



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

Investujemy
w Waszą
przyszłość



INStEPRO
Zintegrowane
Sterowanie
Produkcją

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Raport wewnętrzny projektu InStePro

Nr. 3.3a: Analiza i wybór procesów doświadczanych dla weryfikacji rozwiązań: stanowisko kolumny destylacyjnej

Data

30.09.2010

Przygotował:

W. Byrski

STANOWISKO KOLUMNY DESTYLACYJNEJ

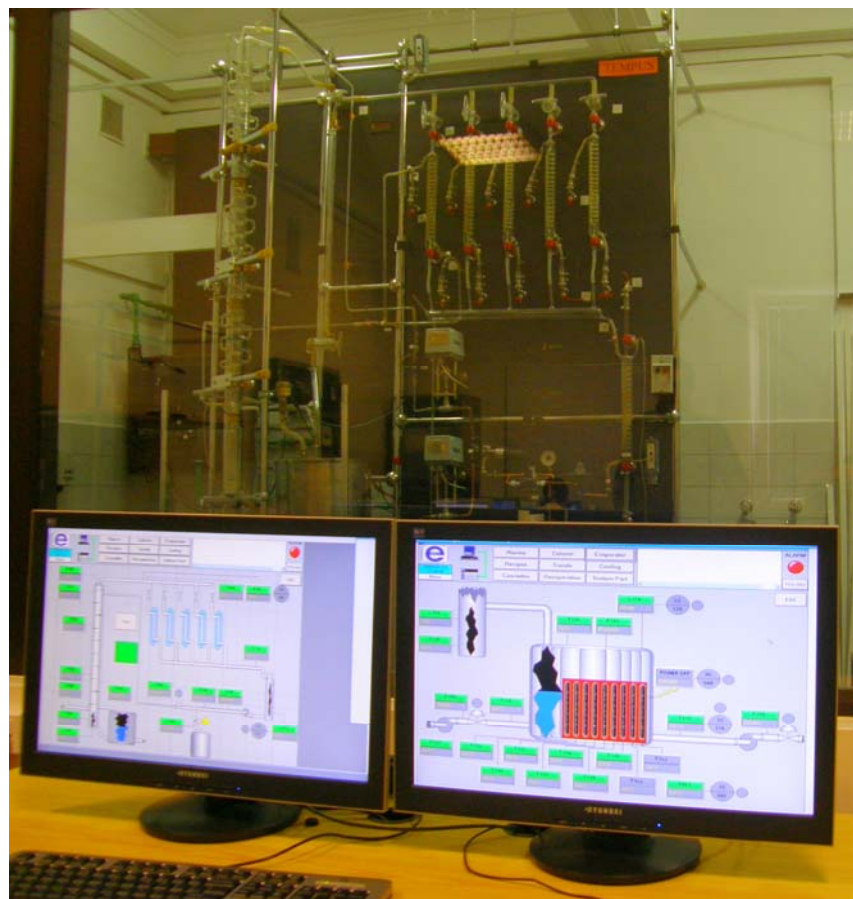
OPIS OGÓLNY

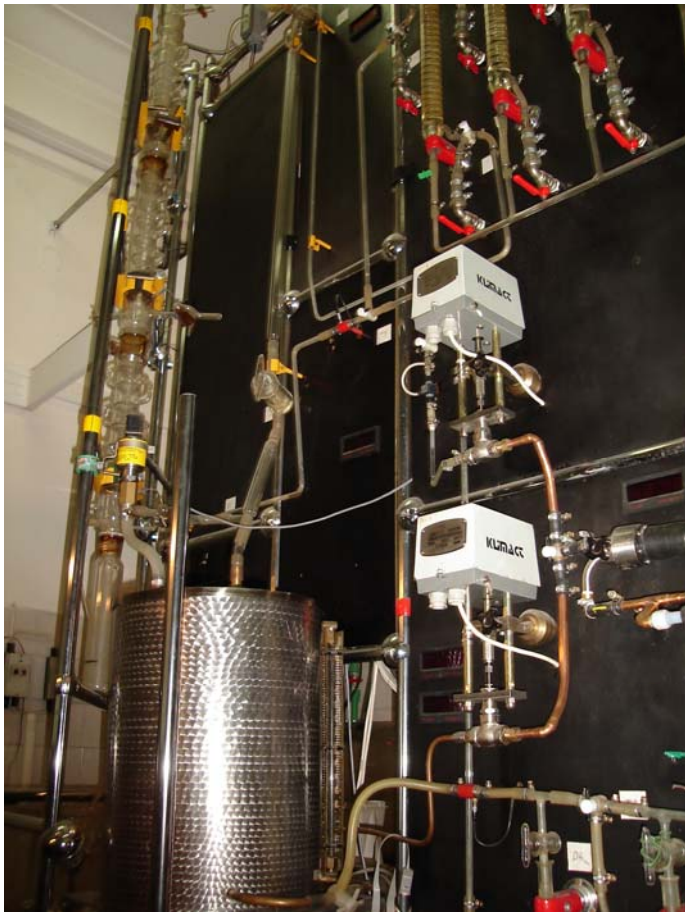
Destylacja i rektyfikacja, są procesami powszechnie występującymi w wielu gałęziach przemysłu (m.in. chemicznym, spożywczym, farmaceutycznym) dla rozdzielania i oczyszczania ciekłych mieszanin chemicznych. Procesy te w aspekcie sterowania automatycznego są procesami stosunkowo trudnymi ze względu na ich znaczną złożoność, obecność nieliniowości oraz występowanie silnych sprzężeń skrośnych pomiędzy kolejnymi etapami procesu, z których najistotniejsze to proces odparowania i skraplania. W Katedrze Automatyki, na Wydziale EAIiE zbudowano stanowisko badawczo-laboratoryjne kolumny destylacyjnej. Stanowisko tworzy instalacja do destylacji rzutowej i półkowej dwu-składnikowych mieszanin ciekłych (w skali laboratoryjnej) o zużyciu mocy do 13.5 kW. Stanowisko obejmuje: szklaną kolumnę półkową o wysokości 2m; metalową wyparkę elektryczno-olejową o mocy 13.5 kW; siedem szklanych wymienników ciepła typu "rura w rurze"; trzy metalowe zbiorniki mediów technologicznych o pojemności 90l, 90l i 30l; trzy pompy trybowe do pompowania mediów technologicznych; metalowy zbiornik obiegowej wody chłodzącej o pojemności 80 l; pompę wody chłodzącej; układ odzysku wody chłodzącej z powietrznym wymiennikiem ciepła.

Proces destylacyjny wybrano jako przykładowy proces ciągły, ze względu na jego szerokie zastosowanie w przemyśle chemicznym, interesujące właściwości statyczne i dynamiczne oraz stosunkowo prostą technologię i niskie koszty eksploatacyjne (możliwość wykorzystywania surowca w obiegu zamkniętym). Jako surowiec przyjęto mieszaninę wody i alkoholu etylowego (30% wagowo), co pozwala zapewnić bezpieczeństwo procesu dydaktycznego. Rejestracja cyfrowa obejmuje 60 zmiennych procesowych.

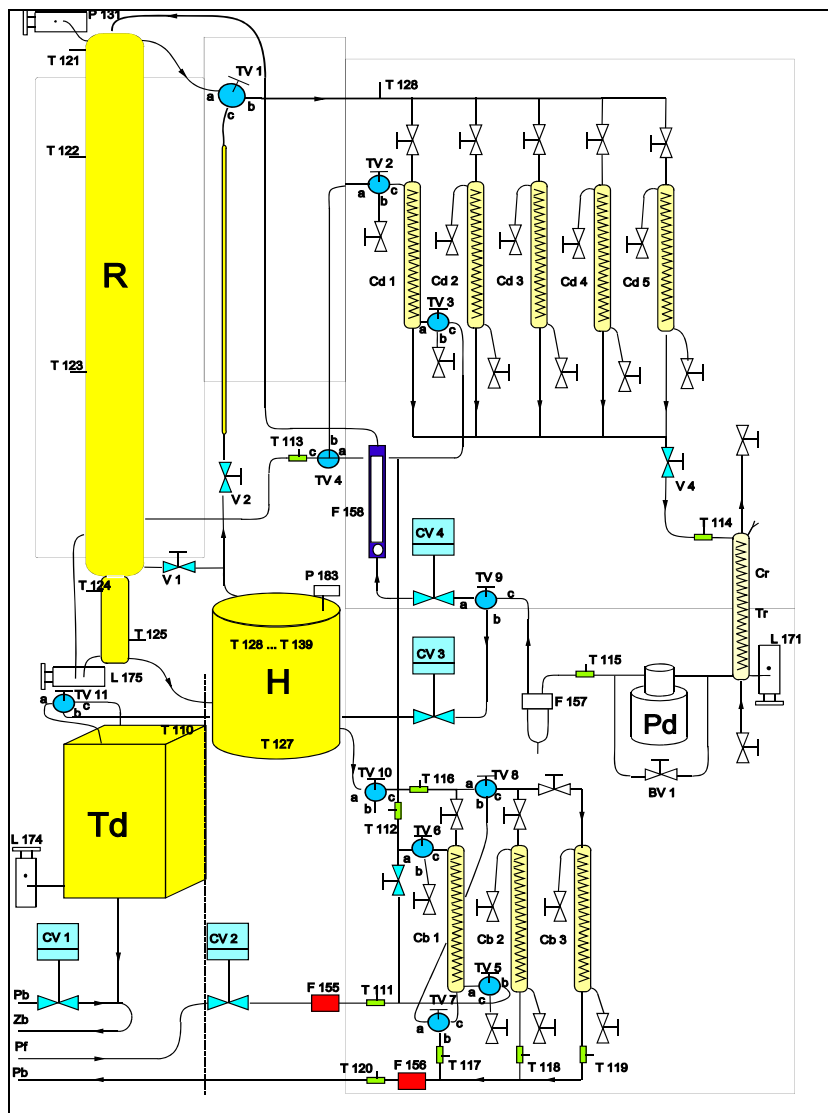
W sali zlokalizowanej obok stanowiska zainstalowany jest interfejs procesowy oraz sieć komputerowa, w skład której wchodzi przemysłowy komputer sterująco-operatorski i 6 komputerów pełniących rolę terminali. Całość stanowi nowoczesne, zintegrowane informatycznie stanowisko projektowania układów automatyki i sterowania on-line w czasie rzeczywistym, wykorzystujące dwa systemy operacyjne – system czasu rzeczywistego QNX i system MsWindows, oraz system do wizualizacji i monitoringu SCADA – InTouch. Warstwa sterowania bezpośredniego opiera się na sterownikach programowalnych PLC GE Fanuc, które zbierają pomiary, przekazują je do warstwy sterowania nadrzędnego i realizują algorytmy PID.

W odizolowanym pomieszczeniu wykonano specjalny panel nośny, na którym i z jednej strony zainstalowano kolumnę, wymienniki, wyparkę i układy regulacji. Z drugiej strony panelu zainstalowano instalację wodną dla zamkniętego obiegu chłodzącego media technologiczne w technologii Aquaterm





Zbudowanie tego laboratorium pozwala na realizację badań naukowych, prac dyplomowych, prac doktorskich oraz zajęć na wyższych latach studiów z zakresu nadrzędnych systemów sterowania komputerowego, modelowania procesów; aparatury pomiarowej; projektowania wielopoziomowych systemów automatyki; sterowania w czasie rzeczywistym; sterowania ekspertowego i inteligentnego. Schemat funkcjonalny kolumny przedstawiono poniżej.



Zestawienie analogowych zmiennych procesowych obejmuje 53 pozycje (12 przepływów, 3 ciśnienia, 7 poziomów, 43 temperatury). Oprócz wspomnianych sygnałów analogowych obiekt jest również źródłem sześciu sygnałów binarnych (0/24VDC), które odpowiadają stanom załączenia pomp (surowca, cieczy wyczerpanej, wody i refluxu) i napędu dmuchawy powietrznej (powietrzna chłodnica wody) oraz tyrystorowego sterownika mocy dostarczanej do wyparki. Elementami wykonawczymi, umożliwiającymi sterowanie pracą instalacji kolumny destylacyjnej jest 9 precyzyjnych, igłowych zaworów o charakterystykach liniowych bądź procentowych, oraz zaworów termicznych firmy Herz, stosowane powszechnie w technice grzewczej (użyto ich w celu badania jakości tanich układów sterowania). Elementy składowe stanowiska przedstawiono w Tabeli

Tabela Elementy składowe instalacji kolumny destylacyjnej

L.p.	Nazwa urządzenia	Podstawowe parametry	Oznaczenie
1	Półkowa kolumna destylacyjna	$\Phi=50$ mm, 15 półek, h=1800 mm, szkło	R
2	Rura oparowa	h=1500 mm, szklana w płaszczu termoizolacyjnym	
3	Skraplacz	Szklany, typu rura w rurze	Cd1 – Cd5
4	Zbiornik refluksu z możliwością chłodzenia	V=1.5 dm ³ , szkło	Tr
5	Zbiornik destylatu	V=30 dm ³ , stal nierdzewna	Td
6	Zbiornik Surowca	V=90 dm ³ , stal nierdzewna	Zf
7	Zbiornik cieczy wyczerpanej	V=90 dm ³ , stal nierdzewna	Zb
8	Zbiornik na wodę chłodzącą	V=30 dm ³ , stal nierdzewna	Zw
9	Pompa surowca	Pompa zębata, 6.5 l/min, 0.4Mpa	Pf
10	Pompa cieczy wyczerpanej	Pompa zębata, 6.5 l/min, 0.4Mpa	Pb
11	Pompa wody chłodzącej	Pompa zębata, 40 l/min, 0.69Mpa	Pw
12	Pompa refluksu	Pompa zębata, do 2.8 l/min, 0.5Mpa	Pd
13	Chłodnica cieczy wyczerpanej	Szklany, typu rura w rurze	Cb1 – Cb3
14	Wyparka elektryczno olejowa	Moc 13.5kW, V=10 dm ³	H
15	Chłodnica powietrzna wody chłodzącej	Przeponowa chłodnica stalowa	Cw

Wielkościami manipulowanymi, tj. wejściami sterującymi na poziomie bezpośrednim są: 27 sygnałów dwustanowych (po dwa dla każdego zaworu sterowanego silnikiem elektrycznym, tj. polecenia otwierania i zamykania; po dwa dla każdej z pomp, tj. polecenie startu i zatrzymania; cztery sygnały sterujące multiplekserem 16 pomiarów temperatury; sygnał zezwolenia na załączenie sterownika tyrystorowego). Oprócz sygnałów dwustanowych, wektor sterowań zawiera również cztery sygnały analogowe (napięcie z zakresu 0-10VDC), z których 3 sterują zaworami Herz'a oraz 1 determinujący wielkość mocy dostarczanej do wyparki.

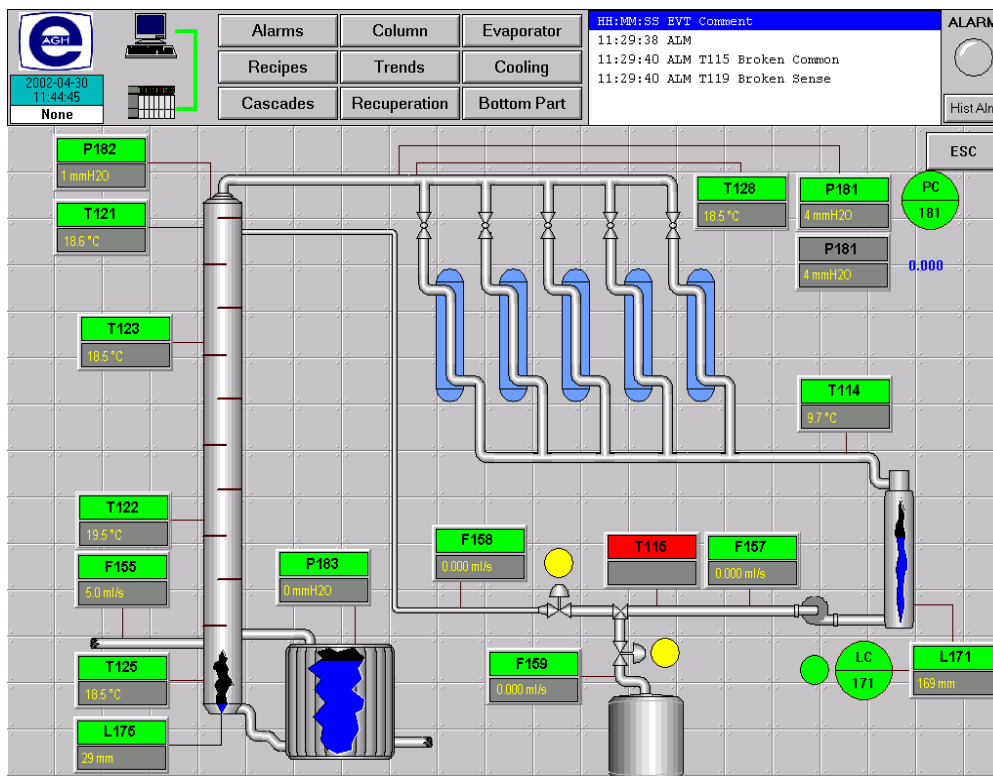
Ostatnim i najistotniejszym elementem wykonawczym pracującym w instalacji kolumny destylacyjnej jest tyrystorowy sterownik mocy. Sygnałem wejściowym sterownika jest napięcie z zakresu 0-10 VDC, wyjściowym napięcie sinusoidalne 3x380VAC. Z przebiegu napięcia wyjściowego za pomocą układu tyrystorowego (proporcjonalnie do wartości napięcia wejściowego) usuwane są niektóre półokresy przebiegu sinusoidalnego napięcia – maksymalnie może być ich 100 (napięcie sieciowe o częstotliwości 50Hz) co odpowiada maksymalnej mocy dostarczanej do układu (13.5 kW).

STEROWANIE BEZPOŚREDNIE

Zgodnie z przyjętymi zasadami dotyczącymi budowy systemów sterowania automatycznego (patrz rozdział 3) w systemie sterowania instalacją kolumny destylacyjnej wyróżniono dwa poziomy sterowania, tj. poziom sterowania bezpośredniego i nadrzędnego. Poziom sterowania bezpośredniego został zrealizowany w oparciu o sterowniki przemysłowe GE Fanuc

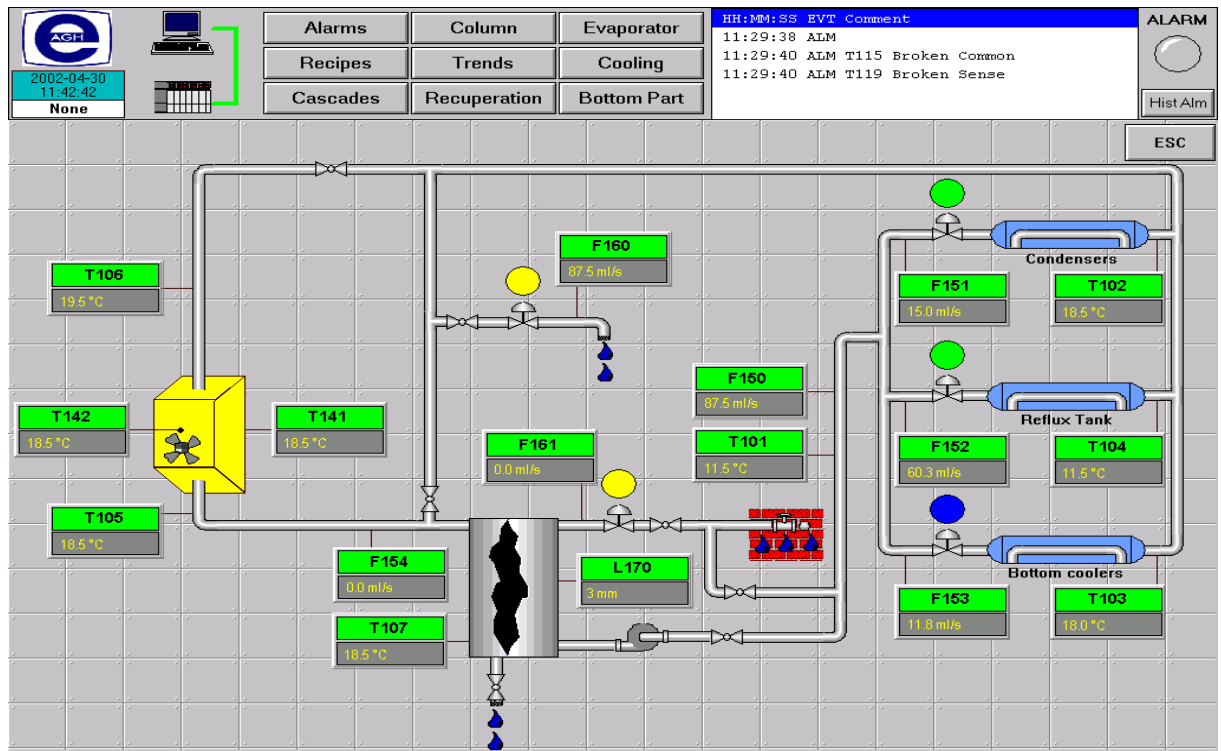
STEROWANIE NADRZĘDNE

Dla celów sterowania nadrzędnego i nadzorowania operatorskiego, akwizycji danych pomiarowych, przetwarzania sygnałów alarmowych oraz wizualizacji procesu zbudowano w oparciu o oprogramowanie InTouch (produkt firmy Wonderware z serii FactorySuite2000), aplikację służącą w/w celom. Umożliwiło to przeprowadzenie podstawowych czynności uruchomieniowych obiektu, m.in. dobór nastaw regulatorów poziomu sterowania bezpośredniego. Na poniższych rysunkach zamieszczono kilka podstawowych okien aplikacji.

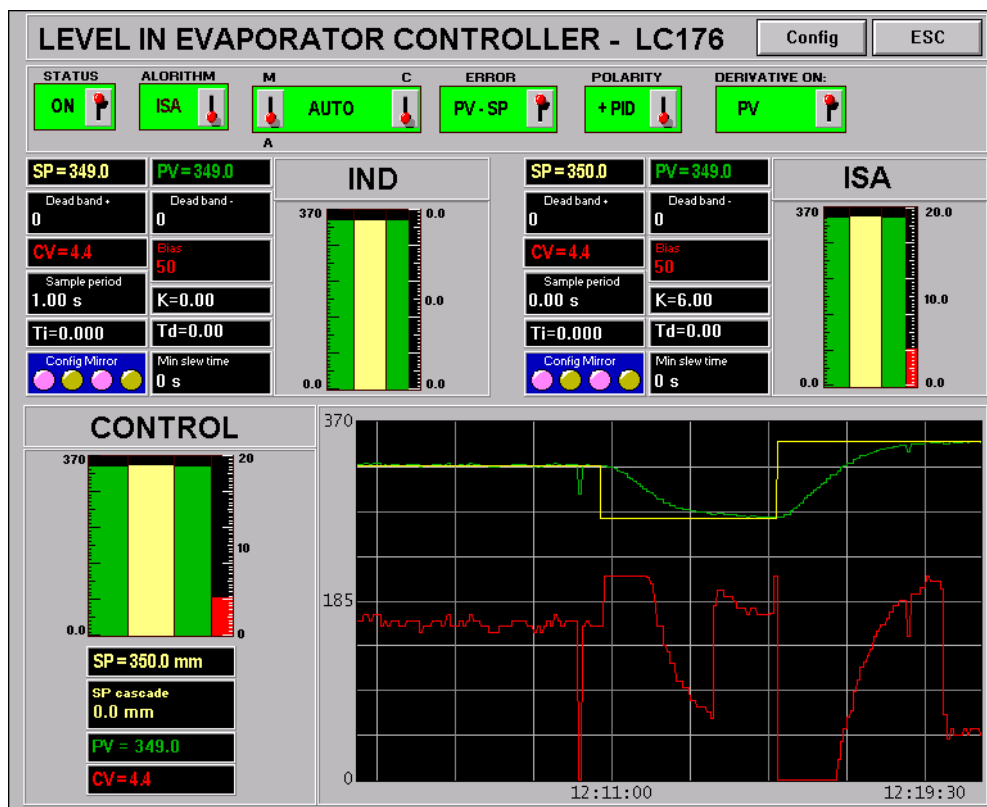


Rys. Wizualizacja kolumny destylacyjnej

W górnej części ekranu widoczny jest pasek nawigacyjny wraz z okienkiem zawierającym informacje o alarmach bieżących oraz statusem komunikacji stacji operatorskiej ze sterownikiem. Tabliczki pomiarowe skonstruowano w taki sposób, aby wadliwe pomiary były wyraźnie wyeksponowane (np. T115) poprzez ukrycie ich wartości i jednocześnie podświetlenie tła nazwy zmiennej procesowej na czerwono.

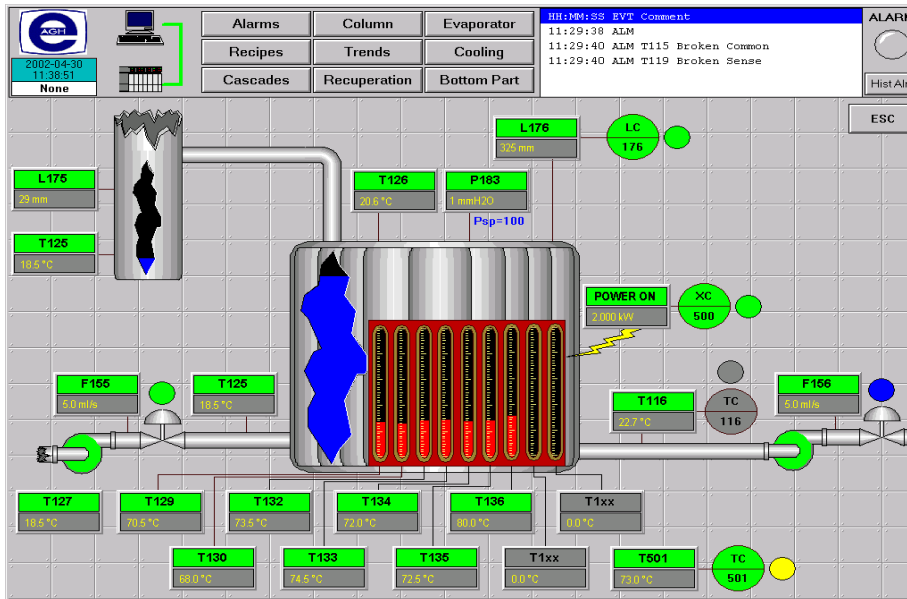


Rys. Wizualizacja układu chłodzenia



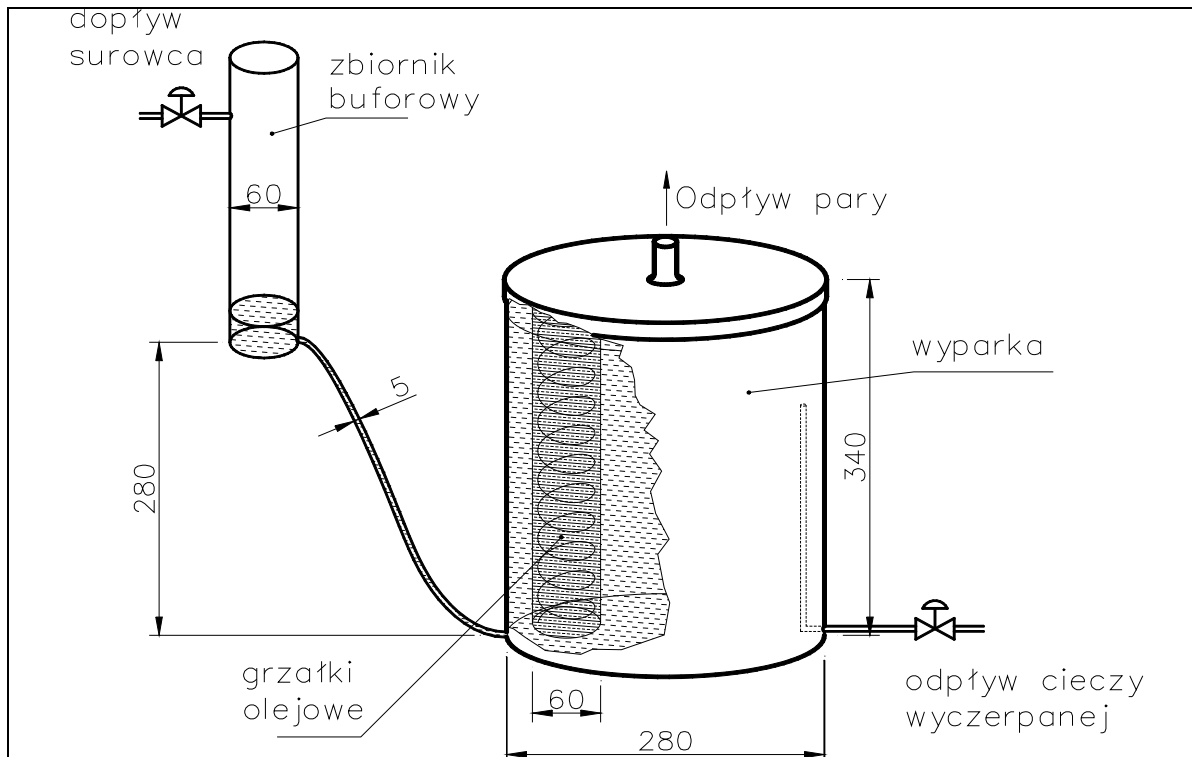
Rys. Wizualizacja pracy jednego z regulatorów osadzonych w warstwie bezpośredniej

MODEL MATEMATYCZNY WYPARKI ELEKTRYCZNO OLEJOWEJ



Rys. Wizualizacja wyparki elektryczno olejowej

Wyparka elektryczno- olejowa wraz z kubem kolumny oraz rurą oparową może, przy założeniu stałości ciśnienia na szczycie rury oparowej, stanowić niezależny obiekt sterowania. Założenie to praktycznie nigdy nie jest spełnione, gdyż ciśnienie na szczycie rury oparowej silnie zależy od warunków chłodzenia w układzie skraplaczy.



Rys. Wyparka elektryczno olejowa wraz z kubem kolumny (zbiornik buforowy)

Podczas prowadzonych eksperymentów obserwowano bardzo silny wpływ intensywności chłodzenia na ciśnienie zarówno na szczycie rury oparowej jak i w samej wyparce.

Poniżej przedstawimy model matematyczny wyparki., W tabeli zestawiono parametry stałe i obliczane, wszystkie zmienne modelu oraz równania algebraiczne wiążące zmienne procesowe.

Lp.	Oznaczenie	Jednostki	Nzawa	Sposób obliczania/wartość
1	ρ_o	kg / m^3	Gęstość oleju	958
2	ρ_a	kg / m^3	Gęstość alkoholu	790
3	ρ_w	kg / m^3	Gęstość wody	1000
4	C_o	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe oleju	1968
5	C_a	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe alkoholu	2416
6	C_e	$W / m^2 \cdot K$	Współczynnik wnikania ciepła	357.248
7	V_o	m^3	Objętość oleju	$6.36 \cdot 10^{-3}$
8	S	m^2	Powierzchnia wyparki	$358.9 \cdot 10^{-4}$
9	S_k	m^2	Powierzchnia kuba	$28.3 \cdot 10^{-4}$
10	D_r	m	Średnica rurki łączącej kub z wyparką	$5.0265 \cdot 10^{-5}$
11	l_r	m	Długość rurki łączącej kub z wyparką	0.35
12	R_p	kg / m^7	Opór hydrodynamiczny rury oparowej	$1.6 \cdot 10^9$
13	R_r	kg / m^7	Opór hydrodynamiczny rurki łączącej kub z wyparką	$4.625 \cdot 10^9$
14	P_o	Pa	Ciśnienie atmosferyczne	$1.013 \cdot 10^5$
15	λ_{H_2O}	J / kg	Ciepło utajone parowania dla wody	2260872
16	λ_{alk}	J / kg	Ciepło utajone parowania dla alkoholu	842170
17	C_w	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe wody	4190
18	g	m / s^2	Przyspieszenie ziemskie	9.81
19	l	m	Wysokość dna zbiornika buforowego	0.28
20	M_a	kg	Masa molowa alkoholu	0.046
21	M_w	kg	Masa molowa wody	0.018
22	S_r	m^2	Średnica rurki kub wyparka	$1.9843 \cdot 10^{-9}$

23	α		Równanie Antoin'a	$\alpha = \frac{e^{-\frac{4943.97}{347.36}}}{e^{-\frac{4943.87}{373.16}}}$
24	S_o	m^2	Aktualna powierzchnia wyparki (normalnie S)	Jeśli nastąpi przelanie wyparki to przyjmuje się powierzchnię rury oparowej
25	R_{po}		Współczynnik oporu hydrodynamicznego	$R_{po} = R_p \cdot \rho_{par}$
26	ρ_b	$\frac{kg}{m^3}$	Gęstość cieczy na dole kolumny	$\rho_b = \frac{1}{\frac{x_x}{\rho_a} + \frac{1-x_x}{\rho_w}}$
27	ρ_c	$\frac{kg}{m^3}$	Gęstość cieczy w wyparce	$\rho_b = \frac{1}{\frac{x_f}{\rho_a} + \frac{1-x_f}{\rho_w}}$
28	ρ_{wyp}	$\frac{kg}{m^3}$	Gęstość wynikowa w kubie kolumny	$\rho_{wyp} = \frac{1}{\frac{x_w}{\rho_a} + \frac{1-x_w}{\rho_w}}$
29	P_{va}		Prężność pary dla alkoholu	$P_{va} = 5.7468 \cdot 10^{10} \cdot e^{-\frac{4943.87}{T_{wy}}}$
30	P_{vw}		Prężność pary dla wody	$P_{vw} = 1.5374 \cdot 10^{11} \cdot e^{-\frac{4943.87}{T_{wy}}}$
31	ρ_f	$\frac{kg}{m^3}$	Gęstość wynikowa surowca	$\rho_f = \frac{1}{\frac{x_f}{\rho_a} + \frac{1-x_f}{\rho_w}}$
32	K		Stała równowagi alkoholu	$K = \frac{P_{va}}{x_{wm} \cdot P_{va} + (1-x_{wm}) \cdot P_{vw}}$
33	x_{wm}	%	Molowy skład cieczy w wyparce	$x_{wm} = \frac{x_w}{M_a \cdot \left(\frac{x_w}{M_a} + \frac{1-x_w}{M_w} \right)}$
34	x_x	%	Skład cieczy w rurce kub wyparka	$x_x = \begin{cases} x_b, & F_r > 0 \\ x_w, & F_r \leq 0 \end{cases}$
35	ρ_{par}	$\frac{kg}{m^3}$	Gęstość pary	$\rho_{par} = \frac{y_{vm} \cdot M_a + (1-y_{vm}) \cdot M_w}{0.0224 \cdot \frac{T_{wy}}{273.16}}$
36	V_w	m^3	Objętość cieczy w wyparce	$V_w = S \cdot H_{wyp}$
37	λ	J / kg	Aktualne ciepło parowania	$\lambda = \lambda_{H_2O} \cdot (1-y_{vm}) + \lambda_{alk} \cdot y_{vm}$
38	C_{fsr}	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe surowca	$C_{fsr} = C_w \cdot (1-x_f) + C_a \cdot x_f$

39	C_b	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe cieczy w kubie kolumny	$C_b = C_w \cdot (1 - x_b) + C_a \cdot x_b$
40	C_{wy}	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe cieczy w wyparce	$C_{wy} = C_w \cdot (1 - x_w) + C_a \cdot x_w$
41	C_v	$J / kg \cdot K$	Ciepło właściwe surowca, surowca w kubie, cieczy wyczerpanej, pary	$C_v = C_w \cdot (1 - y_{vm}) + C_a \cdot y_{vm}$
42	M_{wyp}	kg	Masa cieczy w wyparce	$M_{wyp} = V_w \cdot \rho_{wyp}$
43	T_x	$^{\circ}K$	Temperatura cieczy w rurce kub wyparka	$T_x = \begin{cases} T_b, & F_r > 0 \\ T_{wy}, & F_r \leq 0 \end{cases}$
44	T_o	$^{\circ}K$	Temperatura oleju w wyparce	Równanie (6.3.1.1)
45	T_{wy}	$^{\circ}K$	Temperatura cieczy wyczerpanej	Równanie (6.3.1.2)
46	T_b	$^{\circ}K$	Temperatura cieczy w kubie kolumny	Równanie (6.3.1.3)
47	H_{wyp}	m	Poziom w wyparce	Równanie (6.3.1.4)
48	h	m	Poziom w kubie kolumny	Równanie (6.3.1.5)
49	x_b	%	Skład w kubie kolumny	Równanie (6.3.1.6)
50	x_w	%	Skład cieczy wyczerpanej	Równanie (6.3.1.7)
51	F_r	$\frac{m^3}{s}$	Przepływ cieczy w rurce kub wyparka	Równanie (6.3.1.8)
52	P_{par}	Pa	Ciśnienie w wyparce	$P_{par} = x_{wm} \cdot P_{va} + (1 - x_{wm}) \cdot P_{vw}$
53	y_{vm}		Molowy skład pary	$y_{vm} = \frac{K \cdot x_{wm} \cdot M_a}{K \cdot x_{wm} + (1 - K \cdot x_{wm}) \cdot M_w}$
54	F_v	kg / s	Przepływ pary	$F_v = \rho_{par} \cdot \sqrt{\frac{P_{par}}{R_p \cdot \rho_{par}}}$
55	F_d	m^3 / s	Przepływ surowca	Arbitralnie
56	F_{wy}	m^3 / s	Przepływ cieczy wyczerpanej	Arbitralnie
57	Q	W	Moc dostarczana do wyparki	Arbitralnie
58	T_d	$^{\circ}K$	Temperatura surowca	Arbitralnie
59	x_f	%	Skład surowca	Arbitralnie

Tab. Zmienne i parametry modelu wyparki

Precyzyjny opis matematyczny wyparki jako obiektu cieplnego o parametrach rozłożonych wymagałby zastosowania cząstkowych równań różniczkowych. Poprzez przyjęcie założenia o pełnym mieszanii możliwe jest zamodelowanie wyparki za pomocą równań różniczkowych zwyczajnych. Jako zmienne wybrano temperaturę oleju w wyparce (T_o), temperaturę cieczy wyczerpanej (T_{wy}), temperaturę w kubie kolumny (T_b), poziom w wyparce (H_{wyp}), poziom cieczy w kubie kolumny (h), skład cieczy w kubie kolumny (x_b), skład cieczy wyczerpanej (x_w) oraz (opcjonalnie) przepływ w rurce (F_r) łączącej kub kolumny z wyparką. Przy powyższych założeniach równania modelu matematycznego wyparki elektryczno olejowej mają postać:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{Q - H_{wyp} \cdot C_e \cdot (T_o - T_{wy})}{\rho_o \cdot V_o \cdot C_o} \quad (1)$$

$$\frac{dT_{wy}}{dt} = \begin{cases} \frac{-F_v \cdot [(C_v - C_{wy}) \cdot T_{wy} + \lambda] + H_{wyp} \cdot C_e \cdot (T_o - T_{wy})}{M_{wyp} \cdot C_{wy}} - \dots \\ \frac{T_{wk}}{C_{wy}} \cdot (C_a - C_w) \cdot \frac{-F_v \cdot (y_{vm} - x_w)}{M_{wyp}}, F_r \leq 0 \\ -F_v \cdot [(C_v - C_{wy}) \cdot T_{wy} + \lambda] + H_{wyp} \cdot C_e \cdot (T_o - T_{wy}) + \dots \\ \frac{M_{wyp} \cdot C_{wy}}{F_r \cdot \rho_b \cdot (C_b \cdot T_x - C_{wy} \cdot T_{wy})} - \dots \\ \frac{M_{wyp} \cdot C_{wy}}{T_{wk}} \cdot (C_a - C_w) \cdot \frac{-F_v \cdot (y_{vm} - x_w) + F_r \cdot \rho_b \cdot (x_b - x_w)}{M_{wyp}}, F_r > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dT_b}{dt} = \begin{cases} \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (T_d \cdot C_{fsr} - T_b \cdot C_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b \cdot C_b} - \frac{T_b}{C_b} \cdot (C_a - C_w) \cdot \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, F_r \geq 0 \\ \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (T_d \cdot C_{fsr} - T_b \cdot C_b) + F_r \cdot \rho_{wyp} \cdot (T_b \cdot C_b - T_x \cdot C_{wy})}{S_k \cdot h \cdot \rho_b \cdot C_b} - \dots \\ \frac{T_b}{C_b} \cdot (C_a - C_w) \cdot \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b) - F_r \cdot \rho_{wyp} \cdot (x_w - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, F_r < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dH_{wyp}}{dt} = \begin{cases} \frac{F_r \cdot \rho_b - F_v - F_{wy} \cdot \rho_{wyp} + \frac{M_{wyp}}{S_o} \cdot \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_w} \right) \cdot \frac{-F_v \cdot (y_{vm} - x_w)}{M_{wyp}}}{S_o \cdot \rho_{wyp}}, F_r \leq 0 \\ \frac{F_r \cdot \rho_b - F_v - F_{wy} \cdot \rho_{wyp} + \dots}{S_o \cdot \rho_{wyp}} \\ \frac{M_{wyp}}{S_o} \cdot \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_w} \right) \cdot \frac{-F_v \cdot (y_{vm} - x_w) + F_r \cdot \rho_b \cdot (x_b - x_w)}{M_{wyp}}, F_r > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \begin{cases} \frac{F_d \cdot \rho_b - F_r \cdot \rho_b}{S_k \cdot \rho_b} + \rho_b \cdot h \cdot \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_w} \right) \cdot \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, & F_r \geq 0 \\ \frac{F_d \cdot \rho_b - F_r \cdot \rho_{wyp}}{S_k \cdot \rho_b} + \dots \\ \rho_b \cdot h \cdot \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_w} \right) \cdot \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b) - F_r \cdot \rho_{wyp} \cdot (x_w - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, & F_r < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{dx_b}{dt} = \begin{cases} \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, & F_r > 0 \\ \frac{F_d \cdot \rho_f \cdot (x_f - x_b) - F_r \cdot \rho_{wyp} \cdot (x_w - x_b)}{S_k \cdot h \cdot \rho_b}, & F_r \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{dx_w}{dt} = \begin{cases} -\frac{F_v \cdot (y_{vm} - x_w)}{M_{wyp}}, & F_r \leq 0 \\ \frac{-F_v \cdot (y_{vm} - x_w) + F_r \cdot \rho_b \cdot (x_b - x_w)}{M_{wyp}}, & F_r > 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{dF_r}{dt} = \begin{cases} \frac{F_r^2 \cdot A_{Fr} + F_r \cdot B_{Fr} + C_{Fr}}{\frac{H_{wyp} - H_0}{S} + \frac{h}{S_k} + \frac{l_r}{S_r}}, & H_{wyp} \geq H_0 \\ \frac{F_r^2 \cdot A_{Fr} + F_r \cdot B_{Fr} + C_{Fr}}{\frac{h}{S_k} + \frac{l_r}{S_r}}, & H_{wyp} < H_0 \end{cases} \quad (8)$$

Równanie (8) jest opcjonalne i opisuje dynamikę układu kub – wyparka, w którym obliczenie współczynników A_{Fr} , B_{Fr} , C_{Fr} może być przeprowadzane z uwzględnieniem dynamiki zmian pędu cieczy bądź bez tej dynamiki. Wyrażenia pozwalające obliczyć wyżej wymienione współczynniki z uwzględnieniem dynamiki zmian pędu mają postać:

$$A_{Fr} = \begin{cases} 1.5 \cdot \left(\frac{1}{S_k^2} - \frac{\rho_b}{\rho_{wyp} \cdot S} \right) - R_r, & F_r > 0 \\ 1.5 \cdot \left(\frac{1}{S_k^2} - \frac{\rho_b}{\rho_{wyp} \cdot S} \right) + R_r, & F_r \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$B_{Fr} = \frac{F_{wy} \cdot \rho_{wyp} + F_v}{S^2 \cdot \rho_{wyp}} - \frac{F_d \cdot \rho_f}{S_k^2 \cdot \rho_b} \quad (10)$$

$$C_{Fr} = \frac{g \cdot ((h \cdot l) \cdot \rho_b - H_w \cdot \rho_{wyp})}{\rho_b} \quad (11)$$

lub po przyjęciu modelu uproszczonego:

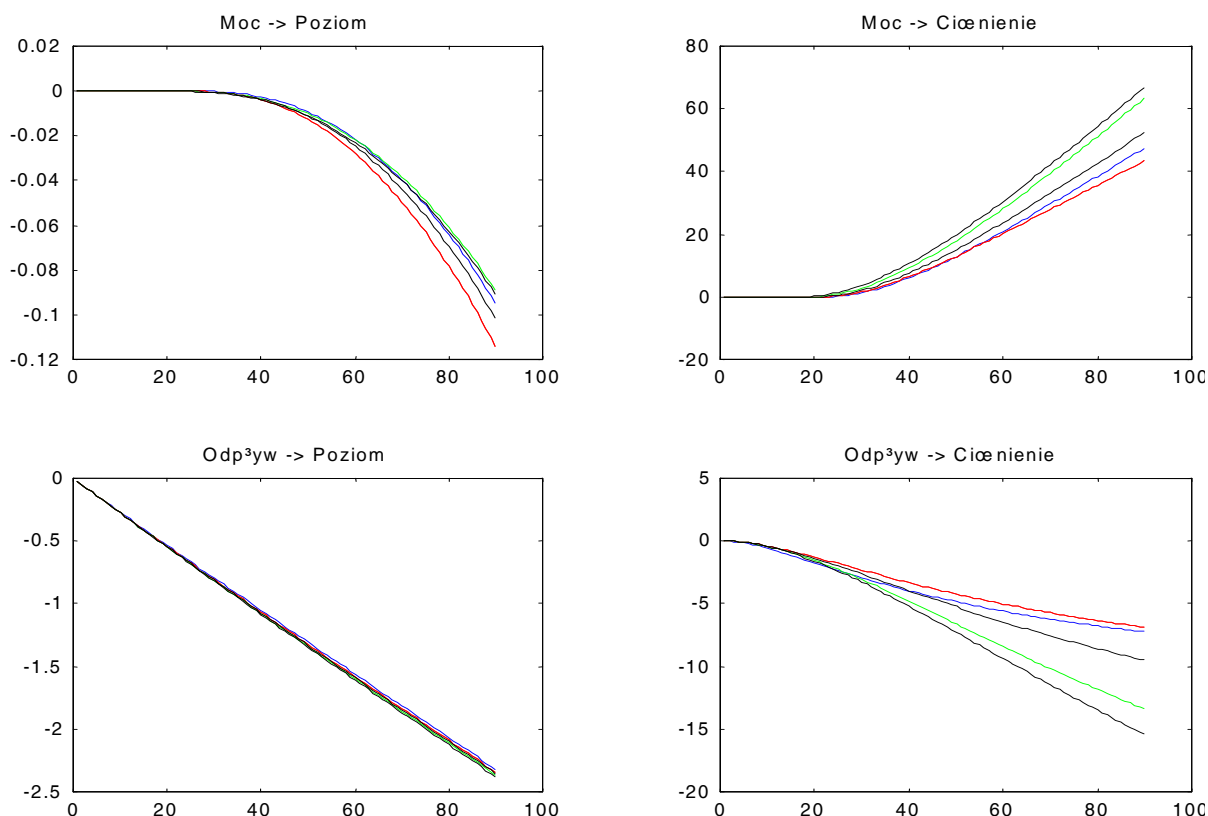
$$A_{Fr} = -R_r \quad (12)$$

$$B_{Fr} = 0 \quad (13)$$

$$C_{Fr} = \frac{g \cdot ((h \cdot l) \cdot \rho_b - H_w \cdot \rho_{wyp})}{\rho_b} \quad (14)$$

Dynamika pędu jest praktycznie nieistotna w większości procesów przemysłowych. W omawianej instalacji ujawnia się przy bardzo szybkich zmianach ciśnienia. Niemniej na ogół może być pominięta.

Stan ustalony dla zadanych warunków dopływu surowca, jego składu i temperatury oraz dostarczanej mocy obliczany jest metodą Newtona. W oparciu o obliczony stan ustalony możliwe jest obliczenie odpowiedzi skokowych obiektu, których przykładowe przebiegi pokazano na rysunku poniżej. Przebiegi z tego rysunku uzyskano dla zmian wartości odpływu z wyparki w zakresie od 5-20 ml/s oraz zmian mocy od 3-8 kW. Macierz dynamiczną H regulatora użytego do badań symulacyjnych efektywności sterowania predykcyjnego wyparką elektryczno olejową skonstruowano na podstawie odpowiedzi skokowych uzyskanych dla stanu ustalonego dopływu $F_d = 15 \text{ ml/s}$ oraz mocy dostarczanej $Q = 6.5 \text{ kW}$.



Rys.. Odpowiedzi skokowe nieliniowego modelu wyparki elektryczno olejowej