

II. Jednoobwodowy układ regulacji (SISO Design)

II.1. Wprowadzenie

II.1.1 Projektowanie układów sterowania

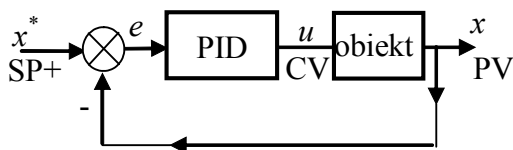
Projektowanie układów sterowania odbywa się w kilku etapach:

- określenie celu, w tym:
 - o wybór zmiennej/zmiennych, na podstawie których można oceniać sterowanie,
 - o wybór kryteriów jakości (typ i wartość)
- wybór zmiennej sterującej za pomocą, której można oddziaływać na obiekt,
- wybór typu sterowania - sterowanie układzie otwartym lub regulacja
 - o w przypadku sterowania w układzie otwartym - opracowanie przepisu na sterowanie
 - o w przypadku regulacji:
 - wybór typu regulatora - zazwyczaj jest to algorytm PI, czyli najprostszy regulator, który zapewnia (zazwyczaj) zerowy uchyb regulacji w stanie ustalonym,
 - dobraniu wartości nastaw (parametrów regulatora), które zapewniają stabilność układu i wymaganą jakość sterowania

Zadaniem układów sterowania na analizowanych obiektach cieplnych jest uzyskanie i utrzymanie określonej temperatury wewnątrz pomieszczeń, niezależnie od zmieniających się warunków zewnętrznych i innych zakłóceń.

II.1.2 Klasyczny układ regulacji ciągłej PID

Klasycznym rozwiązaniem problemu utrzymywania zadanej temperatury w pomieszczeniach jest zastosowanie regulatora z algorytmem PID w pętli ujemnego sprzężenia (Rys. II.1).



PV (proces value) - zmienna procesowa
 CV (control value) - zmienna sterująca
 SP (set point) - wartość zadana
 e (error) - uchyb regulacji

Rys. II.1. Jednoobwodowy układ regulacji

Podstawowy algorytm regulacji PID jest definiowany na dwa sposoby:

$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} + u_0$	$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] + u_0$	(II-1)
PID-IND (INDEPENDENT algorithm)	PID-ISA (Ideal Standard Algorithm)	

gdzie: $e(t)$ - uchyb regulacji, $u(t)$ - zmienna sterująca, u_0 - wartość wyjściu regulatora w chwili $t=0$.
 Wybór struktury PID nie wpływa na działanie układu regulacji. Należy jednak zawsze sprawdzić jaką strukturę PID zakłada metoda doboru nastaw regulatora (parametrów K_p , T_i , T_d), a jaką zapewnia blok (urządzenie) PID, które zostało zastosowane w układzie. Metody doboru nastaw zakładają zwykle strukturę ISA, natomiast w blokach i urządzeniach realizujących algorytm PID można spotkać różne struktury, przy czym w obu strukturach stosowane są takie same oznaczenia nastaw (K_p , T_i , T_d). W razie konieczności przeliczyć nastawy zgodnie z zależnością:

$$K_{pIND} + \frac{1}{T_{iIND} s} + T_{dIND} s = K_{pISA} + \frac{K_{pISA}}{T_{iISA} s} + K_{pISA} T_{dISA} s \quad (II-2)$$

Analityczny opis układu regulacji:

1) Model podstawowy (przykład)

$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_{11}u + b_{12}z \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_{22}u + b_{22}z \\ u = K_p(x_1^* - x_1) + K_I \int (x_1^* - x_1) dt \end{cases}$	- równania dynamiki obiektu	(II-3)
	- równanie regulatora PI	

Wy: x_1, x_2, u , We: x_1^*

Równania statyczne:

$$\begin{cases} 0 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + b_{11}u + b_{12}z \\ 0 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + b_{21}u + b_{22}z \end{cases} \text{ oraz } x_1 = x_1^*$$

Punkt równowagi:

$$x_1 = x_1^*, x_2 = \dots, u =$$

2) Równania stanu obiektu ($\dot{x} = Ax + Bu$) + regulator

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ z \end{bmatrix} \text{ oraz } u = K_P(x_1^* - x_1) + K_I \int (x_1^* - x_1) dt$$

Równania statyczne dla stanu równowagi ($x_1 = x_1^*$)

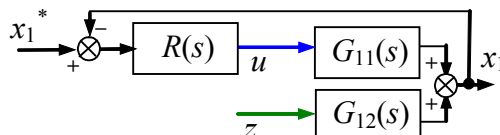
$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & b_{12} \\ 0 & b_{22} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^* \\ z \end{bmatrix}$$

Punkt równowagi: $x = -A^{-1}Bu$

3) Schemat układu regulacji

a) na bazie transmitancji obiektu (G_1, G_2)

$x_1 = G_{11}u + G_{12}z$ $u = G_R(x_1^* - x)$	$G_R = K_P + \frac{K_I}{s}$
--	-----------------------------



Rys. II.2. Schemat UR na bazie transmitancji

II.1.3 Układ regulacji ze sterowaniem binarnym

II.1.3.1. Regulacja dwupołożeniowa

Sterowanie on-off kotłem

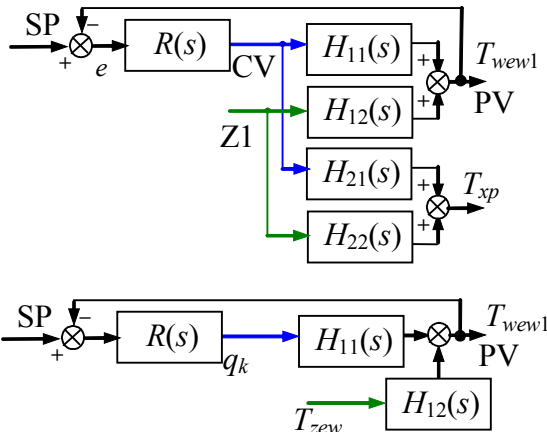
II.1.3.2. Regulacja ciągła z wyjściem dwupołożeniowym

II.1.4 Realizacja układu regulacji i regulatora PI(D)

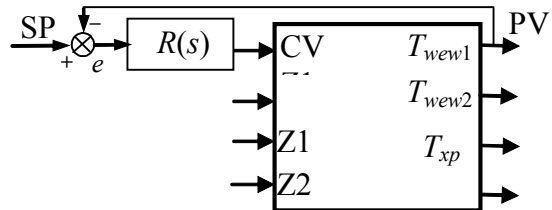
II.1.4.1. Metodologia badania UR

Podstawowe inżynierskie metody doboru nastaw opierają się na identyfikacji prostego modelu dynamiki (np. typu FOTD) i obliczeniu nastaw regulatora na podstawie parametrów tego modelu. Zakładamy, że działanie tak zaprojektowanego regulatora będzie sprawdzane:

- 1) na modelu (URM), tzn. czyli w układzie regulacji z modelem, który był podstawą projektowania - Rys. II.3,
- 2) na obiekcie (URO), czyli w układzie regulacji pracującym na obiekcie (na dokładniejszym modelu, który pełni rolę obiektu) - Rys. II.4.



Rys. II.3. URM



Rys. II.4. URO

Taki sposób prowadzenia badań odpowiada rzeczywistym warunkom pracy, ponieważ model używany do projektowania zawsze różni się od rzeczywistego obiektu. Nastaw są stosowane bez dostrajania czy korygowania, tak aby zapewnić powtarzalność badań.

Zakładamy, że model obiektu w URM, to transmitancje uzyskane prostymi metodami identyfikacji (p.I.1.5). Projekt układu regulacji opiera się na transmitancji pomiędzy zmienną procesową PV a zmienną sterującą CV, a podstawowe badanie własności układu regulacji opiera się na wyznaczeniu reakcji układu na zmianę wartości zadanej SP. Tak więc do projektowania i podstawowego badania układu regulacji na modelu wystarczy zidentyfikowanie jednej transmitancji PV/CV (na Rys. II.3 jest to H_{11}).

Nastawy wyznaczone na podstawie modelu (H_{11}) są najpierw testowane na układzie URM. Można się spodziewać, że dobór nastaw powinien zapewnić stabilność URM, a jakość URM będzie spełniać kryterium jakości, jakie zakłada zastosowana metoda doboru nastaw (będzie odpowiadać, temu co „obiecuje” zastosowana metoda). Następnie te same nastawy są stosowane na obiekcie (URO). Liczymy na to, że ten układ będzie także stabilny, ale jakość URO będzie inna (raczej gorsza niż URM). Ponadto jeśli obiekt jest nieliniowy, to jakość regulacji URO (a może nawet stabilność) będzie zależać od punktu pracy.

Zróżnicowanie metod doboru nastaw wynika z poszukiwania nastaw zapewniających określone własności (kryteria, wskaźniki jakości) układu regulacji¹. Jakość regulacji jest oceniana na podstawie wykresów czasowych – reakcji UR na skokową zmianę wartości zadanej lub zakłóceń. Zaleca się, aby przygotować schematy URM i URO do uruchamiania symulacji w stanie równowagi, to znaczy, że dopóki wartości wejściowe są stałe, to wartości wyjściowe też są stałe.

W badaniach analizowane są wykresy:

- zmiennej procesowej PV, która jest celem regulacji - do oceny jakości,
- zmiennej sterującej CV – do oceny realności (możliwości realizacji na obiekcie),
- błędzie regulacji e – do oceny jakości.

Podstawowe wskaźniki jakości, wyznaczone na podstawie tych wykresów:

- wskaźniki bezpośrednie, np. uchyb w stanie ustalonym (uchyb statyczny), czas regulacji, przeregulowanie,
- wskaźniki całkowite, np. całka z $|e|$, całka z e^2 .

¹ opis metod doboru nastaw w

Uwaga porównując wartości wskaźników jakości uzyskane z różnych źródeł lub za pomocą różnych narzędzi trzeba sprawdzić ich definicje (sposób liczenia), jednostki,

Dodatkowo można zastosować wskaźnik typu „licznik ciepła”, zrealizowany na podstawie pomiaru przepływu czynnika grzewczego f_{mx} , temperatury na wejściu T_{xz} i wyjściu T_{xp} odbiornika (grzejnika, instalacji):

$$q = c_p f_{mx} (T_{xz} - T_{xp}) \quad (II-4)$$

Inne ważne parametry opisujące układ regulacji (wyznaczana dla URM) to:

- zapas stabilności,
- wrażliwość na zmianę nastaw.

Metody projektowania UR nie uwzględniają ograniczeń jakie występują na każdym rzeczywistym obiekcie, np. ograniczenie zakresu i szybkości zmian zmiennej sterującej. Podstawowe badania UR są prowadzone w zakresie regulacji, czyli w takim punkcie (punktach) pracy i przy takich zakłóceniach, dla których ograniczenia nie mają wpływu. Wyznaczenie zakresu regulacji i wpływ ograniczeń stanowi oddzielny temat badań.

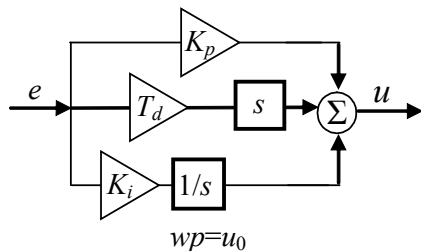
II.1.4.2. Realizacja badań na schematach Simulinka

Na schematach Simulinka można skonstruować i stosować różne struktury regulatora PID, w tym podstawowe, odpowiadające dwóm opisom matematycznym (II-1). Uniwersalny blok regulatora PID powinien zapewnić możliwość:

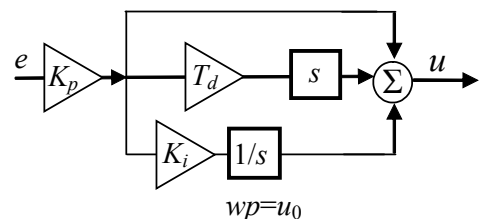
- wyboru typu regulatora (wybór członów),
- uruchamiania symulacji od dowolnego stanu równowagi (zadawanie wartości początkowej na wyjściu regulatora - u_0).

Funkcję regulatora PID można zrealizować za pomocą podstawowych bloków (Gain, Integrator, Derivative, Sum) na kilka sposobów. Zalecany sposób realizacji jest przedstawiony na Rys. II.5 i Rys. II.6, ze względu na:

- wygodne włączanie/wyłączanie członu całkującego - na schemacie używa się parametru K_i : gdy regulator zawiera człon całkujący to $K_i=1/T_i$, a gdy nie zawiera to $K_i=0$;
- zadawanie wartości początkowej na wyjściu regulatora - blok całkujący znajduje się za wzmacniaczami, więc wartość początkowa bloku całkującego jest jednocześnie początkową wartością wyjściową regulatora u_0 ;
- optymalizację obliczeń w sytuacji gdy człon całkujący/różniczkujący są wyłączone – bloki wzmacniające o wartości 0 zerują sygnał przetwarzany przez blok całkujący/różniczkujący.

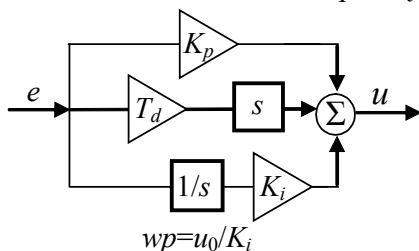


Rys. II.5. Zalecana realizacja PID-IND

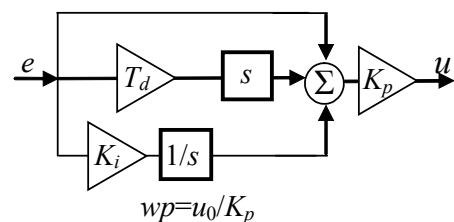


Rys. II.6. Zalecana realizacja PID-ISA

Alternatywne realizacje PID (Rys. II.7, Rys. II.8) realizują taki sam algorytm PID, jednak wymagają odpowiedniego zadawania warunków początkowych (wp) tak, aby uzyskać na wyjściu regulatora wartość u_0 w chwili początkowej.



Rys. II.7. Alternatywna realizacja PID-IND

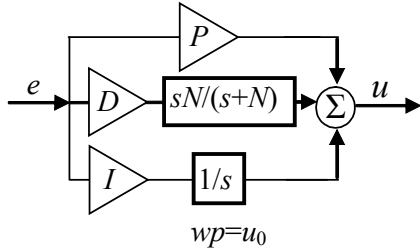


Rys. II.8. Alternatywna realizacja PID-ISA

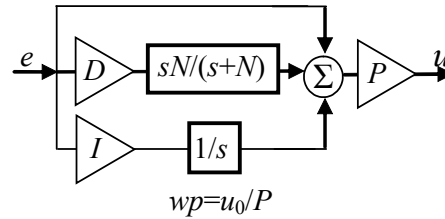
W bibliotece Simulink dostępny jest blok PID Controller, który umożliwia wybranie struktury PID Parallel lub PID Ideal:

PID Parallel = PID-IND	PID Ideal = PID-ISA	(II-5)
$R_{par} = P + I \frac{1}{s} + D \frac{Ns}{s+N}$	$R_{id} = P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{Ns}{s+N} \right)$	
$R_{IND} = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s$	$R_{ISA} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$	

Realizacje tych wariantów przedstawiono na Rys. II.9 i Rys. II.10.



Rys. II.9. Realizacja PD Parallel



Rys. II.10. Realizacja PID Ideal

– Człon różniczkujący $\frac{Ds}{1/s + 1} = D \frac{Ns}{s+N} = D \frac{N}{s+N} = D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$

– Różniczkowanie przez całkowanie

– Odczytywanie wskaźników przez interfejs PID Controller (PID Tuner) – tylko dla skoku SP, tylko dla nastaw dobranych przez PID Tuner???

Zastosowanie Jeśli projektowanie i badanie układu regulacji odbywa się na tym samym modelu można to są to warunki teoretyczne.

II.1.4.3. Realizacja badań za pomocą funkcji Control (w skrypcie)

- Funkcje do definiowania modeli i UR.
- Generowanie wykresów.
- Odczytywanie wskaźników

Uwaga: Opis badań nie zawiera opisu poszczególnych metod doboru nastaw, wyznaczania wskaźników jakości (przedmiot innego opracowania – obecnie na slajdach do wykładu)

II.2. Odbiornik + regulacja T_{wew}

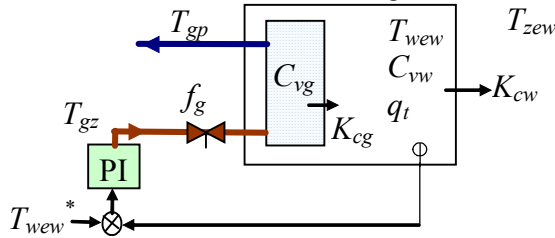
Odbiornikiem jest model pojedynczego pomieszczenia z grzejnikiem c.o., który może reprezentować pomieszczenie, mieszkanie, budynek. Źródło ciepła jest reprezentowane przez zmienne wejściowe T_{gz} i f_g , które mogą być wykorzystane do sterowania obiektem.

II.2.1 Regulacja jakościowa (CV= T_{gz})

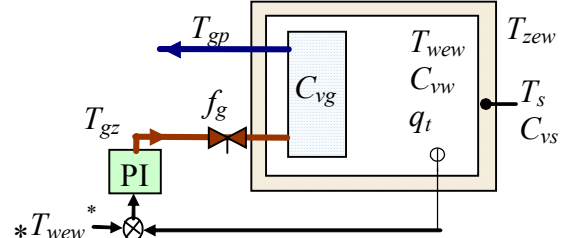
Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}) za pomocą regulacji jakościowej (sterowania T_{gz}).

Regulacja bezpośrednio na podstawie pomiaru T_{wew} .

Założenia: PV= T_{wew} , CV= T_{gz} , regulator PI



Rys. II.11. Pomieszczenie (2), PI T_{gz}



Rys. II.12. Pomieszczenie (3), PI T_{gz}

Składniki modelu Rys. II.11: odbiornik (I-4), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.12: odbiornik (I-5), regulator – wzory analogiczne

4) Model podstawowy

$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{wew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ T_{gz} = K_P (T_{wew}^* - T_{wew}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew}) dt \end{cases} \quad (II-6)$$

Wy: T_{wew} , T_{gp} , T_{gz} , We: T_{wew}^* , T_{zew} , f_{mg} , q_t

Równania statyczne:

$$c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) = K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}), \quad T_{wew} = T_{wew}^*$$

Punkt równowagi:

$$T_{wew} = T_{wew}^*, \quad T_{gp} = \frac{(K_{cg} + K_{cw}) T_{wew}^* - K_{cw} T_{zew}}{K_{cg}}, \quad T_{gz} = \frac{(K_{cg} + c_{pw} f_{mg}) T_{gp} - K_{cg} T_{wew}^*}{c_{pw} f_{mg}}$$

5) Model liniowy obiektu (dla stałego przepływu f_{mg}) + regulator

Równania statyczne dla stanu równowagi ($T_{wew} = T_{wew}^*$)

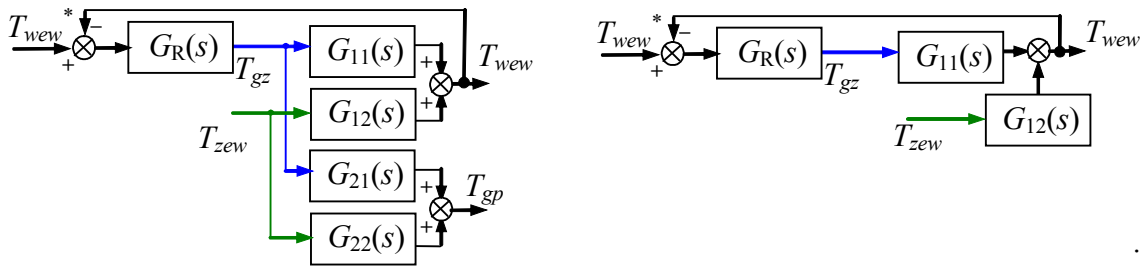
$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{cg} - K_{cw} & K_{cg} & 0 \\ K_{cg} & -c_{pw} \rho_w f_g - K_{cg} & c_{pw} \rho_w f_g \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{wew} \\ T_{gp} \\ T_{gz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_{cw} \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{wew}^* \\ T_{zew} \end{bmatrix}$$

Punkt równowagi: $\mathbf{x} = -\mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{u}$

6) Schemat układu regulacji

a) na bazie transmitancji obiektu ($G_{11} \div G_{22}$) – patrz p. I.2.2

$\begin{aligned} T_{wew} &= G_{11} T_{gz} + G_{12} T_{zew} \\ T_{gp} &= G_{21} T_{gz} + G_{22} T_{zew} \\ T_{gz} &= G_R (T_{wew}^* - T_{wew}) \end{aligned}$	$G_R = K_P + \frac{K_I}{s}$
--	-----------------------------

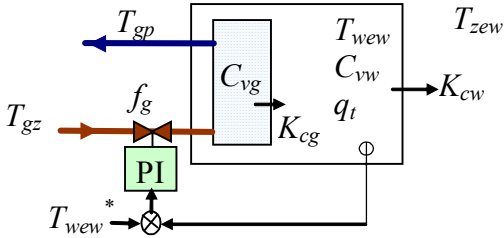


Rys. II.13. Schemat UR na bazie transmitancji

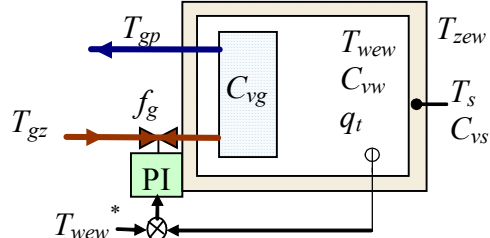
II.2.2 Regulacja ilościowa (fg)

Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}) za pomocą regulacji ilościowej (sterowania f_{mg}).
Regulacja bezpośrednio na podstawie pomiaru T_{wew} .

Założenia: $PV = T_{wew}$, $CV = f_{mg}$, regulator PI



Rys. II.14. Pomieszczenie (2), PI f_g



Rys. II.15. Pomieszczenie (3), PI f_g

Składniki modelu Rys. II.14: odbiornik (I-4), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.15: odbiornik (I-5), regulator – wzory analogiczne

1) Model podstawowy

$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{wew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ f_{mg} = K_P (T_{wew}^* - T_{wew}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew}) dt \end{cases} \quad (II-7)$$

Wy: T_{wew}, T_{gp}, f_{mg}

We: $T_{wew}^*, T_{zew}, T_{gz}, q_t$

Równania statyczne:

$$c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) = K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}), \quad T_{wew} = T_{wew}^*$$

Punkt równowagi:

$$T_{wew} = T_{wew}^*, \quad T_{gp} = , \quad f_{mg} =$$

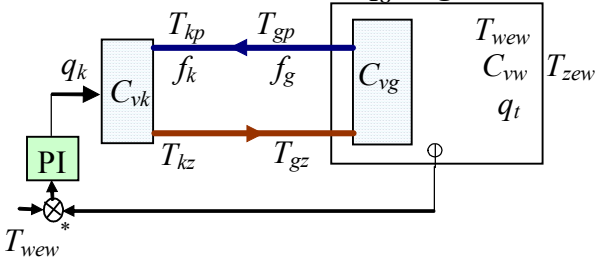
II.3. Odbiornik i kocioł + regulacja T_{wew} (CV= q_k)

Odbiornikiem jest model pojedynczego pomieszczenia z grzejnikiem c.o., który może reprezentować pomieszczenie, mieszkanie, budynek. Źródłem ciepła jest kocioł wydajnością g_k . Zmiana wydajności g_k jest wykorzystana do sterowania obiektem.

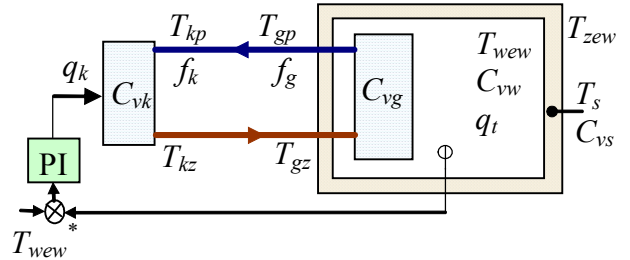
II.3.1 Bezpośrednia¹ regulacja T_{wew}

Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}) za pomocą sterowania wydajnością kotła g_k . Regulacja bezpośrednio na podstawie pomiaru T_{wew} .

Założenia: PV= T_{wew} , CV= q_k , regulator PI



Rys. II.16. Pomieszczenie (2) i kocioł, PI $T_{wew}(q_k)$



Rys. II.17. Pomieszczenie (3) i kocioł, PI $T_{wew}(q_k)$

Składniki modelu Rys. II.16: odbiornik z kotłem (I-19), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.17: odbiornik z kotłem (I-21), regulator – wzory analogiczne

1) Model podstawowy

$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{wew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ C_{vk} \dot{T}_{kz} = q_k - c_{pw} f_{mk} (T_{kz} - T_{kp}) \\ q_k = K_P (T_{wew}^* - T_{wew}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew}) dt \end{cases} \quad (II-8)$$

oraz $f_{km}=f_{mg}$, $T_{gz}(t)=T_{kz}(t-T_o)$, $T_{kp}(t)=T_{gp}(t-T_o)$

Wy: T_{gp} , T_{wew} , T_{kz} , q_k ,

We: T_{wew}^* , T_{zew} , f_{mg} , q_t

Równania statyczne:

$$\begin{cases} 0 = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) \\ 0 = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ 0 = q_k - c_{pw} f_{mk} (T_{kz} - T_{kp}) \\ T_{wew} = T_{wew}^* \end{cases}$$

oraz $f_{km}=f_{mg}$, $T_{kz}=T_{gz}$, $T_{kp}=T_{gp}$,

stąd: $c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) = K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) = q_k$, $T_{wew} = T_{wew}^*$

Punkt równowagi:

$$T_{wew} = T_{wew}^*, \quad q_k = K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}), \quad T_{gp} = \frac{q_k}{K_{cg}} + T_{wew}, \quad T_{gz} = \frac{q_k}{c_{pw} f_{mg}} + T_{gp}$$

2) Równania stanu obiektu ($\dot{x} = Ax + Bu$) + regulator

Równania statyczne dla stanu równowagi ($T_{wew} = T_{wew}^*$)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_{cg} - K_{cw} & K_{cg} & 0 & 0 \\ K_{cg} & -c_{pw} f_{mg} - K_{cg} & c_{pw} f_{mg} & 0 \\ 0 & c_{pw} f_{mg} & -c_{pw} f_{mg} & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{wew} \\ T_{gp} \\ T_{gz} \\ q_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_{cw} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{zew} \\ T_{wew}^* \end{bmatrix}$$

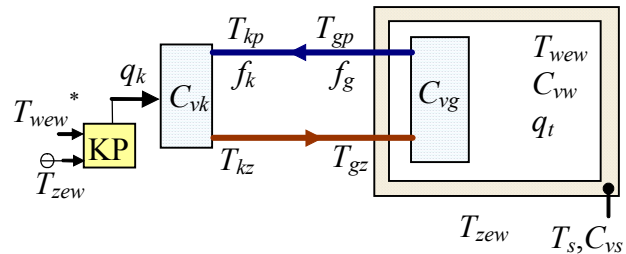
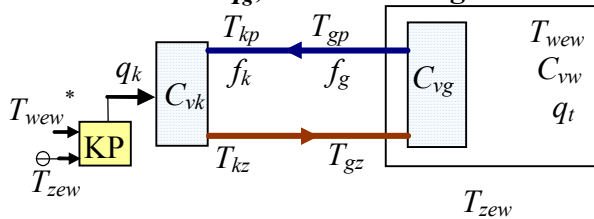
Punkt równowagi: $x = -A^{-1}Bu$

¹ Uwaga nie mylić z regulatorami bezpośredniego działania (w których do uruchomienia elementu wykonawczego wykorzystywana jest energia pobierana bezpośrednio z regulowanego procesu)

II.3.2 Sterowanie pogodowe w układzie otwartym

Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}) za pomocą sterowania wydajnością kotła g_k zgodnie z zapotrzebowaniem wyznaczonym podstawie krzywych pogodowych (KP).

Założenia: $CV=q_g$, sterowanie wg KP



Rys. II.18. Pomieszczenie (2) i kocioł, sterowanie

Rys. II.19. Pomieszczenie (3) i kocioł, sterowanie

Składniki modelu Rys. II.18: odbiornik z kotłem (I-19), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

Składniki modelu Rys. II.19: odbiornik z kotłem (I-21), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

Krzywe pogodowe (KP) pozwalają obliczyć zapotrzebowanie na ciepło w zależności od temperatury zewnętrznej i zadanej temperatury wewnętrznej. Są one wyznaczane na podstawie równań bilansowych, które opisują cały układ odbiorników ciepła (budynek, miasto) tak jakby jedno wielkie pomieszczenie z jednym wielkim grzejnikiem, co odpowiada to zastosowaniu modelu (I-4). W dowolnym stanie równowagi spełniony jest więc układ równań:

$$c_{pw}f_{mg}(T_{gz} - T_{gp}) = K_{cg}(T_{gp} - T_{wew}) = K_{cw}(T_{wew} - T_{zew}) \quad (II-9)$$

a w warunkach nominalnych:

$$c_{pw}f_{mgN}(T_{gzN} - T_{gpN}) = K_{cg}(T_{gpN} - T_{wewN}) = K_{cw}(T_{wewN} - T_{zewN}) \quad (II-10)$$

Dzieląc stronami równania (II-9) i (II-10) otrzymujemy następujący układ równań:

$$\frac{c_{pw}f_{mg}(T_{gz} - T_{gp})}{c_{pw}f_{mgN}(T_{gzN} - T_{gpN})} = \frac{K_{cg}(T_{gp} - T_{wew})}{K_{cg}(T_{gpN} - T_{wewN})} = \frac{K_{cw}(T_{wew} - T_{zew})}{K_{cw}(T_{wewN} - T_{zewN})}, \quad (II-11)$$

który można uprościć, przy założeniu, że przepływ jest zawsze nominalny ($f_{mg} = f_{mgN}$):

$$\frac{T_{gz} - T_{gp}}{T_{gzN} - T_{gpN}} = \frac{T_{gp} - T_{wew}}{T_{gpN} - T_{wewN}} = \frac{T_{wew} - T_{zew}}{T_{wewN} - T_{zewN}} \quad (II-12)$$

Na podstawie (II-12) można wyznaczyć tak zwane **charakterystyki (krzywe) pogodowe**:

$$T_{gz} = a_z T_{wew} - b_z T_{zew}, \quad T_{gp} = a_p T_{wew} - b_p T_{zew}, \quad (II-13)$$

gdzie współczynniki a_z, b_z, a_p, b_p zależą tylko od wartości nominalnych:

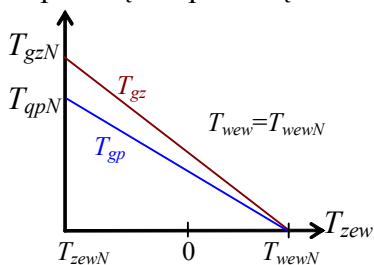
$$a_z = \frac{T_{gzN} - T_{zewN}}{T_{wewN} - T_{zewN}}, \quad b_z = \frac{T_{gzN} - T_{wewN}}{T_{wewN} - T_{zewN}}, \quad a_p = \frac{T_{gpN} - T_{zewN}}{T_{wewN} - T_{zewN}}, \quad b_p = \frac{T_{gpN} - T_{wewN}}{T_{wewN} - T_{zewN}}.$$

Krzywe pogodowe pozwalają obliczać wartości temperatury zasilania T_{gz} i powrotu T_{gp} , jakie zapewnią temperaturę wewnętrzną T_{wew} przy określonej temperaturze zewnętrznej T_{zew} (Rys. II.20).

Z kolei znając temperatury T_{gz} i powrotu T_{gp} można obliczyć zapotrzebowanie na ciepło:

$$q_k = c_{pw}f_{mgN}(T_{gz} - T_{gp}) \quad (II-14)$$

i w ten sposób ustalić (zadać) wydajność kotła lub wymiennika ciepła.



Rys. II.20. Krzywe pogodowe (KP)

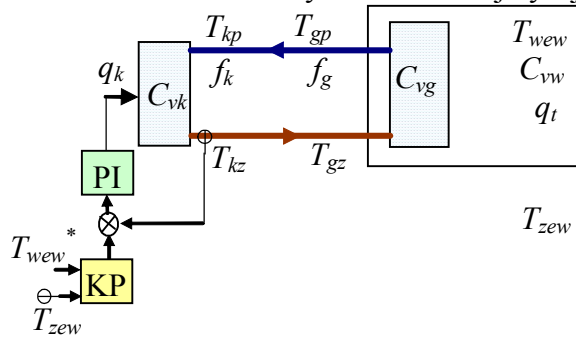
II.3.3 Regulacja pogodowa (jakościowa, pośrednia¹)

Regulacja pogodowa jako przykład regulacji pośredniej

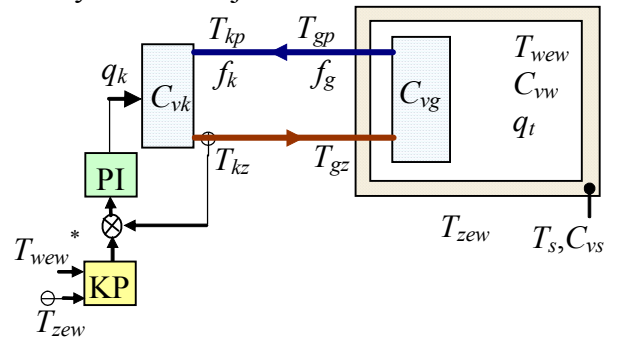
II.3.3.1. Regulacja pogodowa T_{kz}

Założenia: $PV=T_{kz}$, $CV=q_k$, regulator PI na kotle

Kocioł może wytwarzać co najwyżej 110% mocy nominalnej.



Rys. II.21. Pomieszczenie (2) i kocioł, PI $T_{kz}(q_k)$



Rys. II.22. Pomieszczenie (3) i kocioł, PI $T_{kz}(q_k)$

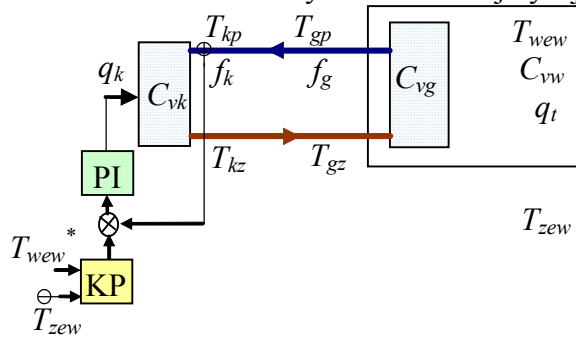
Składniki modelu Rys. II.21: odbiornik z kotłem (I-19), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

Składniki modelu Rys. II.22: odbiornik z kotłem (I-21), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

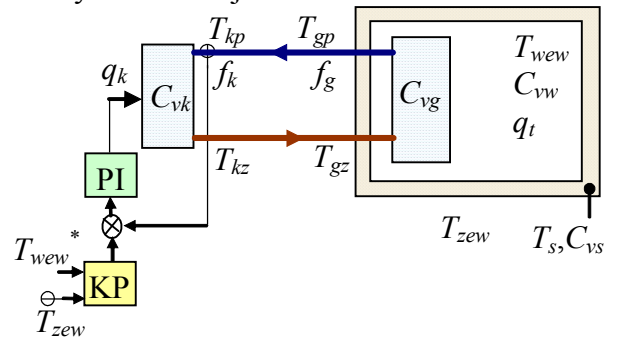
II.3.3.2. Regulacja pogodowa T_{kp}

Założenia: $PV=T_{kp}$, $CV=q_k$, regulator PI na kotle.

Kocioł może wytwarzać co najwyżej 110% mocy nominalnej.



Rys. II.23. Pomieszczenie (2) i kocioł, PI $T_{kp}(q_k)$



Rys. II.24. Pomieszczenie (3) i kocioł, PI $T_{kp}(q_k)$

Składniki modelu Rys. II.23: odbiornik z kotłem (I-19), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

Składniki model uRys. II.24: odbiornik z kotłem (I-21), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

¹ Uwaga nie mylić z regulatorami pośrednimi, które do uruchomienia elementu wykonawczego wykorzystują energię pomocniczą (np. z sieci elektrycznej, z kompresora lub pompy hydraulicznej)

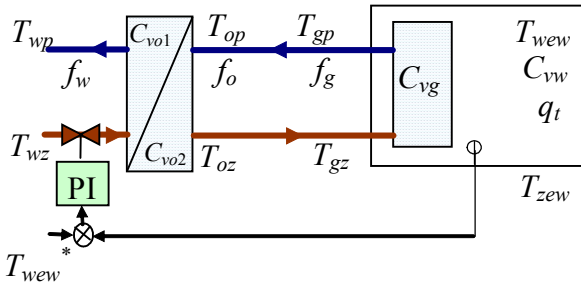
II.4. Odbiornik i wymiennik + regulacja T_{wew} ($CV=f_w$)

Odbiornikiem jest model pojedynczego pomieszczenia z grzejnikiem c.o., który może reprezentować pomieszczenie, mieszkanie, budynek. Źródłem ciepła jest wymiennik zasilany wodą o temperaturze T_{wz} . Zmianę wydajności wymiennika można uzyskać za pomocą zmiany przepływu po stronie zasilania (sieci) f_w , co jest wykorzystane do sterowania obiektem.

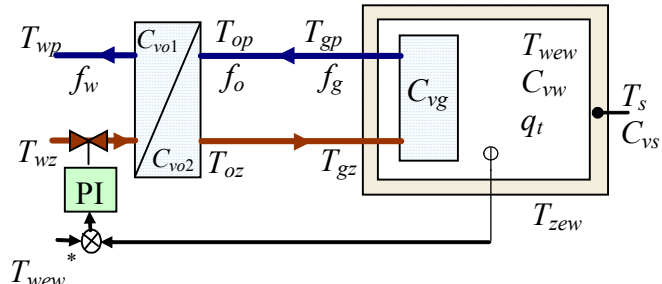
II.4.1 Bezpośrednia¹ regulacja T_{wew}

Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}), za pomocą sterowania przepływem f_w wymiennika

Założenia: $PV=T_{wew}$, $CV=f_w$, **regulator PI**



Rys. II.25. Pomieszczenie (2) i wymiennik, PI $T_{wew}(f_w)$



Rys. II.26. Pomieszczenie (3) i wymiennik, PI $T_{wew}(f_w)$

Składniki modelu Rys. II.25: odbiornik z wymiennikiem (I-23), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.26: odbiornik z wymiennikiem (I-25), regulator – wzory analogiczne

1) Model podstawowy

$$\begin{cases} C_{vw} \dot{T}_{wew} = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) + q_t & \text{(II-15)} \\ C_{vg} \dot{T}_{gp} = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ C_{vo2} \dot{T}_{oz} = K_{co} (T_{wp} - T_{oz}) - c_{pw} f_{mo} (T_{oz} - T_{op}) \\ C_{vo1} \dot{T}_{wp} = c_{pw} f_{mw} (T_{wz} - T_{wp}) - K_{co} (T_{wp} - T_{oz}) \\ f_w = K_P (T_{wew}^* - T_{wew}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew}) dt \end{cases}$$

oraz $f_{om}=f_{mg}$, $T_{gz}(t)=T_{oz}(t-T_o)$, $T_{op}(t)=T_{gp}(t-T_o)$

wy: T_{wew} , T_{gp} , T_{oz} , T_{wp} , f_w , we: T_{wew}^* , T_{wz} , T_{zew} , f_{mg} , q_t

Równania statyczne:

$$\begin{cases} 0 = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) - K_{cw} (T_{wew} - T_{zew}) + q_t \\ 0 = c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) - K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) \\ 0 = K_{co} (T_{wp} - T_{oz}) - c_{pw} f_{mo} (T_{oz} - T_{op}) \\ 0 = c_{pw} f_{mw} (T_{wz} - T_{wp}) - K_{co} (T_{wp} - T_{oz}) \\ T_{wew} = T_{wew}^* \end{cases}$$

oraz $f_{om}=f_{mg}$, $T_{oz}=T_{gz}$, $T_{op}=T_{gp}$,

$$c_{pw} f_{mg} (T_{gz} - T_{gp}) = K_{cg} (T_{gp} - T_{wew}) = K_{cw} (T_{wew} - T_{zew})$$

$$c_{pw} f_{mo} (T_{oz} - T_{op}) = K_{co} (T_{wp} - T_{oz}) = c_{pw} f_{mw} (T_{wz} - T_{wp}), T_{wew} = T_{wew}^*$$

Punkt równowagi: $T_{wew} = T_{wew}^*$, T_{gp} , T_{oz} , T_{wp} , f_w ,

2) Równania stanu obiektu ($\dot{x} = Ax + Bu$) + regulator

Równania statyczne dla stanu równowagi ($T_{wew} = T_{wew}^*$)

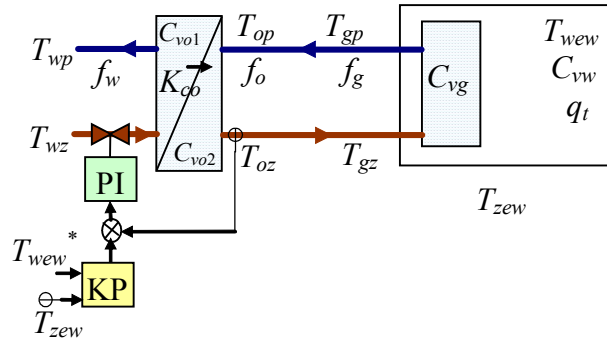
¹ Uwaga nie mylić z regulatorami bezpośredniego działania (gdy do uruchomienia elementu wykonawczego jest wykorzystywana energia pobierana bezpośrednio z regulowanego procesu)

II.4.2 Regulacja pogodowa (jakościowa, pośrednia)

Regulacja pogodowa jako przykład regulacji pośredniej

II.4.2.1. Regulacja pogodowa T_{kz}

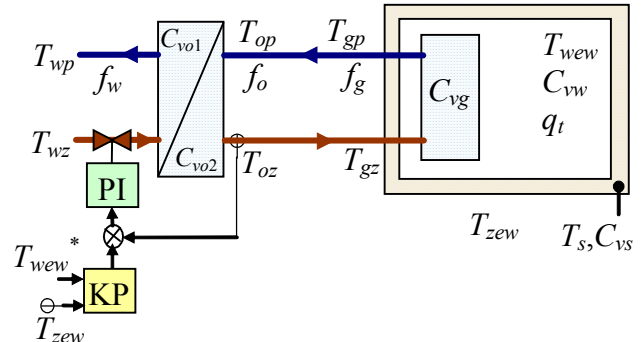
Założenia: $PV=T_{oz}$, $CV=f_w$, regulator PI na wymienniku



Rys. II.27. Pomieszczenie (2) i wymiennik, PI $T_{kz}(f_w)$

Składniki modelu Rys. II.27: odbiornik z wymiennikiem (I-23), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

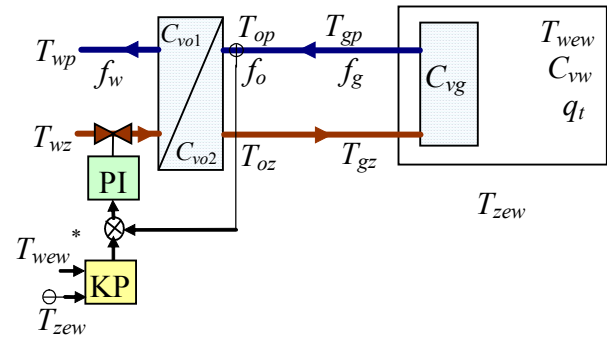
Składniki modelu Rys. II.28: odbiornik z wymiennikiem (I-25), regulator, krzywe pogodowe (II-13).



Rys. II.28. Pomieszczenie (3) i wymiennik, PI $T_{kz}(f_w)$

II.4.2.2. Regulacja pogodowa T_{kp}

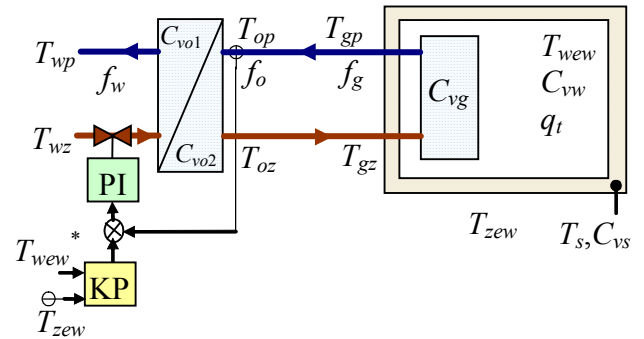
Założenia: $PV=T_{op}$, $CV=f_w$, regulator PI na wymienniku



Rys. II.29. Pomieszczenie (2) i wymiennik, PI $T_{op}(f_w)$

Składniki modelu Rys. II.29: odbiornik z wymiennikiem (I-23), regulator, krzywe pogodowe (II-13).

Składniki modelu Rys. II.30: odbiornik z wymiennikiem (I-25), regulator, krzywe pogodowe (II-13).



Rys. II.30. Pomieszczenie (3) i wymiennik, PI $T_{op}(f_w)$

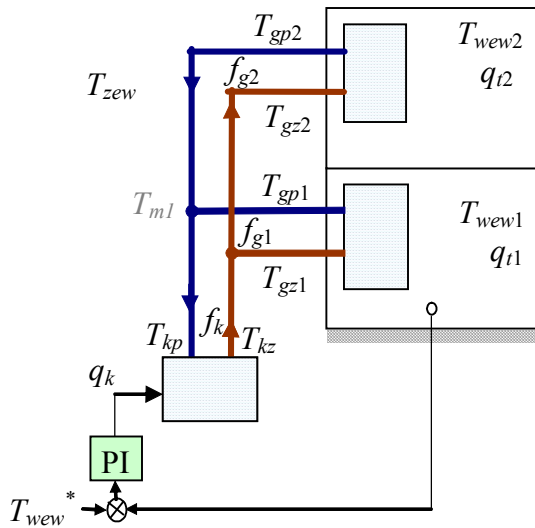
II.5. Budynek z kotłem + regulacja centralna

Budynek stanowią dwa odbiorniki ciepła. Źródłem ciepła jest kocioł wydajnością g_k . Zmiana wydajności g_k jest wykorzystana do sterowania obiektem

II.5.1 Bezpośrednia regulacja wg reprezentatywnego pomieszczenia

Układ regulacji centralnej - bezpośrednia regulacja T_{wew} według reprezentatywnego pomieszczenia

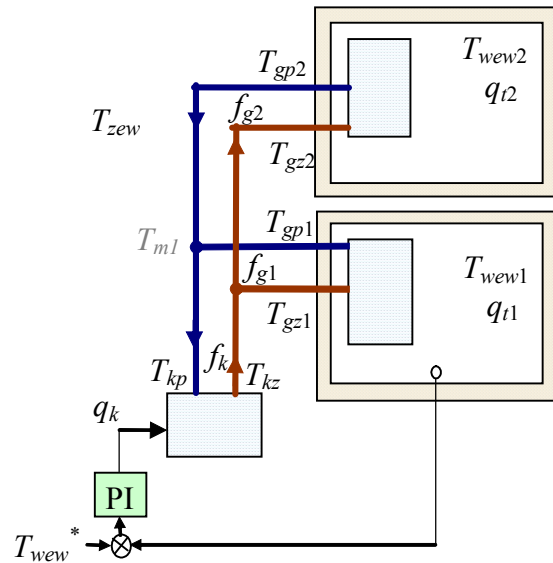
Założenia: $PV=T_{wew1}$ lub T_{wew2} , $CV=q_k$, regulator PI



Rys. II.31. Budynek (2) i kocioł, PI $T_{wew1}(q_k)$

Składniki modelu Rys. II.31: budynek z kotłem (I-27), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.32: budynek z kotłem (I-29), regulator – wzory analogiczne



Rys. II.32. Budynek (2x3) i kocioł, PI $T_{wew1}(q_k)$

1) Model podstawowy

model obiektu oraz $q_k = K_P(T_{wew}^* - T_{wew1}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew1}) dt$ (II-16)

wy: $T_{wew1}, T_{gp1}, T_{wew2}, T_{gp2}, T_{kz}, q_k$, we: $T_{wew}^*, T_{zew}, f_{mg1}, f_{mg2}, q_{t1}, q_{t2}$

Równania statyczne: równania statyczne obiektu oraz $T_{wew1} = T_{wew}^*$

Punkt równowagi: $T_{wew1} = T_{wew}^*, q_k = \dots, \dots$

2) Równania stanu obiektu ($\dot{x} = Ax + Bu$) + regulator

Równania statyczne dla stanu równowagi ($T_{wew} = T_{wew}^*$)

$$0 = \mathbf{A} \begin{bmatrix} T_{wew1} & T_{gp1} & T_{wew2} & T_{gp2} & T_{kz} & q_k \end{bmatrix}^T + \mathbf{B} \begin{bmatrix} T_{wew}^* \\ T_{zew} \end{bmatrix}$$

Punkt równowagi: $\mathbf{x} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{u}$

II.5.2 Sterowanie pogodowe w układzie otwartym

Cel: Stabilizacja temperatury wewnątrz (T_{wew}) za pomocą sterowania wydajnością kotła g_k zgodnie z zapotrzebowaniem wyznaczonym podstawie krzywych pogodowych (KP).

Analogicznie jak w p. II.3.2

II.5.3 Regulacja pogodowa (jakościowa, pośrednia)

II.5.3.1. Regulacja pogodowa T_{kz}

Założenia: $PV=T_{kz}$, $CV=q_k$, regulator PI na kotłowni

Analogicznie jak w p. II.3.3.1

II.5.3.2. Regulacja pogodowa T_{kp}

Założenia: $PV=T_{kp}$, $CV=q_k$, regulator PI w kotłowni

Analogicznie jak w p. II.3.3.2

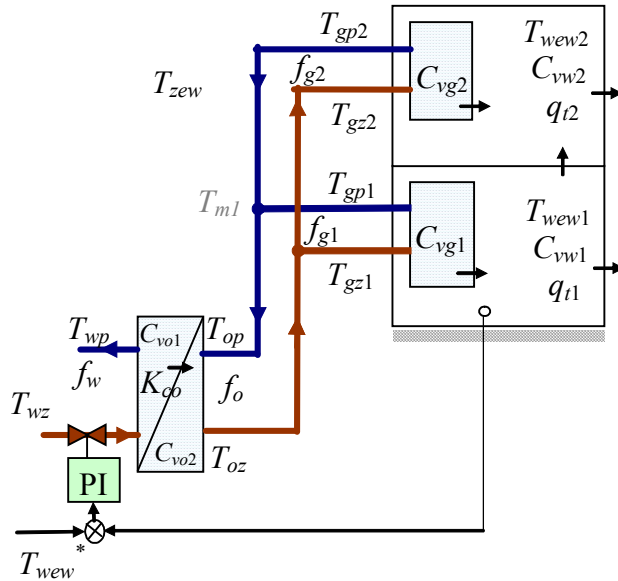
II.6. Budynek z wymiennikiem + regulacja centralna

Budynek stanowią dwa odbiorniki ciepła. Źródłem ciepła jest wymiennik zasilany wodą o temperaturze T_{wz} . Zmianę wydajności wymiennika można uzyskać za pomocą zmiany przepływu po stronie zasilania (sieci) f_w , co jest wykorzystane do sterowania obiektem.

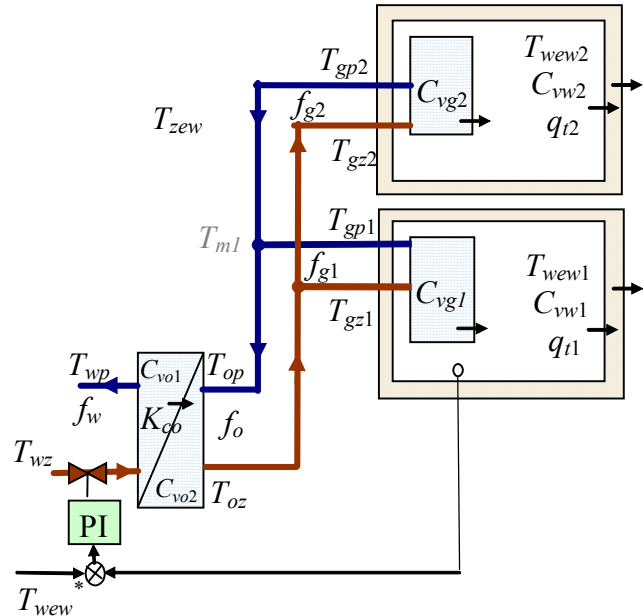
II.6.1 Bezpośrednia regulacja wg reprezentatywnego pomieszczenia

Układ regulacji centralnej - bezpośrednia regulacja T_{wew} według reprezentatywnego pomieszczenia

Założenia: $PV=T_{wew1}$ lub T_{wew2} , $CV=f_w$, regulator PI



Rys. II.33. Budynek (2x2) i wymiennik, PI $T_{wew1}(f_w)$



Rys. II.34. Budynek (2x3) i wymiennik, PI $T_{wew1}(f_w)$

Składniki modelu Rys. II.33: budynek z wymiennikiem (I-32), regulator – wzory poniżej.

Składniki modelu Rys. II.34: budynek z wymiennikiem (I-34), regulator – wzory analogiczne

1) Model podstawowy

$$\text{model obiektu oraz } f_w = K_P (T_{wew}^* - T_{wew1}) + K_I \int (T_{wew}^* - T_{wew1}) dt \quad (\text{II-17})$$

$$\text{WY: } T_{wew1}, T_{gp1}, T_{wew2}, T_{gp2}, T_{kz}, f_w \quad \text{we: } T_{wew}^*, T_{wz}, T_{zew}, f_{mg1}, f_{mg2}, q_{t1}, q_{t2}$$

Równania statyczne: równania statyczne obiektu oraz $T_{wew1} = T_{wew}^*$

Punkt równowagi: $T_{wew1} = T_{wew}^*$, $q_k = \dots$

2) Równania stanu obiektu ($\dot{x} = Ax + Bu$) + regulator

Równania statyczne dla stanu równowagi ($T_{wew} = T_{wew}^*$)

Punkt równowagi: $x = -A^{-1}Bu$

II.6.2 Regulacja pogodowa (jakościowa, pośrednia)

II.6.2.1 Regulacja pogodowa T_{kz}

Założenia: $PV=T_{oz}$, $CV=f_w$, regulator PI na węźle ciepłowniczym

Analogicznie jak w p. II.4.2.1

II.6.2.2 Regulacja pogodowa T_{kp}

Założenia: $PV=T_{op}$, $CV=f_w$, regulator PI na węźle ciepłowniczym

Analogicznie jak w p. II.4.2.2

II.7. Przykładowy program badań UR

II.7.1 Program badań

Do wyboru:

- obiekt - budynek z kotłem, budynek z wymiennikiem,
- model obiektu – pojedynczy odbiornik (różna dokładność), kilka odbiorników (różna dokładność, sprzężone/niesprzężone),
- układ regulacji – regulacja bezpośrednia, regulacja pośrednia (pogodowa).

W każdym przypadku celem regulacji jest stabilizowanie temperatury wewnętrznej u odbiorców (T_{wew}). Cel ten realizuje jeden układ regulacji centralnej.

Układy regulacji są realizowane i badane na modelu (URM) i na obiekcie (URO). Badania na modelu można ograniczyć do transmitancji, która jest wykorzystywana do projektowania (PV/CV). Dla obiektów z wieloma pomieszczeniami badanie reakcji zmiennej T_{wewX} dla URM oznacza rejestrowanie zmiennej PV (T_{wew1}), natomiast dla URO oznacza rejestrowanie i porównywanie T_{wew} we wszystkich pomieszczeniach. Zawsze rejestrowana jest też zmienna sterująca CV, która pozwala ocenić możliwości realizacji regulacji na obiekcie.

Dla każdego przypadku (obiekt, model, układ regulacji):

- podstawowa metoda doboru nastaw (w opisie jest to metoda Zieglera-Nicholsa) i podstawowa ocena jakości (błąd ustalony, czas regulacji, przeregulowanie),
- porównanie jakości na modelu (URM) i na obiekcie (URO),
- porównanie różnych metod doboru nastaw (URM, URO),
- porównanie reakcji na różne zakłócenia, w różnych punktach pracy (URO),
- zastosowanie wybranych metod optymalizacji jakości,
- badanie wpływu ograniczeń (nieliniowe bloki regulatora).

Badania porównawcze

- porównanie własności regulacji bezpośredniej i pośredniej,
- porównanie takiej samej regulacji na różnych modelach tego samego obiektu (wpływ dokładności modelu).

II.7.2 Regulacja bezpośrednia PI - nastawy Zieglera-Nicholsa (Z-N)

Badany układ regulacji bezpośredniej jest układem regulacji centralnej T_{wew} , który steruje wydajnością źródła ciepła na podstawie pomiaru temperatury wewnętrznej reprezentatywnego pomieszczenia (p. II.2, II.3.1, II.4.1, II.5.1, II.6.1). Układy regulacji są projektowane na podstawie modelu, a następnie realizowane i badane na modelu (URM) i na obiekcie (URO).

1° Regulacja: PV= T_{wew1} , CV bez ograniczeń

- Przygotować własny blok regulatora PI o strukturze IND,
- Zaimplementować układ regulacji PI na modelu (URM) i na obiekcie (URO),
- Dobór nastaw Zieglera-Nicholsa (Z-N) na podstawie modelu (FOTD),
 - wyznaczyć i zweryfikować model typu FOTD - transmitancje $H(s)$ (p. I.1.5),
 - wyznaczyć nastawy Z-N (Zał.B.1) i przeliczyć na nastawy PID-IND,
- Wpływ dokładności wyznaczenia parametrów modelu na wartości nastaw ([tabela](#))

Wariant modelu	transmitancję $H(s)$	nastawy Z-N	nastawy PID-IND
- stosowany w badaniach			
- inne			

2° Porównanie działania URM i URO w wybranym punkcie pracy (np. w warunkach nominalnych)

a) Zbadać reakcję na skok SP,

- przedstawić wykresy T_{wewX} i CV
- zastosować podstawowe wskaźniki jakości – uchyb ustalony, czas regulacji, przeregulowanie (oznaczyć wskaźniki na wykresie zmiennej procesowej PV),

b) Analiza - porównać wskaźniki jakości ([tabela](#))

	uchyb ustalony	czas regulacji	przeregulowanie
URM			
URO			

- Czy zostało spełnione kryterium QDR (ang. Quarter-Decay Ratio¹)?
- Czy przebieg wielkości sterującej (CV) jest realny?
- Czy jakość regulacji zmienia się po przeniesieniu regulatora na obiekt?

3° Zastosowanie bloku regulatora PID Controller z Simulinka w układzie URM i URO

a) Zastąpić własny regulator PI blokiem PID Controller

- zachować strukturę i nastawy PID-IND,
- sprawdzić, że zmiana bloku regulatora nie wpływa na wyniki symulacji,
- odczytać wskaźniki jakie udostępni interfejs PID Tuner.

b) Analiza

- porównać wskaźniki jakości wyznaczone w punkcie 2° ze wskaźnikami jakie udostępni interfejs PID Tuner - typ wskaźników i wartości (tabela) (Zał.C.1).

Jakie wskaźniki udostępni PID Controller? Jak są one zdefiniowane?

II.7.3 Regulacja bezpośrednia PI – ocena jakości regulacji

Badania przeprowadzić na URO z zastosowaniem bloku PID Controller i nastaw Z-N.

1° Porównanie reakcji URO na różne zakłócenia w wybranym punkcie pracy (np. nominalnym)

a) Zbadać reakcje na skok SP, Z1, Z2,

- przedstawić wykresy T_{wewX} , uchyb e ,
- wyznaczyć podstawowe wskaźniki jakości, kryteria całkowite, licznik ciepła (tabela)

	wsk.podstawowe	wsk.całkowe	licznik ciepła
skok SP			
skok Z1			
skok Z2			

b) Analiza - porównać wykresy i wskaźniki.

Jak porównać reakcje układu na różne zakłócenia (różne wejścia, różne typy wielkości fizycznych, różne jednostki)?

Czy wskaźniki jakości wyznaczone na podstawie wykresu PV i uchybu e są takie same?

Czy nastawy dobrane na podstawie reakcji na skok na jednym wejściu, będą równie dobre przy analogicznych zakłóceniach na innym wejściu?

2° Porównanie reakcje URO w różnych punktach pracy

a) Zbadać i porównać reakcje na skok SP w różnych punktach pracy:

- przedstawić wykresy T_{wewX}
- wyznaczyć podstawowe wskaźniki jakości (tabela)

	wsk.podstawowe		
Punkt nominalny			
Inne ...			

b) Analiza - porównać wykresy i wskaźniki.

Czy badany UR jest liniowy czy nieliniowy? Czy nastawy regulatora wyznaczone w jednym punkcie pracy będą równie dobre w innym punkcie pracy?

Czy te własności dotyczą również reakcji na zakłócenia Z1 i Z2?

II.7.4 Regulacja bezpośrednia PI – różne metody doboru nastaw

Zastosowanie i porównanie kilku metod doboru nastaw w centralnej układzie regulacji T_{wew} .

1° Regulacja: $PV=T_{wew1}$, CV bez ograniczeń. Zastosować różne metody doboru nastaw:

- Z-N na podstawie modelu FOTD,
- inne inżynierskie metody doboru nastaw na podstawie tego samego modelu FOTD (Zał.B.1),
- PID Tuner (blok PID Controller) w URM.

Uwaga: Zawsze stosować taką samą strukturę regulatora PID.

2° Porównanie działania układu regulacji przy różnych nastawach – analiza wykresów

a) Zbadać reakcję na skok SP i Z1

- reakcja na skok SP - na modelu (URM) i na obiekcie (URO)
- reakcja na zakłócenie Z1 – na obiekcie (URO)
- przedstawić wykresy T_{wewX} i CV, $[T_{xp2}]$

¹ QDR – wskaźnik czterokrotnego tłumienia

	URM, skok SP	URO, skok SP	URO, skok Z1
Wykresy T_{wewX} (różne nastawy)	PV	T_{wewX}	T_{wewX}
Wykresy CV (różne nastawy)	CV	CV	CV

b) Analiza - porównać wykresy dla różnych nastaw regulatora

Czy reakcje są realne ze względu na sterowanie CV?

Czy różnice w reakcjach na URM i URO są podobne - czy lepsza jakość URM oznacza lepszą jakość URO?

Czy lepsza jakość przy skoku SP oznacza także lepszą jakość przy skoku Z1?

3° Porównanie działania układu regulacji przy różnych nastawach – analiza wskaźników

- Wskaźniki jakości wyznaczone przy skoku SP na modelu (URM) i na obiekcie (URO) – czas regulacji, przeregulowanie, zapas stabilności.

- Zestawienie nastaw i wskaźników (tabela)

	Z-N	inne	PID Tuner
Nastawy			
Wskaźniki jakości			
Zapas stabilności			

Do wyznaczenia wskaźników dla różnych nastaw można użyć interfejsu PID Tuner (Zał.C.1).

b) Analiza - porównać nastawy i wskaźniki dla różnych nastaw regulatora

Które nastawy są najlepsze (pod jakim względem)?

Czy nastawy najlepsze na modelu są też najlepsze na obiekcie?

Jakie wskaźniki jakości miały spełniać zastosowane metody doboru nastaw? Czy oczekiwane wskaźniki jakości zostały spełnione?

4° Związek pomiędzy stabilnością i jakością regulacji

a) Realizacja (zastosowanie PID Tuner)

- zastosować nastawy bazowe (wyznaczone po uruchomieniu PID Tuner) i nastawy dla zmniejszonego (zwiększonego) czasu regulacji (kilka przypadków),

- przedstawić wykresy T_{wewX} i porównać reakcję UR dla badanych przypadków.

b) Analiza – przedstawić wyniki na wykresach:

- nastawy w zależności od czasu regulacji,

- zapas stabilności w zależności od czasu regulacji,

Czy można zaobserwować związek pomiędzy zapasem stabilności i jakością regulacji?

5° Metody doboru nastaw realizowane na obiekcie (URO)

- Zastosować metodę cyklu granicznego (drugiej metody Z-N)

- Zastosować Z-N z modyfikacją Åströma-Hägglunda

- Porównać nastawy i wykresy PV i CV dla różnych metod opartych na modelu (1°) i realizowanych na obiekcie (5°)

II.7.5 Regulacja bezpośrednia PI – optymalizacja

Optymalizacja nastaw w układzie regulacji centralnej T_{wew} .

1° Zastosowanie zoptymalizowanych nastaw (Zał.B.2),

2° Zastosowanie Response Optimization (SDO – Simulink Optimization Design) dla URM

- Nastawy początkowe Z-N. Założone wskaźniki jakości, np. według PID Tuner

- Wykres z przebiegu optymalizacji (okno z ograniczeniami i przebiegiem symulacji)

- Założone wskaźniki (okno z konfiguracją SDO)

Czy reakcje są realne (ze względu na sterowanie CV)?

II.7.6 Regulacja bezpośrednia PI – elementy nieliniowe regulatora

Badanie wpływu funkcji nasycenia i ograniczenia całkowania (antiwindup). Badania na URO

Warunki przeprowadzenia badania to:

- przyjąć nasycenie CV na poziomie nominalnym, a badania przeprowadzać w punkcie pracy różnym od nominalnego (odpowiada rzeczywistości),

- założyć, że w układzie jest pewien „zapas mocy” i zmienna CV może osiągać wartość np. 110% wartości nominalnej (realne),

- na czas prowadzenia badania obniżyć dopuszczalną wartość CV, czyli wartość nasycenia

(zabieg)

- 1) Przygotować trzy warianty regulatora (**własny schemat regulatora** i/lub blok PID Controller):
 - 1° CV bez ograniczeń
 - 2° CV z nasyceniem (wartość nominalna CV)
 - 3° CV z ograniczeniem całkowania
- 2) Realizacja dwóch scenariuszy zdarzeń: (dodać rysunki)
 - a) W reakcji układu regulacji występują oscylacje (jeśli nie ma, to trochę „popsuć” nastawy)
 - Punkt pracy różny od nominalnego
 - Skok na jednym z wejść (np. SP) – wartość końcowa CV ma być w obszarze pracy
 - b) Reakcja układu z lub bez oscylacji
 - Punkt pracy różny od nominalnego
 - Zakłócenie – chwilowe „wyjście” poza obszar pracy
- 3) Porównać reakcje trzech układów dla dwóch scenariuszy zdarzeń
 - wykresy PV i CV do porównania reakcji układów dla każdego ze scenariuszy
 - Z badać wpływ parametry k_a w układzie antiwindup

Zakres regulacji

- 4) Liniowy regulator z nieliniowym wyjściem
Sterowanie on-off źródłem (kotłem, ..) –

II.7.7 Porównanie regulacji bezpośredniej i pośredniej

1. Zrealizuj układ regulacji pogodowej (p.II.3.3, II.4.2), czyli regulację pośrednią temperatury T_{wew} na podstawie wartości temperatur mierzonych na źródle:
 - wer.a) regulacja temperatury zasilania $T_{kz} = a_z T_{wew} + b_z T_{zew}$,
 - wer.b) regulacja temperatury powrotu $T_{kp} = a_p T_{wew} + b_p T_{zew}$.
2. Dobrać nastawy wybraną metodą inżynierską (bez optymalizacji).
3. Z badać działanie układu regulacji kolejno przy wartości zadanej temperatury pomieszczeń, zmianie temperatury na zewnątrz i dodatkowego zysku/straty ciepła w pomieszczeniu.

Dodatkowe: W bloku regulatora wydzielić przetwornik wielkości pomiarowej i przetwarzanie przez elementy wykonawcze

II.7.8 Projektowanie z zastosowaniem SISO Design Tool

Projektowanie za pomocą SISO Design Tool