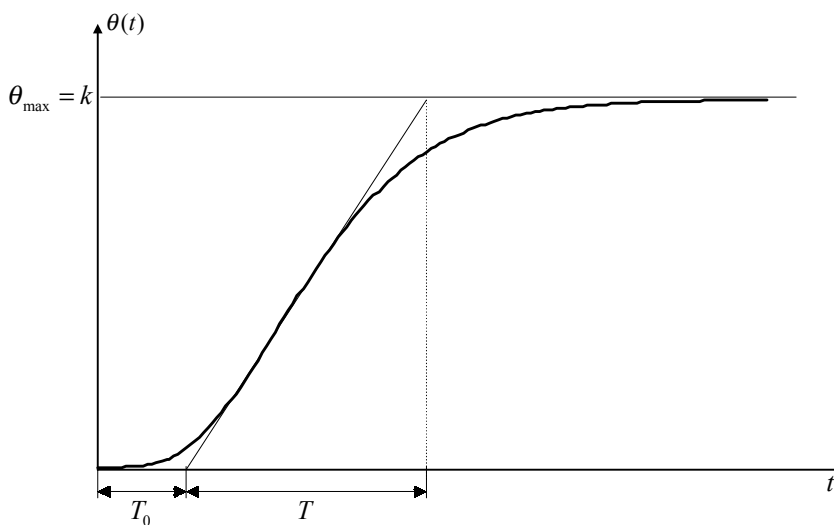
gdzie:

$T_1...T_n$ - stałe czasowe pieca,

T_r - czas opóźnienia pieca,

k - współczynnik wzmocnienia pieca (określa temperaturę ustaloną pieca przy wymuszeniu skokowym na wejściu).

Charakterystykę skokową odpowiadającą powyższej transmitancji, otrzymaną przez załączenie pieca, przedstawia rys. 6.4.



Rys. 6.4. Charakterystyka skokowa pieca. Wyznaczanie parametrów dla aproksymacji (6.2) układem inercyjnym I rzędu z opóźnieniem o stałej czasowej T i opóźnieniu zastępczym T_0

Na rysunku tym pokazano także powszechnie stosowaną aproksymację charakterystyki pieca, odpowiadającą transmitancji zastępczej układu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem:

$$G(s) = \frac{ke^{-sT_0}}{Ts + 1}; \quad (6.2)$$

gdzie:

T - zastępcza stała czasowa pieca,

T_0 - zastępczy czas opóźnienia pieca,

k - zastępczy współczynnik wzmocnienia pieca (określa temperaturę ustaloną pieca przy wymuszeniu skokowym na wejściu).

2.3. Analiza pracy układu dwupołożeniowej regulacji temperatury

W celu określenia parametrów regulacji należy przeanalizować działanie układu regulacji z rys. 6.3. Podstawowym założeniem upraszczającym jest przyjęcie jako transmitancji $G(s)$ obiektu regulowanego (pieca) wyrażenia (6.2). Analiza graficzna pracy układu przedstawiona została na rys. 6.5. Załóżmy, że temperatura zadana nie zmienia się, a temperatura obiektu w chwili t_0 równa jest temperaturze otoczenia θ_{ot} . Jeżeli uruchomimy układ w momencie, kiedy temperatura jest niższa od zadanej θ_0 , to przekaźnik załączy grzejnik w chwili t_0 i temperatura zacznie wzrastać zgodnie z krzywą nagrzewania. Po osiągnięciu przez temperaturę wartości θ_w , zwanej temperaturą wyłączenia, przekaźnik przerwie dopływ prądu do grzejnika (chwila t_1). Wskutek opóźnienia T_0 , wynikającego z bezwładności cieplnej pieca, temperatura będzie jeszcze przez pewien czas wzrastać, aż do chwili t_2 . Następnie temperatura pieca zacznie opadać zgodnie z krzywą stygnięcia, aż do osiągnięcia temperatury załączania θ_z , przy której przekaźnik spowoduje ponowne załączenie grzejnika (chwila t_3). Ponownie, cieplna bezwładność powoduje opadanie temperatury jeszcze przez pewien czas opóźnienia T_0 . Po upływie tego czasu w chwili t_4 temperatura zacznie wzrastać. Dalej wszystkie zjawiska powtarzają się w cyklu drgań stabilnych. Cykl nagrzewania i chłodzenia powtarza się w okresie τ , na który składają się czasy: τ_b - załączenia grzałki pieca oraz τ_a - czas wyłączenia grzałki pieca.

2.4. Parametry regulacji dwupołożeniowej

Ponieważ układy regulacji dwupołożeniowej są niestabilne, do oceny ich jakości stosuje się inne kryteria niż w przypadku układów regulacji ciągłej, od których przede wszystkim wymaga się stabilności. Bierze się pod uwagę mianowicie następujące parametry:

- średni uchyb regulacji: e_{sr} - jest różnicą między temperaturą zadaną θ_0 oraz temperaturą średnią θ_{sr} :

$$e_{sr} = \theta_1 - \theta_{sr}; \quad (6.3)$$

- zakres wahań temperatury: A - jest różnicą między maksymalną θ_2 i minimalną temperaturą θ_1 podczas regulacji:

$$A = \theta_2 - \theta_1; \quad (6.4)$$

- okres wahań temperatury: τ - jest sumą czasów, wyłączenia pieca τ_a i załączenia pieca τ_b :

Jeżeli zakres wahań temperatury A jest znacznie mniejszy od θ_m , to odcinki krzywych wykładniczych przedstawiające drgania można zastąpić odcinkami prostych aproksymujących przebieg wykładniczy, stycznych do tych krzywych w punktach $\theta(t) = \theta_0$. Nachylenia tych prostych określają wartości: stałej czasowej - T , wartości zadanej - θ_0 i maksymalnej temperatury ustalonej - θ_m . Błąd wynikający z takiej aproksymacji jest niewielki w porównaniu z błędem popełnionym przy zastąpieniu transmitancji rzeczywistej (6.1) przez przybliżoną (6.2). Dla drgań "prostoliniowych" można z rys. 6.5 odczytać następujące zależności:

- największy uchyb dodatni:

$$e_1 = T_0 \frac{\theta_0}{T} + \frac{h}{2}; \quad (6.5)$$

- największy uchyb ujemny:

$$-e_2 = T_0 \frac{\theta_m - \theta_0}{T} + \frac{h}{2}; \quad (6.6)$$

- czas załączenia:

$$\tau_b = T_0 + \left(e_1 + \frac{h}{2} \right) \frac{T}{\theta_m - \theta_0}; \quad (6.7)$$

- czas wyłączenia:

$$\tau_a = T_0 + \left(-e_2 + \frac{h}{2} \right) \frac{T}{\theta_0}; \quad (6.8)$$

- okres wahań:

$$\tau = \tau_a + \tau_b; \quad (6.9)$$

- zakres wahań:

$$A = \frac{I}{2} (e_1 + |e_2|); \quad (6.10)$$

- średni uchyb regulacji:

$$e_{sr} = \frac{I}{2} (e_1 + e_2); \quad (6.11)$$

Wygonie jest posługiwać się wartościami względnymi powyższych parametrów. Podstawiając wyrażenia (6.5)-(6.8) do wyrażeń (6.9)-(6.11), otrzymamy:

- średni uchyb względny:

$$\underline{e}_{sr} = \frac{e_{sr}}{\theta_m} = \frac{I T_0}{2 T} \left(2 \frac{\theta_0}{\theta_m} - 1 \right) \quad (6.12)$$

- względna amplituda drgań:

$$\underline{A} = \frac{A}{\theta_m} = \frac{I T_0}{2 T} \left(1 + \frac{h}{\theta_m} \frac{T}{T_0} \right) \quad (6.13)$$

- względny okres wahań temperatury:

$$\underline{\tau} = \frac{\tau}{T_0} = \frac{1 + \frac{h}{\theta_m} \frac{T}{T_0}}{\left(1 - \frac{\theta_0}{\theta_m}\right) \frac{\theta_0}{\theta_m}}; \quad (6.14)$$

Dodatkowo wprowadźmy oznaczenia następujących wielkości względnych:

- względna wartość zadana:

$$\underline{\theta}_0 = \frac{\theta_0}{\theta_m}; \quad (6.15)$$

- względna histereza:

$$\underline{h} = \frac{h}{\theta_m}; \quad (6.16)$$

- stosunek czasu opóźnienia T_0 do stałej czasowej T :

$$Q = \frac{T_0}{T}; \quad (6.17)$$

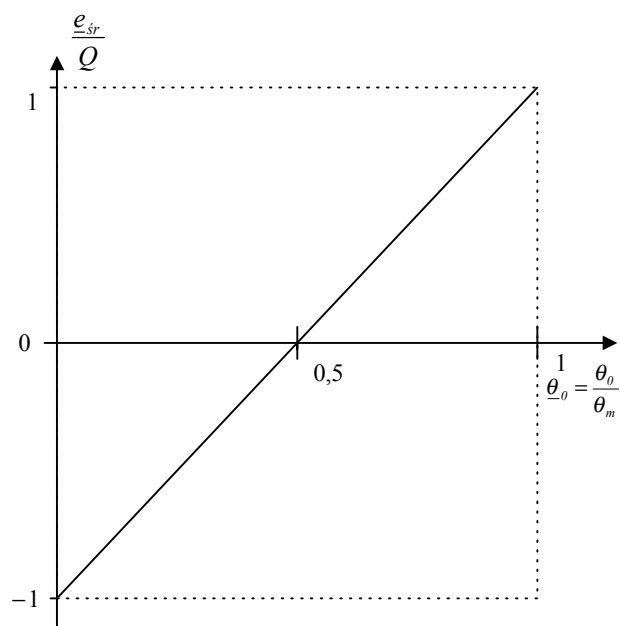
wówczas wzory (6.12), (6.13), (6.14) przyjmą postać:

$$\underline{e}_{sr} = \frac{Q}{2} (2\underline{\theta}_0 - 1); \quad (6.18)$$

$$\underline{A} = \frac{Q}{2} \left(1 + \frac{h}{Q}\right); \quad (6.19)$$

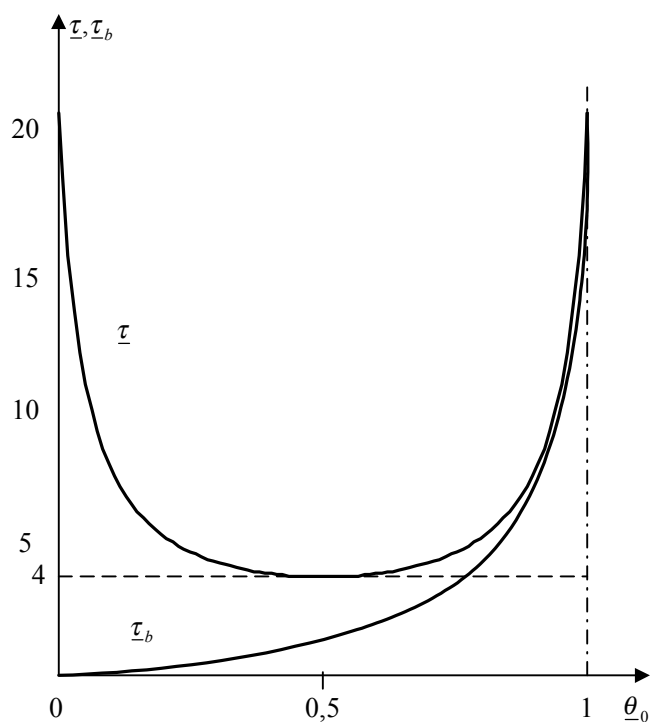
$$\underline{\tau} = \frac{1 + \frac{h}{Q}}{(1 - \underline{\theta}_0) \underline{\theta}_0}; \quad (6.20)$$

Wyrażenie (6.18), określające jeden z istotniejszych parametrów regulacji, można przedstawić graficznie jak na rys. 6.6. Najmniejszy średni błąd regulacji występuje wówczas gdy wartość zadana temperatury θ_0 wynosi 0,5 wartości temperatury maksymalnej (ustalonej θ_m). Wynika z tego również możliwość wyzerowania błędu średniego przez dobór napięcia zasilania pieca, tak aby temperatura ustalona pieca miała 2 razy większą wartość od temperatury zadanej. Metoda ta ma jednak ograniczenia ze względu na maksymalną moc pieca, tzn. w przypadku gdy temperatura zadana jest wyższa od połowy temperatury ustalonej przy znamionowym napięciu zasilania pieca.



Rys. 6.6. Wykres błędu średniego w funkcji względnej wartości zadanej

Minimum błędu dla wartości średnich jest związane również z minimalnym okresem wahań, co przedstawiono w formie interpretacji zależności (6.7) i (6.20) (rys. 6.7):

Rys. 6.7. Wykres okresu wahań temperatury - τ , oraz czasu załączenia grzałki pieca - τ_b , w funkcji względnej wartości zadanej

2.5. Drgania przy zmianach wartości zadanej

Jeżeli wartość zadana θ_0 jest sygnałem zmiennym, a prędkość jej zmiany jest większa od prędkości zmian wielkości regulowanej θ , to przekaźnik pozostaje trwale załączony lub wyłączony i układ przestaje drgać. Jeżeli natomiast wartość zadana zmienia się z prędkością mniejszą od prędkości zmian wielkości regulowanej to w układzie występują drgania jak na rys. 6.8.

Oznaczając prędkość zmian wartości zadanej jako:

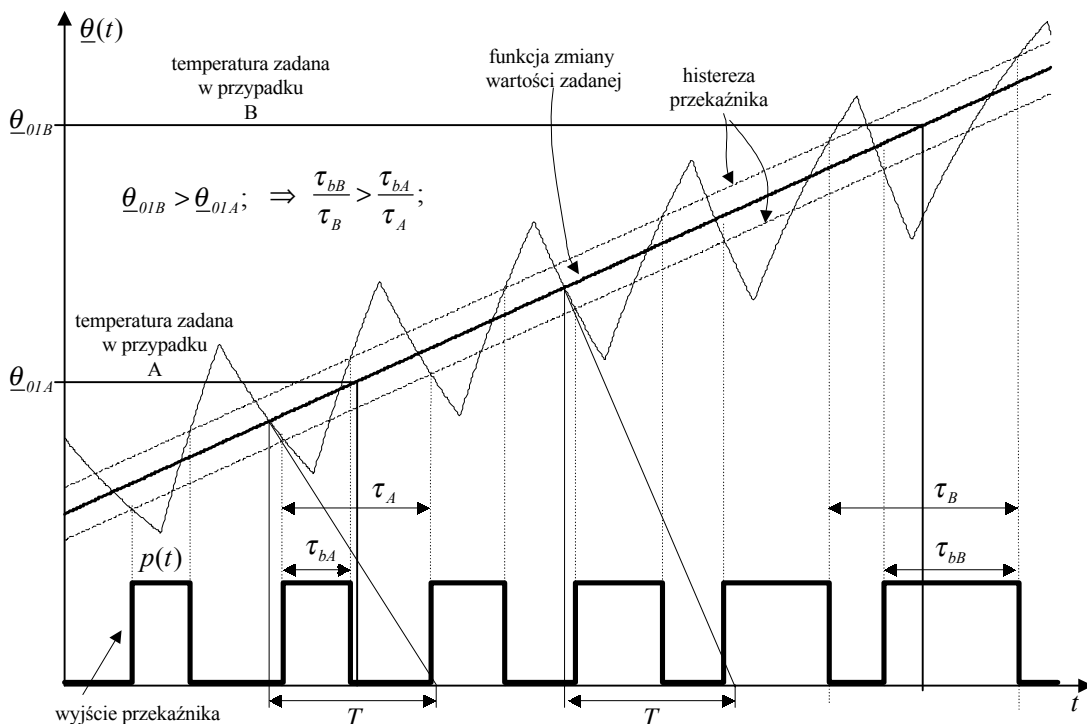
$$\theta'_0(t) = \frac{d\theta_0(t)}{dt}; \tag{6.21}$$

wprowadźmy wartość zadaną $\theta_{0l}(t)$ liniowo zmienną w czasie:

$$\theta_{0l}(t) = \theta_0(t) + T\theta'_0(t); \tag{6.22}$$

dla wartości względnej temperatury zadanej wprowadźmy oznaczenie $\underline{\theta}_{0l}(t)$:

$$\underline{\theta}_{0l}(t) = \frac{\theta_{0l}(t)}{\theta_m}; \tag{6.23}$$



Rys. 8. Drgania w układzie regulacji dwupołożeniowej w przypadku gdy prędkość zmian wartości zadanej jest mniejsza od prędkości zmian wartości regulowanej

Przy analogicznych założeniach jak w rozdziale 2.4 można udowodnić, że równania (6.12) - (6.20) zachowują słuszność również dla zmieniającej się wartości zadanej θ_{0l} (lub $\underline{\theta}_{0l}$). Wówczas wyrażenie na średni błąd regulacji ma postać:

$$e_{sr} = Q \left(\theta_0(t) + T\theta_1'(t) - \frac{\theta_m}{2} \right) \quad (6.24)$$

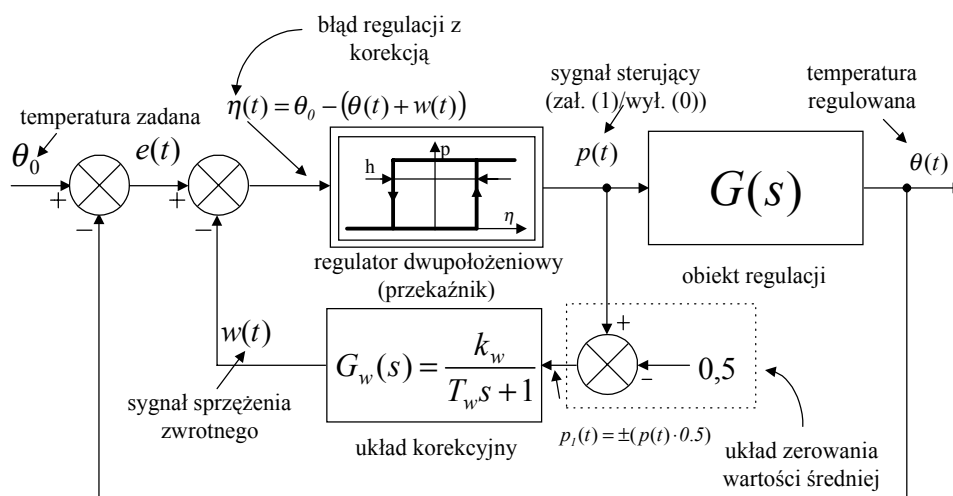
Ponadto interesująca jest zależność między względnym czasem załączenia przekaźnika a względną wartością zadaną w danej chwili:

$$\underline{\tau}_b = \frac{\tau_b}{\tau} = \underline{\theta}_{01}; \quad (6.25)$$

z której wynika, że względny czas załączenia grzałki jest równy względnej wartości zadanej temperatury regulowanej. Wynik powyższy można przedstawić graficznie (rys. 6.8) rozpatrując dwa różne przypadki temperatury zadanej (A i B).

2.6. Regulacja dwupołożeniowa z korekcją przez sprzężenie zwrotne

Podstawową zaletą regulacji dwupołożeniowej jest prostota realizacji. Niestety, cecha ta jest okupiona pogorszeniem jakości parametrów regulacji w porównaniu regulacją ciągłą. Najpoważniejszym mankamentem w przypadku regulacji temperatury są jej stosunkowo duże wahania wokół wartości średniej. Jak wiadomo z rozdziału 2.4 amplituda tych oscylacji zależy od parametrów samego obiektu i nie jest jej w stanie wyeliminować nawet zastosowanie przekaźnika bez histerezy. Jedną z możliwości poprawienia jakości regulacji jest zastosowanie układu z korekcją, przedstawionego na rys. 6.9.



Rys. 9. Układ regulacji dwupołożeniowej z korekcją

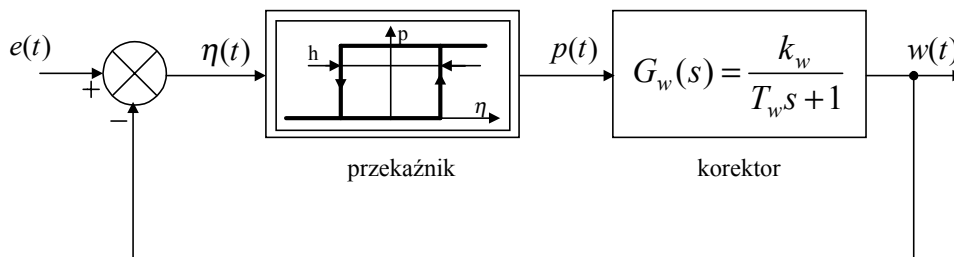
Układ korekcyjny o transmitancji:

$$G_w(s) = \frac{k_w}{T_w s + 1}; \quad (6.26)$$

włączony w obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego przekaźnika wprowadza modyfikację sygnału błędny $e(t)$, co powoduje częstsze niż bez korekcji przełączanie przekaźnika. Korekcja jest skuteczna wówczas gdy, prędkość narastania sygnału z korektora w jest większa od prędkości zmian temperatury w obiekcie (dobór k_w i T_w). Zsumowanie sygnałów sprzężenia zwrotnego z obiektu i korektora $w(t)$ oraz odjęcie ich sumy od wartości zadanej daje zastępczy sygnał błędny $\eta(t)$, którego prędkość i sposób narastania jest określona głównie przez sygnał $w(t)$. Łatwo zauważyć, że sygnał $\eta(t)$ spełnia dla

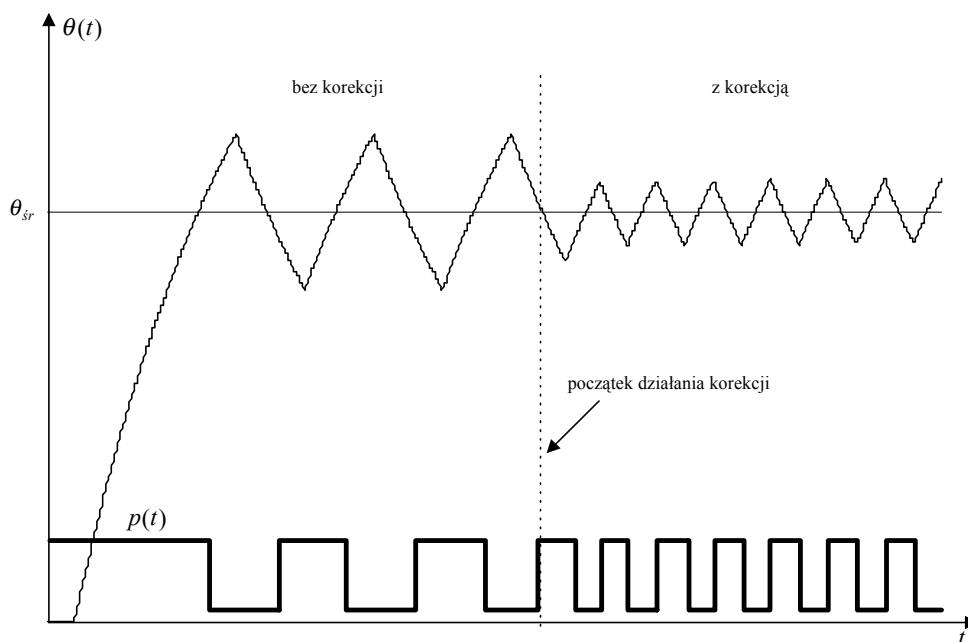
przełącznika identyczną rolę jak sygnał $e(t)$ w układzie bez korekcji, toteż szybsze zmiany wartości $\eta(t)$ w układzie z korekcją powodują częstsze przełączanie przełącznika, a więc skrócenie okresu wahań temperatury τ oraz zmniejszenie zakresu wahań temperatury A .

Średnia wartość sygnału sprzężenia zwrotnego w odejmuje się w układzie od średniego uchybu, co może doprowadzić do występowania podczas drgań ustalonych dużego uchybu średniego. Aby temu zapobiec, trzeba doprowadzić wartość średnią sygnału sprzężenia w do zera. W tym celu na wejście członu sprzężenia zwrotnego doprowadza się dodatkową składową równą $-0,5$. Ponieważ sygnał sterujący $p(t)$ przyjmuje wartości 0 lub 1 , więc w przypadku kiedy czasy załączenia i wyłączenia są sobie równe, do czego zwykle doprowadzamy, średnia wartość sygnału ($p(t) - 0,5$) na wejściu członu sprzężenia jest równa zero (bowiem sygnał $p_I(t)$ przyjmuje wartości: $-0,5$ lub $0,5$).



Rys. 6.10. Przełącznik z inercyjnym sprzężeniem zwrotnym

Rozpatrzmy teraz część układu złożoną z przełącznika i członu sprzężenia zwrotnego (rys. 6.10 - pominięto na nim dla uproszczenia sygnał $-0,5$, co spowoduje tylko przesunięcie układu odniesienia). Łatwo teraz zauważyć, że jest to układ o strukturze jak na rys. 6.2 dla czasu opóźnienia obiektu (T_0) równego zero. Powstają więc w nim drgania sygnału $w(t)$ powodujące działanie przełącznika. Transmitancja $G_w(s)$ jest tak dobrana, aby częstotliwość tych drgań była wyższa od częstotliwości drgań w układzie regulacji bez korekcji: stała czasowa T_w jest dostatecznie mała, czyli szybkość zmian $w(t)$ jest większa od szybkości zmian uchybu $e(t)$. Przełącznik załącza i wyłącza więc teraz sygnał sterujący $p(t)$ przy mniejszych odchyleniach temperatury od wartości zadanej, przez co amplituda oscylacji temperatury maleje (rys. 6.11).



Rys. 6.11. Przebiegi czasowe w układzie regulacji dwupołożeniowej z korekcją i bez korekcji

Parametry drgań układu z rys. 6.10 można obliczyć jak dla układu ze zmienną wartością zadaną. Wzory (6.12) - (6.25) pozostają aktualne dla tego układu przy założeniach:

- T_0 dąży do zera
- zamiast $\theta_0(t)$ wstawiamy $e(t)$
- zamiast T wstawiamy T_w
- zamiast θ_m wstawiamy k_w

Stosując powyższe podstawienia mamy kolejno:

$$e'(t) = \frac{de(t)}{dt}; \quad (6.27)$$

$$e_l = e(t) + T_w e'(t); \quad (6.28)$$

$$\underline{e}_l(t) = \frac{e_l(t)}{k_w}; \quad (6.29)$$

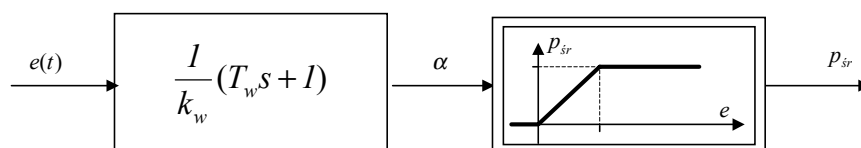
oraz

$$\underline{\tau}_b = \frac{\tau_b}{\tau} = \underline{e}_l(t) = \frac{I}{k_w} (e(t) + T_w e'(t)); \quad (6.30)$$

dla wartości średnich można zapisać:

$$p_{sr} = \underline{\tau}_b = \frac{I}{k_w} (e(t) + T_w e'(t)); \quad (6.31)$$

Jeżeli częstotliwość drgań przekaźnika ze sprzężeniem zwrotnym jest tak duża, że obiekt praktycznie nie reaguje na wartości chwilowe sygnału $p(t)$, wówczas sygnał p_{sr} można uważać za ciągły sygnał sterujący obiektem. Z równania (6.31) wynika, że przekaźnik z inercyjnym sprzężeniem zwrotnym jest dla wartości średniej swego sygnału wyjściowego $p(t)$ liniowym członem proporcjonalno - różniczkującym. Można go zatem traktować jako dwupołożeniowy regulator PD o czasie różniczkowania $T_d = T_w$ i zakresie proporcjonalności $x_p = k_w$. Z powyższych rozważań wynika, że układ z rys. 6.10. **dla wartości średnich** można przedstawić za pomocą struktury przedstawionej poniżej na rys. 6.12.:



Rys. 6.12. Schemat strukturalny odpowiadający dwupołożeniowemu regulatorowi PD

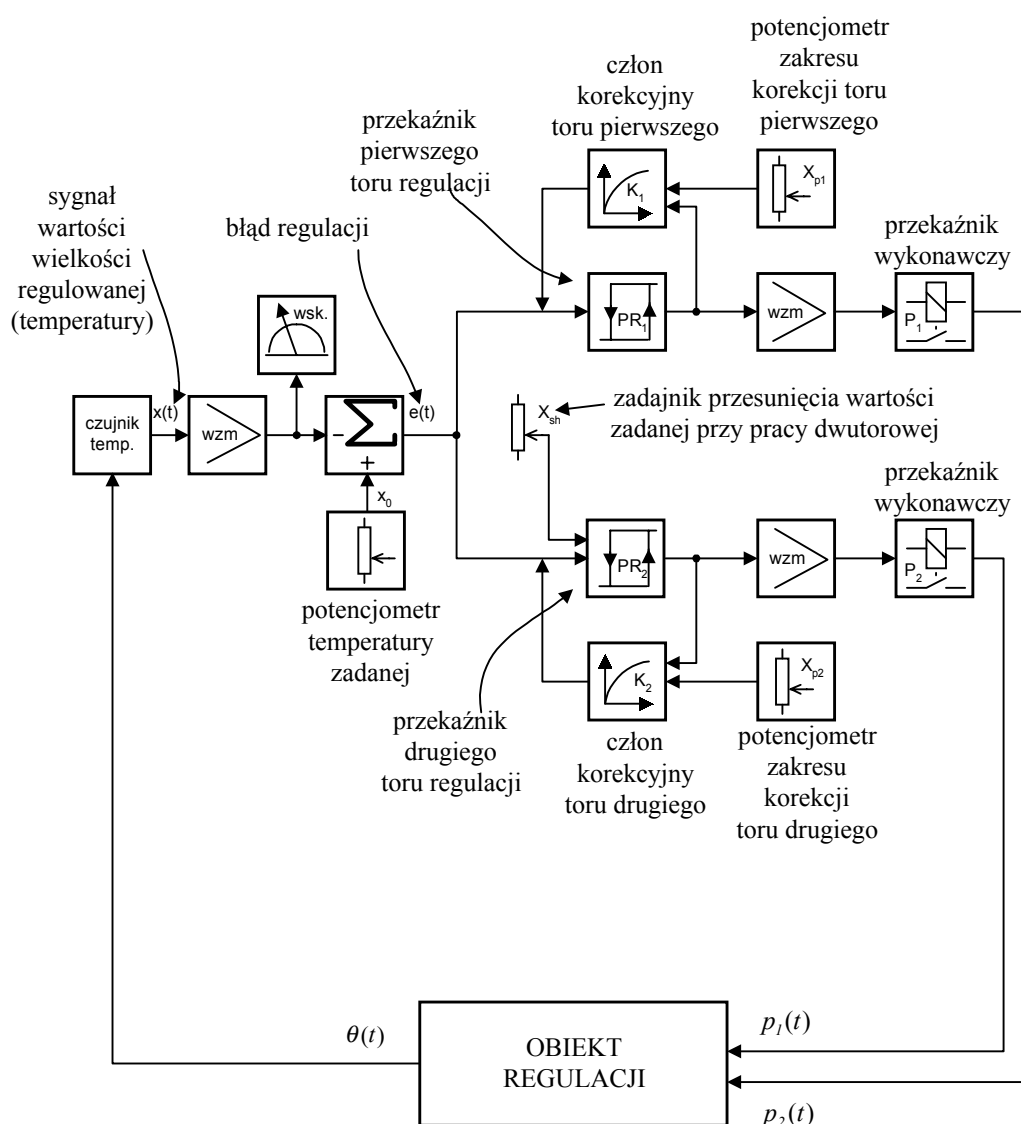
Z rozważań w rozdziale 2.5 wynika, że równanie (6.31) jest słuszne, jeżeli prędkość zmian $e(t)$ jest mniejsza od prędkości zmian $w(t)$. W przeciwnym wypadku oscylacje zanikają i przekaźnik pozostaje na stałe włączony lub wyłączony. Odpowiada to nasyceniu charakterystyki statycznej regulatora PD dla wartości sygnału $p(t)$ zero lub jeden. Rozpatrywany regulator można uważać za liniowy regulator PD, jeśli jego częstotliwość impulsowania jest znacznie większa niż częstotliwość oscylacji układu prostej regulacji dwupołożeniowej z tym samym obiektem. Dla spełnienia tego warunku konieczna jest stosunkowo duża wartość współczynnika wzmocnienia k_w oraz mała stała czasowa T_w i histerezy h . Osłabiając sprzężenie zwrotne przez zmniejszenie k_w , powoduje się zmniejszenie zakresu proporcjonalności, a więc zwiększenie wzmocnienia dwupołożeniowego regulatora PD. Może to doprowadzić do niestabilności układu regulacji. Podobny wpływ ma zbytnie

zwiększenie stałej czasowej T_w . W układzie niestabilnym zmienia się oscylacyjnie wartość średnia sygnału sterującego, przy czym amplituda tych oscylacji ograniczona jest nasyceniem charakterystyki statycznej dwupołożeniowego regulatora PD. Na oscylację wartości średniej nakładają się drgania regulatora dwupołożeniowego o większej częstotliwości.

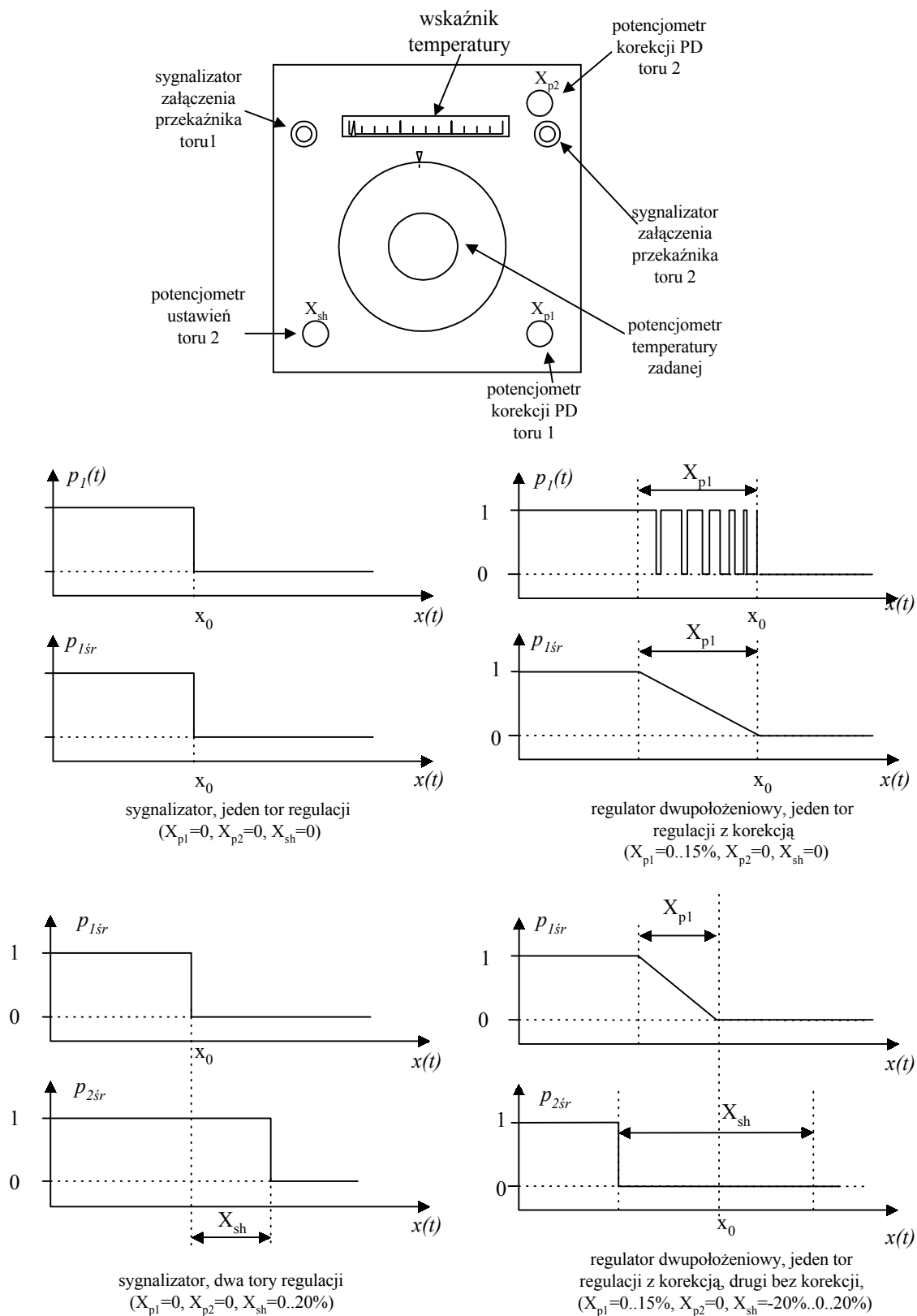
Jakość regulacji dwupołożeniowej można także poprawić stosując sprzężenie korekcyjne tak słabe, że nie linearyzuje ono własności przekaźnika. Ustalający się w tym przypadku w układzie cykl graniczny ma mniejszą amplitudę i większą częstotliwość niż w układzie bez sprzężenia korekcyjnego. Przy określonej częstotliwości sygnału pobudzającego przekaźnik zmieniający się sygnał sprzężenia wywołuje taki efekt dynamiczny, jak gdyby przekaźnik miał ujemną strefę histerezy, co dodatnio wpływa na jakość regulacji.

3. Regulator RE-6 - budowa i zasada działania

W ćwiczeniu laboratoryjnym wykorzystano elektroniczny regulator dwupołożeniowy RE-6. Schemat regulatora jest przedstawiony na rys. 6.13. Wartość temperatury $\theta(t)$ jest mierzona czujnikiem, który przekształca sygnał pomiarowy na sygnał napięciowy $x(t)$ reprezentujący temperaturę. Po wzmacnieniu, sygnał $x(t)$ podawany jest na wskaźnik oraz do węzła sumującego, w którym na podstawie wartości zadanej $x_0(t)$ wyliczany jest błąd regulacji $e(t)$. Sygnał błędu podawany jest następnie na dwa niezależne toru regulacji dwupołożeniowej. W każdym z torów możliwa jest korekcja dynamiczna PD której zakresy proporcjonalności są za pomocą potencjometrów X_{p1} dla toru 1 i X_{p2} dla toru 2. Możliwa jest również praca układu jako regulatora trójpołożeniowego, gdzie parametry przełączania toru 2 ustawia potencjometr X_{sh} . W zależności od ustawień, regulator może pracować również w konfiguracjach pośrednich przedstawionych na rys. 6.14.



Rys. 6.13. Schemat blokowy regulatora RE-6



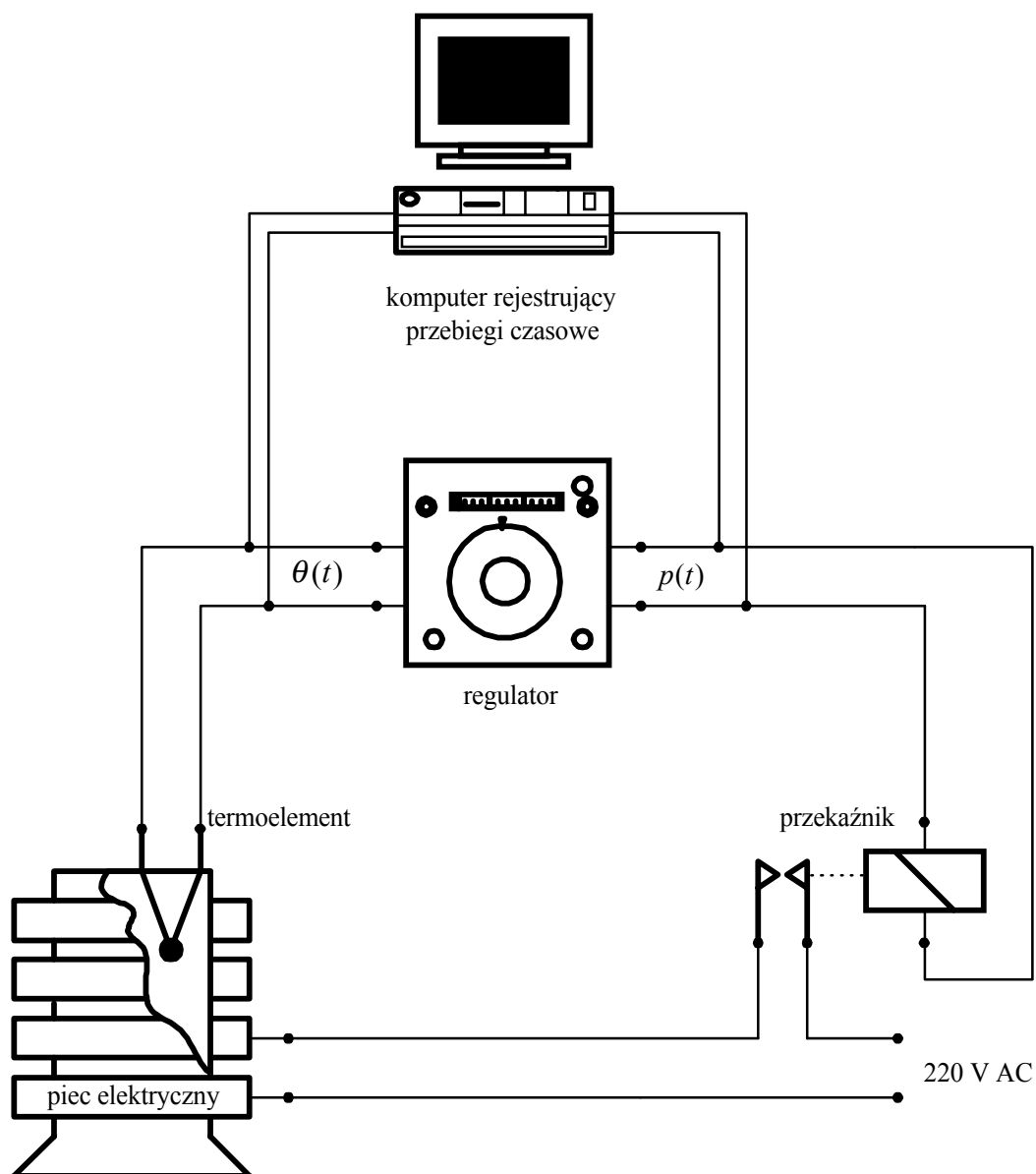
Rys. 6.14. Wybrane konfiguracje pracy regulatora RE-6

4. Program ćwiczenia

Ćwiczenie laboratoryjne zostało podzielone na dwie niezależne części:

- rejestrację przebiegów sterowania na stanowisku pomiarowym z regulatorem RE-6
- rejestrację przebiegów sterowania z wykorzystaniem symulacji komputerowej

4.1. Część I - badanie układu regulacji dwupołożeniowej z piecem elektrycznym i regulatorem RE-6



Rys. 6.15. Układ pomiarowy z regulatorem RE-6

4.1.1. Badanie temperatury ustalonej pieca elektrycznego

1. Uruchomić program rejestrujący przebiegi czasowe na komputerze PC.
2. Ustawić nastawnik temperatury zadanej RE-6 w pozycji maksymalnej wartości.
3. Załączyć piec elektryczny.
4. Załączyć rejestrację przebiegów czasowych na komputerze PC.
5. Rejestrację prowadzić, aż do ustalenia się temperatury w piecu elektrycznym, zanotować temperaturę ustaloną.
6. Przerwać rejestrację pomiarów, wyłączyć układ pomiarowy i schłodzić piec do temperatury pokojowej.

4.1.2. Badanie regulacji dwupołożeniowej bez korekcji PD

1. Ustawić nastawnik temperatury zadanej RE-6 w pozycji 75 % temperatury ustalonej pieca elektrycznego mierzonej względem temperatury otoczenia.
2. Załączyć piec elektryczny.
3. Załączyć rejestrację przebiegów czasowych na komputerze PC.
4. W chwili ustalenia się oscylacji temperatury w piecu elektrycznym zarejestrować 3 okresy oscylacji, następnie ustawić nastawnik temperatury zadanej w pozycji 25 % temperatury ustalonej pieca elektrycznego mierzonej względem temperatury otoczenia.
5. Przerwać rejestrację pomiarów po uzyskaniu 3 okresów oscylacji, wyłączyć układ pomiarowy i schłodzić piec do temperatury pokojowej.

4.1.3. Badanie regulacji dwupołożeniowej z korekcją PD

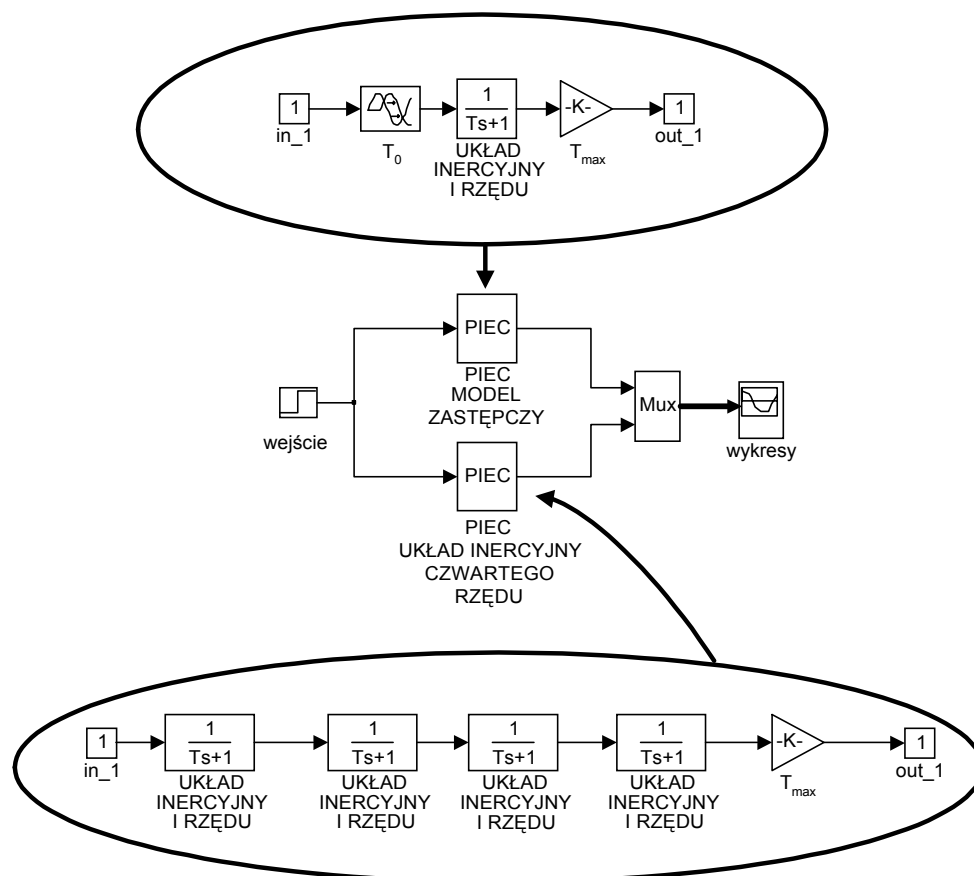
1. Ustawić nastawnik temperatury zadanej RE-6 w pozycji 50 % temperatury ustalonej pieca elektrycznego.
2. Ustawić potencjometr korekcji dynamicznej PD (X_{p1}) na wartość maksymalną (15%)
3. Załączyć piec elektryczny.
4. Załączyć rejestrację przebiegów czasowych na komputerze PC.
7. Rejestrację prowadzić, aż do ustalenia się temperatury w piecu elektrycznym.
5. Przerwać rejestrację pomiarów, wyłączyć układ pomiarowy i schłodzić piec do temperatury pokojowej.

4.2. Część II - badanie układu regulacji dwupołożeniowej metodą symulacji komputerowej

Dla potrzeb symulacji przyjęto temperaturę otoczenia równą 20 [°C]. Wszystkie wartości temperatury względnej odnoszą się do wartości temperatury otoczenia.

4.2.1. Porównanie odpowiedzi skokowych dla dwóch modeli pieca elektrycznego

1. Uruchomić program **MATLAB**.
2. W oknie uruchomionego programu podać komendę: *simulink*.
3. Z menu **File-Open...** okna **simulink** otworzyć plik **modelRD.m** (rys. 6.16)
4. Przeprowadzić symulację odpowiedzi skokowej dla modelu inercyjnego czwartego rzędu oraz, dla modelu aproksymowanego transmitancją układu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem.



Rys. 6.16. Schemat układu do porównywania charakterystyk skokowych modeli pieca elektrycznego w programie MATLAB-SIMULINK

Ustawienia parametrów bloków:

PIEC - MODEL ZASTĘPCZY:

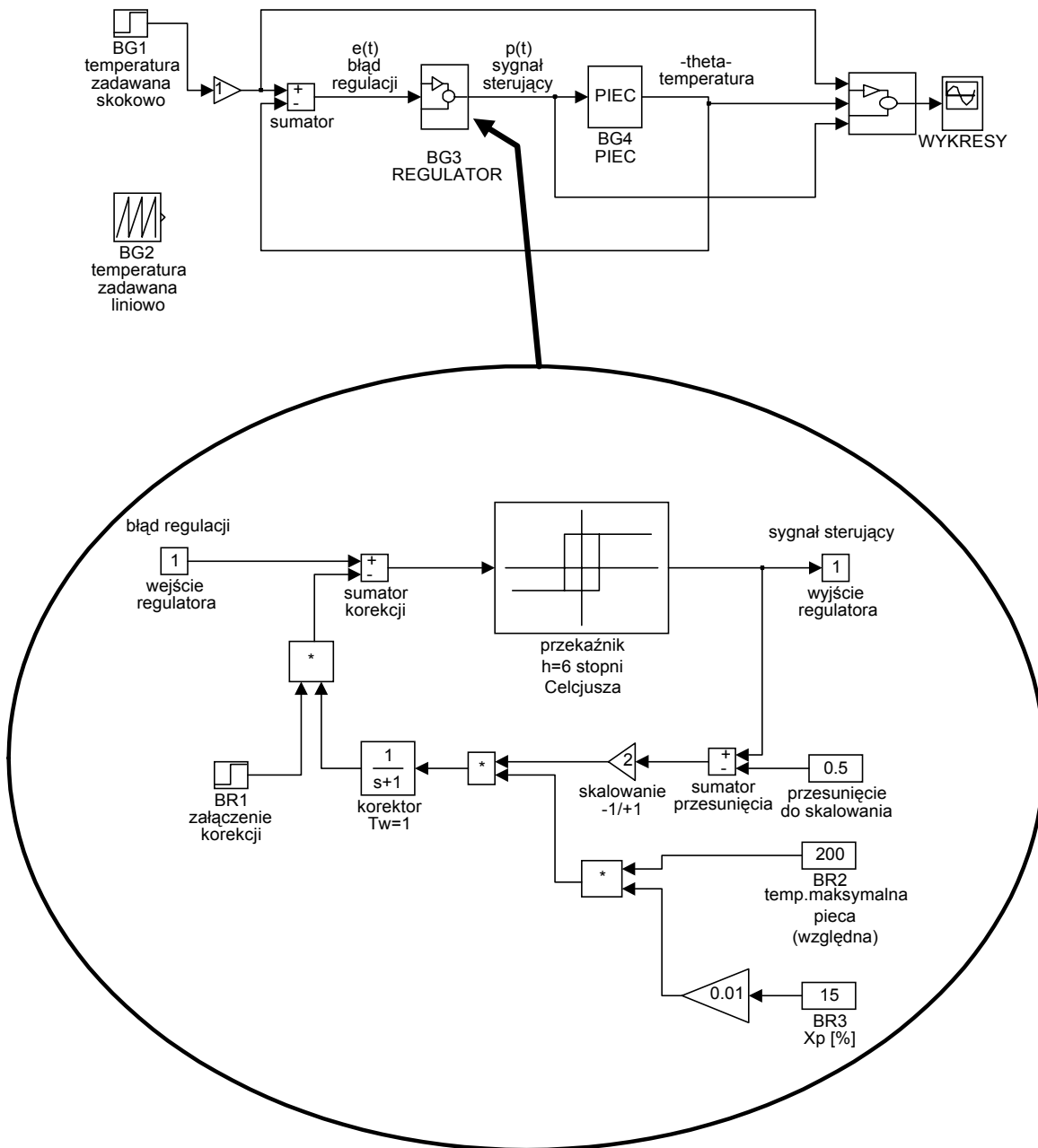
- $T_0=21$ - opóźnienie [s];
- $T=67$ - stała czasowa [s];
- $T_{max}=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [°C];

PIEC - UKŁAD INERCYJNY CZWARTEGO RZĘDU:

- $T_0=0$ - parametr nie jest istotny dla modelu rzeczywistego;
- $T=17$ - stała czasowa [s];
- $T_{max}=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [°C];

4.2.2. Praca układu przy stałej wartości zadanej

1. Z menu **File-Open...** okna **simulink** otworzyć plik **regRD.m** (rys. 6.17).
2. Przeprowadzić badania zgodnie z podanymi parametrami symulacji dla trzech różnych wartości zadanych - 40, 120, 190 [°C], model inercyjny z opóźnieniem.



Rys. 6.17. Schemat układu do badania parametrów układu regulacji dwupołożeniowej w programie MATLAB-SIMULINK

Ustawienia parametrów bloków:

BG1 - blok wartości zadanej dla wymuszenia skokowego

- $Step\ time=0$;
- $Initial\ value=20$ - temperatura otoczenia [$^{\circ}C$];
- $Final\ value=40,120,190$ - temperatura zadana (bezwzględna) [$^{\circ}C$];

BG2 - blok wartości zadanej dla wymuszenia narastającego liniowo względem czasu;
(w tym punkcie ćwiczenia blok odłączony)

BG3 - blok regulatora - edycja parametrów w osobnym oknie (dalej),

BG4 - PIEC - obiekt regulacji;

- $T_0=21$ - opóźnienie dla modelu zastępczego[s];
- $T_i=67$ - stała czasowa dla modelu zastępczego [s];
- $T_{max}=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [$^{\circ}C$];
- $T_i=17$ - stała czasowa dla modelu inercyjnego 4 rzędu [s];
- $Typ\ modelu: 0$;

Ustawienia bloku regulatora (blok BG3):

BR1 - blok załączenia korekcji PD

- $Step\ time=120$ - chwila włączenia korekcji dynamicznej [s];
- $Initial\ value=0$;
- $Final\ value=1$ - "1" oznacza, że korekcja będzie włączona po czasie $Step\ time$, "0" - korekcja zawsze wyłączona;
BR2 - blok określający względną temperaturę (tzn. względem temperatury otoczenia) ustaloną pieca
- $Constant\ value=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [$^{\circ}C$];
BR3 - blok określający współczynnik proporcjonalności X_p dla korekcji dynamicznej
- $Constant\ value=15$ - współczynnik proporcjonalności X_p dla korekcji dynamicznej [%];

- Przeprowadzić badania zgodnie z podanymi parametrami symulacji dla jednej wartości zadanej:
120 [$^{\circ}C$] , model inercyjny czwartego rzędu.

Ustawienia parametrów bloków:

BG1 - blok wartości zadanej dla wymuszenia skokowego

- $Step\ time=0$;
- $Initial\ value=20$ - temperatura otoczenia [$^{\circ}C$];
- $Final\ value=40,120,190$ - temperatura zadana (bezwzględna) [$^{\circ}C$];

BG2 - blok wartości zadanej dla wymuszenia narastającego liniowo względem czasu;
(w tym punkcie ćwiczenia blok odłączony)

BG3 - blok regulatora - edycja parametrów w osobnym oknie (dalej),

BG4 - PIEC - obiekt regulacji;

- $T_0=21$ - opóźnienie dla modelu zastępczego [s];
- $T_i=67$ - stała czasowa dla modelu zastępczego [s];
- $T_{max}=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [$^{\circ}C$];
- $T_i=17$ - stała czasowa dla modelu inercyjnego 4 rzędu [s];
- $Typ\ modelu: 1$;

Ustawienia bloku regulatora (blok BG3):

BR1 - blok załączenia korekcji PD

- $Step\ time=120$ - chwila włączenia korekcji dynamicznej [s];
- $Initial\ value=0$;

- *Final value*=1 - "1" oznacza, że korekcja będzie włączona po czasie *Step time*, "0" - korekcja zawsze wyłączona;
BR2 - blok określający względną temperaturę (tzn. względem temperatury otoczenia) ustaloną pieca
- *Constant value*=200 - temperatura ustalona pieca (względna) [°C];
BR3 - blok określający współczynnik proporcjonalności X_p dla korekcji dynamicznej,
- *Constant value*=15 - współczynnik proporcjonalności X_p dla korekcji dynamicznej [%];

4.2.3. Praca układu przy wartości zadanej zmieniającej się liniowo bez korekcji PD

1. Przeprowadzić badania zgodnie z podanymi parametrami symulacji:

Ustawienia parametrów bloków:

BG1 - blok wartości zadanej dla wymuszenia skokowego (odłączony),

BG2 - blok wartości zadanej dla wymuszenia narastającego liniowo względem czasu,

- *Time values*=[0 200 200];
- *Output values*=[0 100 0];
powyższe wartości określają przebieg o kształcie trójkątnym i współrzędnych (czas [s], wartość [-]):
(0,0), (200,100), (200,0);
BG3 - blok regulatora - edycja parametrów w osobnym oknie (dalej),
BG4 - PIEC - obiekt regulacji;
- $T_\theta=21$ - opóźnienie dla modelu zastępczego [s];
- $T_i=67$ - stała czasowa dla modelu zastępczego [s];
- $T_{max}=200$ - temperatura ustalona pieca (względna) [°C];
- $T_i=17$ - stała czasowa dla modelu inercyjnego 4 rzędu [s];
- *Typ modelu*: 0;

Ustawienia bloku regulatora (blok BG3):

BR1 - blok załączenia korekcji PD,

- *Step time*=120 - chwila włączenia korekcji dynamicznej [s];
- *Initial value*=0;
- *Final value*=0 - "1" oznacza, że korekcja będzie włączona po czasie *Step time*, "0" - korekcja zawsze wyłączona;
BR2 - blok określający względną temperaturę (tzn. względem temperatury otoczenia) ustaloną pieca
(w tym punkcie ćwiczenia parametry bloku nie są wykorzystywane),
BR3 - blok określający współczynnik proporcjonalności X_p dla korekcji dynamicznej (w tym punkcie ćwiczenia parametry bloku nie są wykorzystywane).

5. Opracowanie sprawozdania

5.1. Na podstawie wyników pomiarów na stanowisku fizycznym z regulatorem RE-6

1. Na podstawie charakterystyki skokowej otrzymanej w p. 4.1.1 określić parametry dynamiczne pieca elektrycznego zastosowanego w ćwiczeniu laboratoryjnym dla aproksymacji transmitancji pieca układem inercyjnym I rzędu z opóźnieniem.
2. Korzystając z aproksymowanych parametrów dynamicznych otrzymanych w p.1, oznaczyć na wykresie uzyskanym w p. 4.1.2 parametry dynamiczne pieca elektrycznego oraz określić parametry jakości regulacji.
3. Na wykresie uzyskanym w p. 4.1.3 oznaczyć wartość zadaną nastawioną na nastawniku wartości zadanej i wyznaczyć błąd regulacji. Wyjaśnić istotę powstawania tego typu błędu w regulatorze RE-6. (Wskazówka: przeanalizować rys. 6.14).

5.2. Na podstawie wyników z symulacji komputerowej w programie MATLAB

1. Na podstawie charakterystykach otrzymanych w p. 4.2.2 oznaczyć parametry dynamiczne pieca oraz określić parametry jakości regulacji. Na podstawie tych parametrów oszacować temperaturę ustaloną pieca przy zasilaniu ciągłym.
2. Korzystając z aproksymowanych parametrów dynamicznych otrzymanych w p. 4.2.1 p.1, oznaczyć na wykresie uzyskanym w p. 4.2.2 p.3 parametry dynamiczne pieca elektrycznego oraz określić graficznie parametry jakości regulacji.

6. Literatura

1. J. Mazurek, H.Vogt, W.Żydanowicz: „Podstawy automatyki”, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1996.
2. Red. W. Findeisen: „Poradnik inżyniera. Automatyka”, WNT, Warszawa 1973.
3. T. Kaczorek: „Teoria układów regulacji automatycznej”, WNT, Warszawa 1974.
4. W. Findeisen: „Technika regulacji automatycznej”, PWN, Warszawa 1978.
5. W. Pełczewski: „Teoria sterowania”, WNT, Warszawa, 1980.

Częstochowa, 1999