

Michał FERENC

Jan SOCHAŃSKI

Stanisław WIDEL

## KOMPUTEROWA SYMULACJA UKŁADU STEROWANIA PROCESEM ODZYSKU CIEPŁA ZE ŚCIEKÓW W PRZEMYSŁE WŁÓKIENNICZYM

**Streszczenie.** W zakładach przemysłu włókienniczego otrzymuje się w procesie prania i farbowania ścieki wodne o temperaturze od 30°C do 50°C.

W artykule przedstawiono równania matematycznego modelu dynamiki procesów zachodzących w instalacji do odzysku ciepła (procesy wymiany ciepła i akumulacji wody w zbiornikach) i dla zaproponowanego sposobu automatyzacji przeprowadzono komputerową symulację procesu regulacji i sterowania.

Do regulacji temperatury zastosowano krokowy regulator o charakterystyce P, a do sterowania zastosowano sterownik mikroprocesowy nastawiający zadaną wartość temperatury regulowanej w zależności od temperatury ścieków i zapełnienia zbiornika wody czystej.

Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów czasowych podstawowych parametrów procesu.

## COMPUTER SIMULATION OF HEAT EXCHANGER CONTROL UNIT FOR RETRIEVAL HEAT IN TEXTILE INDUSTRY

**Summary.** The textile industry uses a lot of hot sullage in washing and dyeing process. Temperature of this industrial wastes varies from 30°C to 50°C.

In this paper we describe our purpose of control of heat exchanger process unit. We chose this solution after the computer simulations of the mathematical model describing dynamic heat exchange, accumulation process and control unit.

The control unit includes a proportional regulator and a programmable logic controller (PLC). PLC system changes regulator set point considering temperature of industrial wastes and water level in the clear water tank.

We enclose figures of the basic process parameters as a result of the computer simulations.

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИМУЛЯЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ  
ТЕПЛА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД В ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**Резюме.** В фабриках текстильной промышленности во время стирки и крашения получают сточные воды с температурой  $30^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$ .

В статье представлены уравнения математической модели динамики процессов, имеющих место в теплорегенерационной установке (процессы теплообмена и накопления воды в сосудах) и для предложенного способа автоматизации произведена компьютерная симуляция процесса регулирования и управления. Для регулирования температуры применен шаговый регулятор с характеристикой P, а для управления применен микропроцессорный контроллер, устанавливающий заданную величину регулируемой температуры в зависимости от температуры сточной воды и заполнения резервуара чистой водой.

Результаты вычислений представлены в виде временных графиков основных параметров процесса.

WYKAZY WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- $A_1, A_2, A_3$  - pojemności hydrauliczne zbiorników ścieków (efektywna powierzchnia przekroju),  $\text{m}^2$  (rys.1)
- $A_{w1}, A_{w2}, A_{w3}$  - powierzchnia efektywna wymiany ciepła wymienników zanurzonych w ściekach,  $\text{m}^2$
- $c_w$  - ciepło właściwe wody,  $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
- $C_1, C_2, C_3$  - pojemności cieplne wymienników ciepła,  $\text{kJ/K}$
- $C_{x1}, C_{x2}, C_{x3}$  - pojemności cieplne zbiorników ścieków,  $\text{kJ/K}$
- $H_1, H_2, H_3$  - poziomy ścieków w zbiornikach ścieków,  $\text{m}$  (rys.1)
- $i_k$  - entalpia kondensatu dopływającego do zbiornika wody czystej  $\text{kJ/kg}$
- $k_1, k_2, k_3$  - współczynniki przenikania ciepła wymienników zanurzonych w ściekach  $\text{kW/m}^2\text{K}$
- $k_z$  - współczynnik zaworu  $\text{m}^3/\text{s} \cdot \% \text{otwarcia zaworu}$
- $\dot{m}_x$  - masowe natężenie dopływu ścieków,  $\text{kg/s}$
- $\dot{m}_{x2}$  - natężenie przepływu ścieków ze zbiornika 2 do 1,  $\text{kg/s}$

- $\dot{m}_{x3}$  - natężenie przepływu ścieków ze zbiornika 3 do 2, kg/s
- $\dot{m}_p$  - wydajność pompy ścieków, kg/s
- $\dot{m}_z$  - natężenie przepływu pobieranej wody czystej, kg/s
- $\dot{m}_w$  - masowe natężenie dopływu wody chłodzącej, kg/s
- $\dot{m}_k$  - masowe natężenie przepływu kondensatu do zbiornika wody czystej, kg/s
- $R_{H2}, R_{H3}$  - opory hydrauliczne przepływu ścieków przez przegrody między zbiornikami  $m \cdot s/kg$
- $\rho_w$  - gęstość wody,  $kg/m^3$
- $T_{x1}, T_{x2}, T_{x3}, T_{x4}$  - temperatury ścieków w zbiornikach ścieków w miejscach pokazanych na rys. 1, K ( $^{\circ}C$ )
- $T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$  - temperatury wody czystej w miejscach pokazanych na rys. 1, K ( $^{\circ}C$ )
- $T_w$  - średnia temperatura wody w zbiorniku wody czystej, K ( $^{\circ}C$ )
- $t$  - czas, s
- $\dot{Q}_{x1}, \dot{Q}_{x2}, \dot{Q}_{x3}$  - strumienie ciepła wymienione w wymiennikach, kW
- $V_w$  - całkowita objętość wody w zbiorniku wody czystej,  $m^3$
- $x$  - otwarcie zaworu, % (od 0 + 100%)
- $M_w = \int_0^t \dot{m}_w(t) dt,$  - masa wody czystej doprowadzonej do zbiornika
- $M_x = \int_0^t \dot{m}_x(t) dt$  - masa ścieków doprowadzonych do zbiornika ścieków
- $T_{w4sr} = \frac{\int_0^t T_{w4}(t) dt}{t}$  - średnia temperatura wody czystej na wylocie z wymiennika

### Indeksy

- x - ścieki
- p - pompa
- w - woda

## 1. WSTĘP

W zakładach przemysłu włókienniczego w procesie farbowania i płukania tkanin używa się gorącej wody, która po wykorzystaniu w procesie technologicznym a przed odprowadzeniem do rzeki musi zostać schłodzona do temperatury niższej niż  $35^{\circ}\text{C}$ . Racjonalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie ciepła zawartego w ściekach do podgrzewania wody technologicznej w odpowiednich wymiennikach.

Procesy farbowania i płukania charakteryzują się dużą nieregularnością poboru czystej wody oraz spuszczenia gorących ścieków.

Ręczne sterowanie procesem odzysku ciepła jest uciążliwe i nie zawsze może być poprowadzone optymalnie. Stąd też pojawia się konieczność zastosowania specjalnie zaprojektowanego układu sterowania. W niniejszym artykule przedstawimy zastosowaną przez nas metodologię badań opartą na komputerowej symulacji obiektu wraz z układem regulacji i układem sterowania oraz wyniki symulacji uzyskane dla pewnej instalacji odzysku ciepła.

## 2. OPIS INSTALACJI DO ODZYSKU CIEPŁA

Schemat instalacji odzysku ciepła przedstawiono na rys. 1. Gorące ścieki o temperaturze  $T_{x4}$  wpływają strumieniem  $\dot{m}_x$  do zbiornika ścieków. Zbiornik ścieków podzielony jest płaskimi przegrodami na trzy części. W każdej części zanurzony jest rurowy wymiennik ciepła z przepływem przeciwnym w stosunku do głównego kierunku przepływu ścieków przez poszczególne sekcje.

Po schłodzeniu do temperatury  $T_{x1}$  ścieki z ostatniej sekcji odprowadzone są za pomocą dwóch pomp do rzeki. O wielkości strumienia  $\dot{m}_p$  odprowadzonych ścieków decyduje ilość pracujących pomp oraz ich wydajność.

Czysta woda o temperaturze  $T_{w1}$ , pobierana z sieci wodociągowej, jest podgrzewana w wymienniku ciepła do temperatury  $T_{w4}$  i odprowadzana do zbiornika wody czystej i kondensatu, stąd następnie jest pobierana do farbowania i płukania oraz do napełniania lokalnych zbiorników znajdujących się w poszczególnych oddziałach zakładu.

Ze względu na dopływ kondensatu o temperaturze około  $95^{\circ}\text{C}$  średnią temperaturą wódw zbiorniku jest nieco wyższa od średniej temperatury wody uzyskiwanej z wymiennika ciepła.

### 3. AUTOMATYZACJA PROCESU ODZYSKU CIEPŁA

Układ sterowania procesem odzysku ciepła powinien spełniać następujące wymagania:

1. Temperatura ścieków odprowadzonych do rzeki powinna być mniejsza od  $35^{\circ}\text{C}$ .
2. Nie wolno przekraczać minimalnego i maksymalnego poziomu wody w zbiornikach. Przepełnienie zbiornika wody czystej spowoduje wyłączenie schładzania ścieków lub wypuszczania czystej wody do rzeki.
3. Należy dążyć do odzyskania maksymalnej ilości ciepła przy możliwie wysokiej temperaturze podgrzewania wody i zaspokojeniu zapotrzebowania na wodę czystą.

Ostatni warunek jest trudny do spełnienia z uwagi na dużą nieregularność spuszczenia ścieków do zasobnika oraz zmienne zapotrzebowanie na wodę czystą.

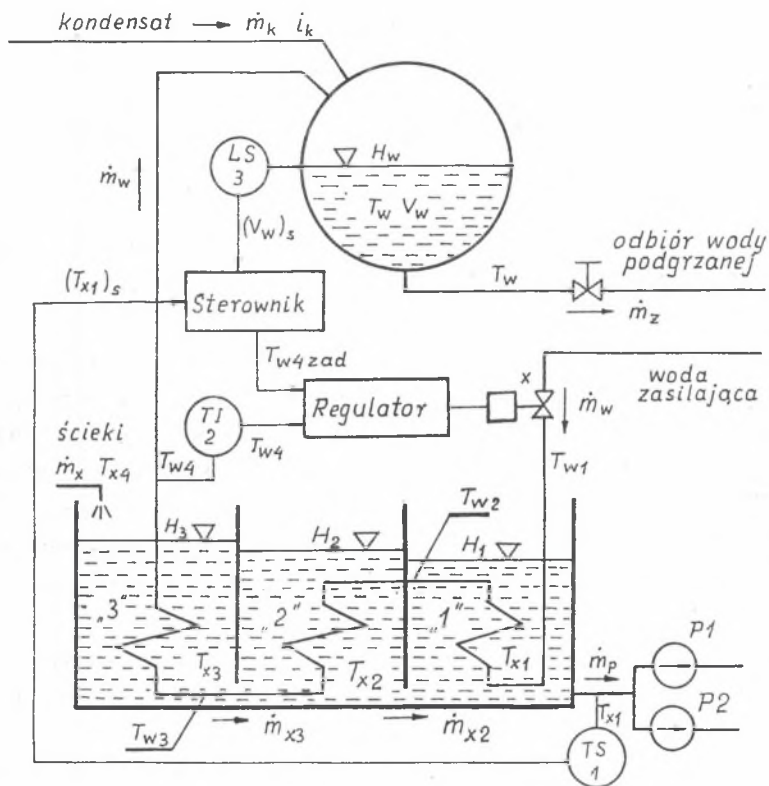
Można rozważać kilka wariantów sterowania procesem odzysku ciepła:

a) Sterowanie ręczne dopływem wody czystej do wymiennika ciepła za pomocą zaworu w oparciu o obserwację temperatury ścieków i wody czystej za wymiennikiem ciepła oraz stopnia napełnienia zbiornika wody czystej. Poziom ścieków w zbiorniku ścieków będzie utrzymywany w dopuszczalnych granicach przez przekąźnikowy układ sterujący pracą pomp.

b) Bezpośrednie sterowanie zaworem zabudowanym na dopływie wody czystej za pomocą odpowiednio zaprogramowanego sterownika mikroprocesowego w oparciu o pomiary temperatur i poziomu wody. Układ taki wymaga zastosowania odpowiednich przetworników analogowo-cyfrowych do pomiaru wielkości obserwowanych, do sterowania zaworem regulacyjnym oraz wymaga zastosowania specjalizowanych bloków wykonawczych i skomplikowanego algorytmu sterowania.

c) Regulacja automatyczna temperatury ścieków spuszczonech do rzeki przy równoczesnym zastosowaniu zabezpieczeń przed przekroczeniem granicznych poziomów wody w zbiorniku. W przypadku przepełnienia zbiornika z wodą czystą układ sterowania zamykałby przepływ wody chłodzącej lub wypuszczałby ją do rzeki.

d) Regulacja automatyczna temperatury wody czystej za wymiennikiem ciepła, jak to przedstawiono na rys. 1, przy czym wartość zadana tej temperatury będzie nastawiana przez układ sterowania (sterownik mikroprocesowy) w zależności od stopnia napełnienia zbiornika z wodą czystą oraz temperatury ścieków spuszczonech do rzeki. W tym rozwiązaniu wystarczy wyposażyć konfigurację sterownika w standardowe wejścia wyjścia binarne. Jako źródła sygnałów mogą służyć pływakowe sygnalizatory poziomu (4 szt.) oraz sygnalizatory temperatury ścieków (3 szt.).



Rys.1. Schemat instalacji do odzysku ciepła z gorących ścieków

TS/1 Sygnalizacja temperatury ścieków

TI/2 Miernik temperatury wody

LS/3 Sygnalizacja poziomu wody

Fig.1. Heat exchanger schema for retrieval heat from hot industrial wastes

TS/1 Industrial wastes temperature indicator

TI/2 Water temperature measuring device

LS/3 Water level indicator

W rozwiązaniu d) widzimy następujące zalety:

- Wykorzystuje się typową aparaturę regulacyjną dostosowaną do regulacji węzłów ciepłowniczych (regulator krokowy o charakterystyce dynamicznej typu P) oraz zawór regulacyjny z siłownikiem elektrycznym przystosowanym do współpracy z tym regulatorem.
- Uzyskuje się płynną regulację stopnia otwarcia zaworu, przy czym zachodzi jednoznaczna zależność między stopniem otwarcia zaworu a odchyłką temperatury regulowanej, co ułatwia ułożenie programu sterowania wartością zadaną regulatora.
- Znaczne zmniejszenie liczby nastawianych wartości temperatury zadanej. Przy odpowiednio dobranym nachyleniu charakterystyki statycznej można uzyskać dużą zmianę otwarcia zaworu, a tym samym dużą zmianę przepływu przy niewielkiej odchyłce temperatury regulowanej, dlatego liczba nastawianych wartości temperatury zadanej może być niewielka.

#### 4. MATEMATYCZNY MODEL OBIEKTU I REGULATORA

Podstawowymi procesami zachodzącymi w rozważanym obiekcie są: wymiana ciepła oraz napełnianie zbiorników. Dla zaprojektowania prawidłowo działającego układu sterowania dużo większe znaczenie ma znajomość wpływu wielkości nastawionych na przebieg wielkości regulowanych bądź sterowanych niż dokładne ilościowe określenia parametrów procesu, dlatego przy modelowaniu wymiany ciepła przyjęto znaczne uproszczenia.

Do opisu dynamiki procesów zachodzących w rozważanej instalacji odzysku ciepła przyjęto następujące równania:

Równania bilansu masy wody w zbiornikach

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{1}{\rho_w A_1} (\dot{m}_{x2} - \dot{m}_p) \quad (1)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = \frac{1}{\rho_w A_2} (\dot{m}_{x3} - \dot{m}_{x2}) \quad (2)$$

$$\frac{dH_3}{dt} = \frac{1}{\rho_w A_3} (\dot{m}_x - \dot{m}_{x3}) \quad (3)$$

$$\frac{dV_w}{dt} = \frac{1}{\rho_w} (\dot{m}_k + \dot{m}_w - \dot{m}_z) \quad (4)$$

Przepływy wody są obliczane ze wzorów:

$$\dot{m}_{x2} = \frac{1}{R_{H2}} (H_2 - H_1) \quad (5)$$

$$\dot{m}_{x3} = \frac{1}{R_{H3}} (H_3 - H_2) \quad (6)$$

Przyjęto, że przepływ wody przez zawór regulacyjny jest proporcjonalny do otwarcia zaworu

$$\dot{m}_w = k_z \cdot x \quad (7)$$

Równania bilnsu energii zbiorników ścieków

$$A_1 \rho_w c_w \frac{d(H_1 T_{x1})}{dt} = \dot{m}_{x2} c_w T_{x2} - \dot{m}_p c_w T_{x1} - \dot{Q}_{x1} \quad (8)$$

$$A_2 \rho_w c_w \frac{d(H_2 T_{x2})}{dt} = \dot{m}_{x3} c_w T_{x3} - \dot{m}_{x2} c_w T_{x2} - \dot{Q}_{x2} \quad (9)$$

$$A_3 \rho_w c_w \frac{d(H_3 T_{x3})}{dt} = \dot{m}_{x3} c_w T_{x4} - \dot{m}_{x3} c_w T_{x3} - \dot{Q}_{x3} \quad (10)$$



Równanie bilansu energii zbiornika wody czystej

$$\rho_w c_w \frac{d(V_w T_w)}{dt} = \dot{m}_k i_k + \dot{m}_w c_w T_{w4} - \dot{m}_z c_w T_w \quad (11)$$

Strumienie ciepła przekazane w wymiennikach zanurzonych w ściekach są równe.

$$\dot{Q}_{x1} = A_{w1} k_1 \Delta T_1 \quad (12)$$

$$\dot{Q}_{x2} = A_{w2} k_2 \Delta T_2 \quad (13)$$

$$\dot{Q}_{x3} = A_{w3} k_3 \Delta T_3 \quad (14)$$

W obliczeniach wymiany ciepła w rozważanym wymienniku można zastosować średnie arytmetyczne różnice temperatur.

$$\Delta T_1 = T_{x1} - \frac{(T_{w1} + T_{w2})}{2} \quad (15)$$

$$\Delta T_2 = T_{x2} - \frac{(T_{w2} + T_{w3})}{2} \quad (16)$$

$$\Delta T_3 = T_{x3} - \frac{(T_{w3} + T_{w4})}{2} \quad (17)$$

W równaniach (8)...(11) występują pochodne iloczynów dwóch zmieniających się wielkości.

Korzystając z tożsamości

$$\frac{d(H_1 T_{x1})}{dt} = H_1 \frac{dT_{x1}}{dt} + T_{x1} \frac{dH_1}{dt} \quad (18)$$

oraz równania (1) możemy przekształcić równanie (8) do postaci:

$$\frac{d(T_{x1})}{dt} = \frac{\dot{m}_2 c_w}{C_{x1}} (T_{x2} - T_{x1}) - \frac{A_{w1} k_1}{C_{x1}} \Delta T_1 \quad (19)$$

Podobnie uzyskamy dalsze równania.

$$\frac{d(T_{x2})}{dt} = \frac{\dot{m}_3 c_w}{C_{x2}} (T_{x3} - T_{x2}) - \frac{A_{w2} k_2}{C_{x2}} \Delta T_2 \quad (20)$$

$$\frac{d(T_{x3})}{dt} = \frac{\dot{m}_x c_w}{C_{x3}} (T_{x4} - T_{x3}) - \frac{A_{w3} k_3}{C_{x3}} \Delta T_3 \quad (21)$$

$$\frac{d(T_w)}{dt} = \frac{\dot{m}_k (i_k - c_w T_w) + \dot{m}_w c_w (T_{w4} - T_w)}{C_{xw}} \quad (22)$$

W równaniach tych występują pojemności cieplne zbiorników ścieków i zbiornika wody czystej, które są zmienne i zależą od objętości wody w tych zbiornikach.

$$C_{x1} = A_1 \rho_w c_w H_1 \quad (23)$$

$$C_{x2} = A_2 \rho_w c_w H_2 \quad (24)$$

$$C_{x3} = A_3 \rho_w c_w H_3 \quad (25)$$

$$C_{xw} = V_w \rho_w c_w \quad (26)$$

Bilans energii wymienników ciepła zanurzonych w ściekach można opisać następującymi równaniami:

$$C_1 \frac{d\left(\frac{T_{w1} + T_{w2}}{2}\right)}{dt} = \dot{Q}_{x1} - \dot{m}_w c_w (T_{w2} - T_{w1}) \quad (27)$$

$$C_1 \frac{d\left(\frac{T_{w1} + T_{w2}}{2}\right)}{dt} = \dot{Q}_{x2} - \dot{m}_w c_w (T_{w3} - T_{w2}) \quad (28)$$

$$C_1 \frac{d\left(\frac{T_{w3} + T_{w4}}{2}\right)}{dt} = \dot{Q}_{x3} - \dot{m}_w c_w (T_{w4} - T_{w3}) \quad (29)$$

Pojemności cieplne  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  poszczególnych sekcji wymiennika są stałe.

Równania (27)...(29) należy przekształcić do takiej postaci, aby z jednego równania obliczać tylko jedną wielkość zmienną w czasie. Z równania (27) obliczamy pochodną  $dT_{w2}/dt$ .

$$\frac{dT_{w2}}{dt} = \frac{2[\dot{Q}_{x1} - \dot{m}_w c_w (T_{w2} - T_{w1})]}{C_1} - \frac{dT_{w1}}{dt} \quad (30)$$

Zakładamy, że temperatura  $T_{w1}$  wody na wlocie do wymiennika jest stała, a jej pochodna równa się zero.

$$\frac{dT_{w1}}{dt} = 0 \quad (31)$$

Z równania (28) obliczamy pochodną

$$\frac{dT_{w3}}{dt} = \frac{2[\dot{Q}_{x2} - \dot{m}_w c_w (T_{w3} - T_{w2})]}{C_2} - \frac{dT_{w2}}{dt} \quad (32)$$

przy czym w obliczeniach komputerowych do równania (32) wstawiamy wartość pochodnej  $dT_{w2}/dt$  obliczoną z równania (30).

Podobnie z równania (29) obliczamy pochodną  $dT_{w4}/dt$ .

$$\frac{dT_{w4}}{dt} = \frac{2[\dot{Q}_{x3} - \dot{m}_w c_w (T_{w4} - T_{w3})]}{C_3} - \frac{dT_{w3}}{dt}, \quad (33)$$

a wartość pochodnej  $dT_{w3}/dt$  bierzemy z równania (32).

Do regulacji temperatury proponujemy zastosować regulator krokowy o charakterystyce proporcjonalnej P. Schemat blokowy regulatora przedstawia rysunek 2.

Należy zwrócić uwagę na odwrotne połączenie przekaźnika trójpołożeniowego charakteryzujące się tym, że sygnały  $\varepsilon_1$  oraz  $u$  mają przeciwny znak.

Jeżeli

$$\varepsilon_1 \leq -\varepsilon_n, \quad \text{wtedy } u = +1, \quad (34)$$

$$-\varepsilon_n < \varepsilon_1 < \varepsilon_n, \quad \text{wtedy } u = 0, \quad (35)$$

$$\varepsilon_1 \geq \varepsilon_n, \quad \text{wtedy } u = -1 \quad (36)$$

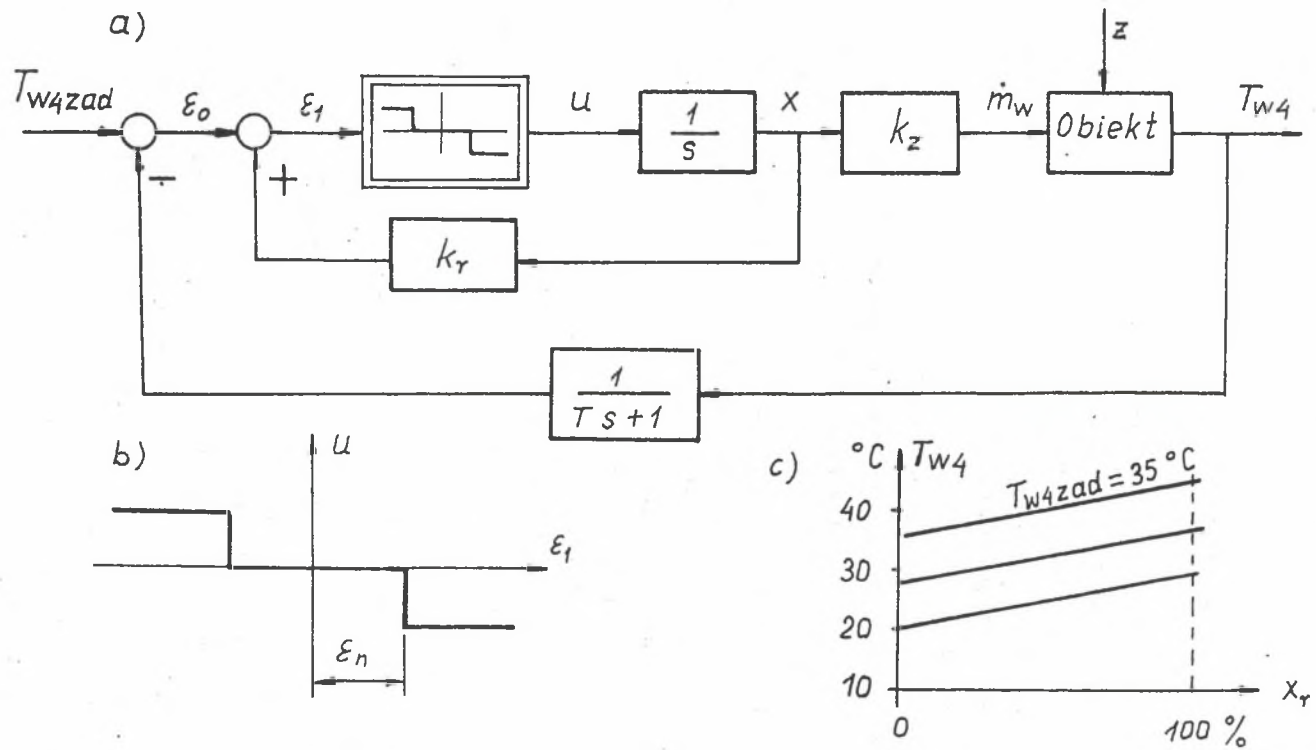
W związku z tym sygnał sprzężenia proporcjonalnego ze współczynnikiem  $k_r$  wchodzi do symulatora ze znakiem plus

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + k_r x \quad (37)$$

Charakterystykę statyczną regulatora temperatury przedstawia wykres c na rysunku 2.

Otwarcie zaworu jest proporcjonalne do różnicy między temperaturą zadaną i rzeczywistą. Nachylenie charakterystyki zależy od nastawionego zakresu proporcjonalności regulatora. Zmiana wartości zadanej powoduje równoległe przesunięcie charakterystyki. Uwzględniono również dynamikę termometru mierzącego temperaturę regulowaną. Założono, że termometr jest elementem inercyjnym 1 rzędu o stałej czasowej T.

Przedstawione równania posłużyły do utworzenia programu komputerowego symulującego działania obiektu i regulatora w warunkach zmiennego przepływu i temperatury dopływających ścieków.



Rys.2. Schemat blokowy regulatora i jego charakterystyka statyczna

Fig.2. Regulators block diagram and it's static characteristic

Równania różniczkowe całkowano metodą Eulera. Dla przykładu zmienną o nazwie  $y$  po przyroście czasu obliczano zgodnie ze wzorem:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \left(\frac{dy}{dt}\right)_t \Delta t \quad (38)$$

Krok całkowania  $\Delta t$  dobrano metodą prób, tak aby uzyskać możliwie dużą szybkość liczenia i zadowalającą dokładność. Krok całkowania nie może być dłuższy od najkrótszej stałej czasowej występującej w procesie. Przyjęto krok całkowania równy 0.5 s. Sprawdzono, że dwukrotne zmniejszenie kroku całkowania nie spowodowało zmiany wyników obliczeń z dokładnością do trzech pierwszych cyfr znaczących.

Do sterowania procesem odzysku ciepła zamierzamy zastosować sterownik mikroprocesowy, który na podstawie sygnałów binarnych pochodzących od poziomu wody w zbiorniku oraz temperatury ścieków wylotowych steruje wartością zadaną regulatora temperatury.

W celu umożliwienia równoczesnej symulacji wymiennika ciepła oraz układu sterowania opracowano dla mikroprocesora 8088/86 specjalny kompilator umożliwiający symulację działania sterownika mikroprocesorowego na mikrokomputerze zgodnym z IBM PC/XT/AT.

Po sprawdzeniu działania algorytmu sterowania w modelu symulacyjnym możliwe jest ponowne skomplikowanie programu źródłowego w celu otrzymania wersji wykonywalnej na rzeczywistym sterowniku.

Opis sterownika SW-1 oraz jego języka symbolicznego umieszczono w pracy [1].

## 5. PROGRAM UKŁADU STEROWANIA WARTOŚCIĄ ZADANĄ TEMPERATURY WODY CHŁODZĄCEJ

W przyjętym układzie regulacji wartość zadana temperatury wody chłodzącej musi być dostosowana do aktualnych warunków pracy wymienników ciepła i zbiorników gromadzących wodę. W celu odzyskania maksymalnej ilości ciepła wskazane jest nastawienie niskiej temperatury zadanej. W rezultacie regulator doprowadzi do dużego otwarcia zaworu regulacyjnego i dużego przepływu wody chłodzącej. Jeżeli w tym czasie pobór wody ze zbiornika będzie mały, to przy długotrwałym utrzymywaniu nadwyżki dopływu wody nad wypływem może dojść do przepełnienia zbiornika, całkowitego odcięcia przepływu wody chłodzącej i zaprzestania odzysku ciepła.

W celu uniknięcia takich sytuacji proponujemy, aby układ sterowania zmieniał wartość zadaną regulatora temperatury w zależności od poziomu wody w

zbiornikach oraz temperatury ścieków odprowadzanych ze zbiornika ścieków. Proponujemy zastosować cztery czujniki poziomu i umieścić je w takich miejscach, aby podzieliły objętość zbiornika na pięć prawie równych części (podział co 20% objętości). Biorąc pod uwagę fakt, że korzystniej jest mieć nieco większe napełnienia zbiornika ostatecznie przyjęto następujące objętości, których przekroczenie będzie sygnalizowane przez czujniki poziomu V1, V2, V3, V4.

V4, V3, V2, V1

0	0	0	0	dla $V_w \geq 0\%$ i $V_w < 22\%$
0	0	0	1	dla $V_w \geq 22\%$ i $V_w < 47\%$
0	0	1	1	dla $V_w \geq 47\%$ i $V_w < 66\%$
0	1	1	1	dla $V_w \geq 66\%$ i $V_w < 85\%$
1	1	1	1	dla $V_w \geq 85\%$ i $V_w \leq 100\%$

Jeżeli rzeczywista objętość wody w zbiorniku jest niższa od 22%, wówczas może być realizowane intensywne chłodzenie ścieków, a więc układ sterowania nastawi niską temperaturę zadaną. Jeżeli objętość wody będzie większa od V2 a mniejsza od V3, to układ sterowania nastawi średnią temperaturę zadaną przy której przepływ wody chłodzącej odpowiada w przybliżeniu średniemu zapotrzebowaniu wody. Jeżeli objętość wody będzie większa od V3 i mniejsza od V4, wówczas układ sterowania nastawi wysoką temperaturę zadaną i zrealizuje program oszczędnego chłodzenia ścieków ze względu na małą rezerwę objętości zbiornika wody. Jeżeli objętość wody przekroczy wartość V4, wówczas układ sterowania nastawi bardzo wysoką wartość temperatury zadanej, przy której regulator całkowicie zamknie zawór regulacyjny.

Dodatkowo temperatura zadana wody chłodzącej powinna być uzależniona od temperatury ścieków wylotowych. Przewidziano trzy sygnalizatory temperatury ścieków odprowadzanych do rzeki: sygnalizatory XT1, XT2, XT3, które sygnalizują odpowiednio przekroczenie temperatur  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $35^{\circ}\text{C}$ . Mniejszy odstęp między sygnalizowanymi temperaturami nie jest wskazany, bowiem przy uwzględnieniu niejednoznaczności zakresy działania poszczególnych sygnalizatorów zachodziłyby na siebie. Jeżeli temperatura ścieków wylotowych jest wyższa od maksymalnej dopuszczalnej temperatury równej  $35^{\circ}\text{C}$ , to układ sterowania zwiększa intensywność chłodzenia przez obniżenie temperatury zadanej. W przypadku, gdy temperatura ścieków jest niższa od  $25^{\circ}\text{C}$ , układ sterowania zmniejsza intensywność chłodzenia, aby nie dopuścić do napełnienia zbiornika zbyt zimną wodą i potem nie mieć rezerwy objętości w przypadku, gdy zajdzie potrzeba intensywnego chłodzenia gorących ścieków.

Pełny program pracy układu sterowania można przedstawić w następującej tabelicy.

Tabela 1

Wartość zadana temperatury na wylocie z wymiennika Tw4zad

i1\_1...i1\_3 - Stan czujników sygnalizujących temperaturę ścieków

i3\_1...i3\_4 - Stan czujników sygnalizujących napełnienie zbiornika

	$T_{x1}$	25°C	30°C	35°C	
$V_w$	60	60	60	60	i3_4 = 1
85%	22	20	18	14	i3_3 = 1
66%	18	16	14	10	i3_2 = 1
47%	14	12	10	8	i3_1 = 1
22%	8	8	6	6	i3_1 = 0
	i1_1 = 0	i1_1 = 1	i1_2 = 1	i1_3 = 1	

## 6. WYNIKI KOMPUTEROWEJ SYMULACJI UKŁADU STEROWANIA PROCESEM ODZYSKU CIEPŁA

Niezbędne dane do przeprowadzenia komputerowej symulacji sterowania procesem odzysku ciepła pochodzą z pomiarów wykonanych na obiekcie rzeczywistym w wybranych zakładach włókienniczych w Bielsku-Białej. Z badań tych uzyskano pojemności zasobników wody, współczynniki przenikania ciepła, czasowy przebieg natężenia przepływu  $m_x$  i temperatury ścieków  $T_{x4}$  doprowadzonych do zasobnika w ośmiogodzinnym cyklu pracy istniejącej instalacji sterowanej ręcznie.

Program komputerowy działa w trybie graficznym. Obciążenie obiektu w postaci poboru wody czystej jest zadawane interakcyjnie z klawiatury komputera. Po wykonaniu obliczeń o ilości kroków wymagającej przewinięcia ekranu program zatrzymuje się. Ze względu na dużą liczbę wyświetlanych



wykresów wyniki obliczeń są przedstawione na trzech ekranach, które można przeglądać aż do ponownego wznowienia obliczeń. Wyniki obliczeń w postaci wykresów przedstawiono na rysunkach od 3 do 8.

Z przedstawionych wykresów wynika, że przy założonym programie sterowania i regulacji temperatura ścieków wylotowych  $T_{x1}$  utrzymuje się na średnim poziomie około  $30^{\circ}\text{C}$ , nie przekraczając granicznej temperatury  $35^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura wody czystej zwiększa się od wartości  $T_{w1} = 10^{\circ}\text{C}$  do wartości  $T_{w4} \approx 19^{\circ}\text{C}$ . Sprawność odzysku ciepła wynosi około 30% w stosunku do całego ciepła zawartego w ścieżkach po schłodzeniu ich do temperatury  $10^{\circ}\text{C}$  równej temperaturze wody zasilającej. Stosunek masy wody czystej dopływającej do zbiornika do masy wody pobranej równy jest około  $M_w/M_z = 0,95$ . Ponieważ do zbiornika dopływa również kondensat, więc bilans ilości wody w zbiorniku wody czystej jest zachowany, a poziom wody utrzymuje się w pobliżu 0,5 objętości zbiornika.

Z przedstawionych obliczeń wynika, że zaprojektowany układ sterowania i regulacji spełnia stawiane mu wymagania przy typowym 8-godzinnym cyklu pracy.

## 7. WNIOSKI

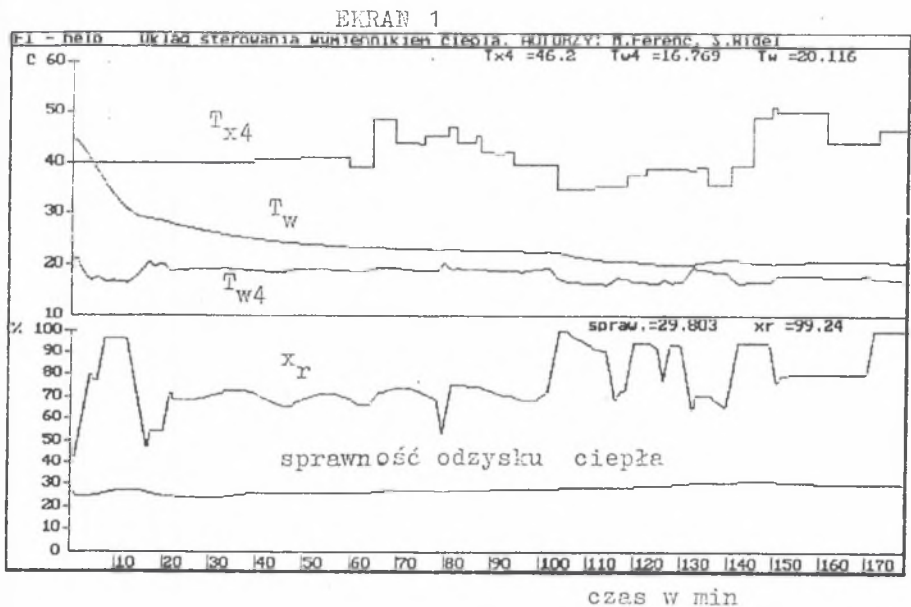
Komputerowa symulacja procesu odzysku ciepła łącznie z układem sterowania umożliwia znalezienie algorytmu spełniającego postawione wymagania sterowania oraz dobranie parametrów układu, takich jak: niejednoznaczność sygnalizatorów poziomu i temperatury, opóźnienia czasowe, wzmocnienie regulatora, charakterystyka przepływowa zaworu regulacyjnego, pojemność zbiorników oraz powierzchnia wymiany ciepła.

Umożliwia zbadanie przebiegów czasowych poszczególnych parametrów procesu przy różnych przebiegach wielkości zakłócających, takich jak: pobór wody czystej, zrzut gorących ścieków.

Opracowany przez autorów system programowania binarnych układów sterowania umożliwia łączenie modelu obiektu z modelem układu sterowania, a następnie przeniesienie algorytmu sterowania opracowanego dla modelu na sterownik rzeczywisty sterujący rzeczywistym obiektem.

W wyniku komputerowej symulacji rozważanego układu sterowania i regulacji zapewniający ciągłość działania automatycznego układu przy przewidywalnych zakłóceniach ruchowych i zapewniających odzysk ciepła w ilości około 30%

Inne algorytmy zaproponowane przed symulacją procesu miały szereg wad, na przykład przy nastawianiu zbyt wysokiej temperatury zadanej  $T_{w4}$  następowało szybkie opróżnienie zbiornika czystej wody.



Rys. 3. Parametry procesu obserwowane na ekranie 1 w czasie od 0 do 180 minut

$T_{x4}$  - temperatura ścieków dolotowych

$T_w$  - temperatura wody czystej w zbiorniku

$T_{w4}$  - temperatura wody czystej na wylocie z wymiennika ciepła

$x_r$  - stopień otwarcia zaworu regulacyjnego w %

sprawność odzysku ciepła = ciepło oddane w wymienniku / ciepło, które mogą oddać ścieki po ochłodzeniu ich do temperatury wody dolotowej do wymiennika

Fig. 3. Process parameters showed on the screen 1 between 0 - 180 minute.

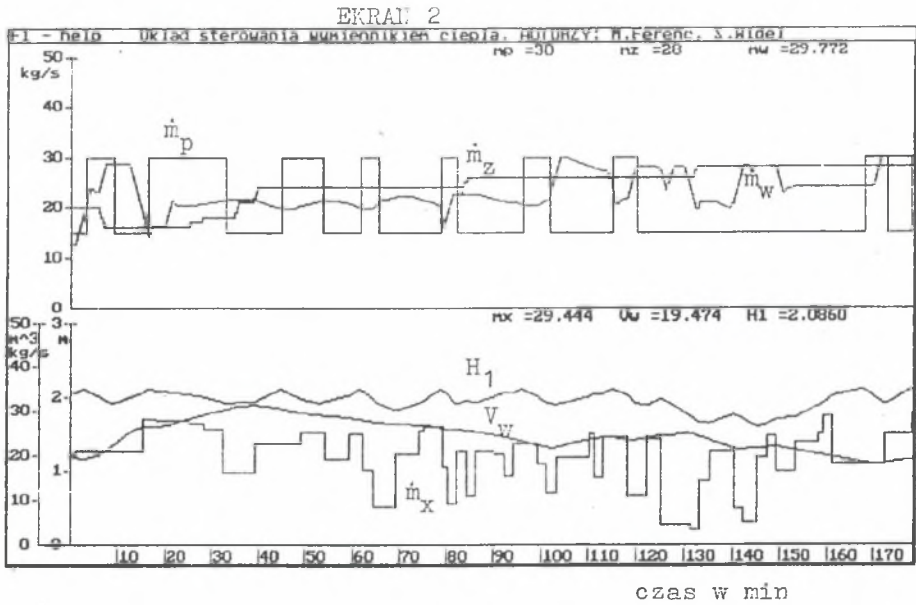
$T_{x4}$  - temperature of supplied industrial wastes

$T_w$  - clean water temperature in the tank

$T_{w4}$  - clean water temperature in the heat exchanger's output

$x_r$  - opening ratio of regulating valve in percent

heat retrieval efficiency = heat given back in the exchanger / heat that can be given back after cooling down industrial wastes down to the incoming water temperature

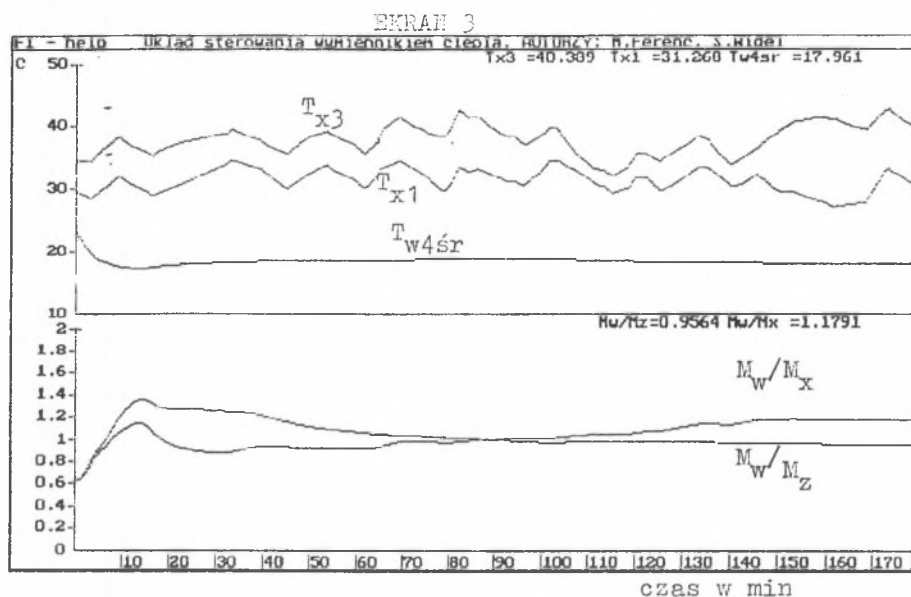


Rys.4. Parametry procesu obserwowane na ekranie 2 w czasie od 0 do 180 minut

- $\dot{m}_p$  - wydajność pompy ścieków
- $\dot{m}_z$  - pobór wody ze zbiornika
- $\dot{m}_w$  - przepływ wody przez wymiennik
- $H_1$  - poziom ścieków w sekcji 1 (patrz rys.1)
- $\dot{m}_x$  - dopływ ścieków do zbiornika ścieków

Fig.4. Process parameters showed on the screen 2 between 0 - 180 minute

- $\dot{m}_p$  - flow intensity of industrial wastes pump
- $\dot{m}_z$  - water consumption from the tank
- $\dot{m}_w$  - water flow throught the exchanger
- $H_1$  - industrial wastes level in box 1 /see figure 1/
- $\dot{m}_x$  - industrial wastes in flow to the tank

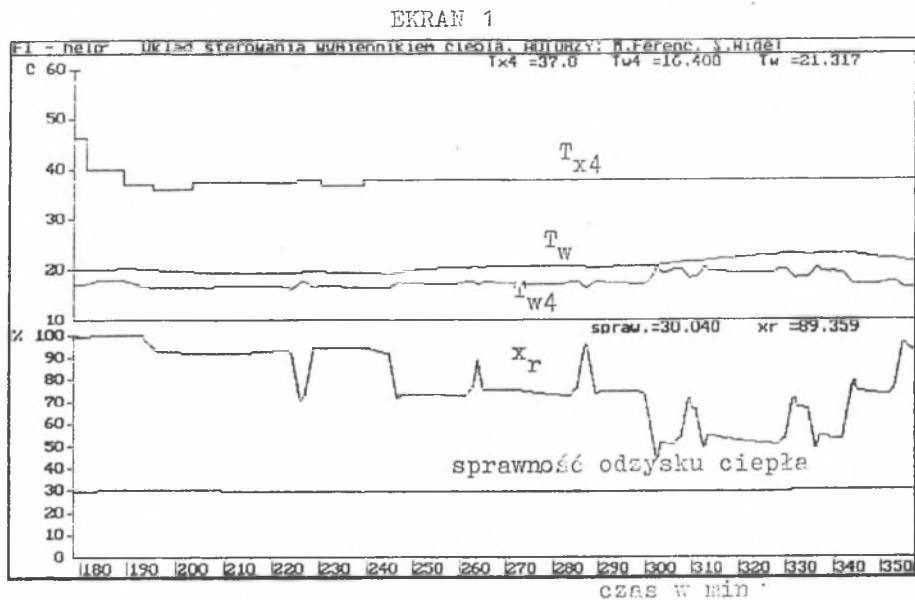


Rys.5. Parametry procesu obserwowane na ekranie 3 w czasie od 0 do 180 minut

- $T_{x3}$  - temperatura ścieków w zbiorniku 3
- $T_{x1}$  - temperatura ścieków w zbiorniku 1
- $T_{w4sr}$  - średnia temperatura wody za wymiennikiem ciepła
- $M_w$  - masa wody doprowadzonej do zbiornika
- $M_x$  - masa ścieków dopływających do zbiornika ścieków
- $M_z$  - masa wody pobieranej ze zbiornika wody czystej

Fig.5. Process parameters showed on the screen 3 between 0 - 180 minute

- $T_{x3}$  - temperature of industrial wastes in the tank 3
- $T_{x1}$  - temperature of industrial wastes in the tank 1
- $T_{w4sr}$  - average water temperature after heat exchange
- $M_w$  - mass of the water supplied to the tank
- $M_x$  - mass of the waste water supplied to the industrial wastes tank
- $M_z$  - mass of the water consumed from the clean water tank



Rys.6. Parametry procesu obserwowane na ekranie 1 w czasie od 180 do 350 minut

$T_{x4}$  - temperatura ścieków dolotowych

$T_w$  - temperatura wody czystej w zbiorniku

$T_{w4}$  - temperatura wody czystej na wylocie z wymiennika ciepła

$x_r$  - stopień otwarcia zaworu regulacyjnego w %

sprawność odzysku ciepła = ciepło oddane w wymienniku/ciepło, które mogą oddać ścieki po ochłodzeniu ich do temperatury wody dolotowej do wymiennika

Fig.6. Process parameters showed on the screen 1 between 180 - 350 minute

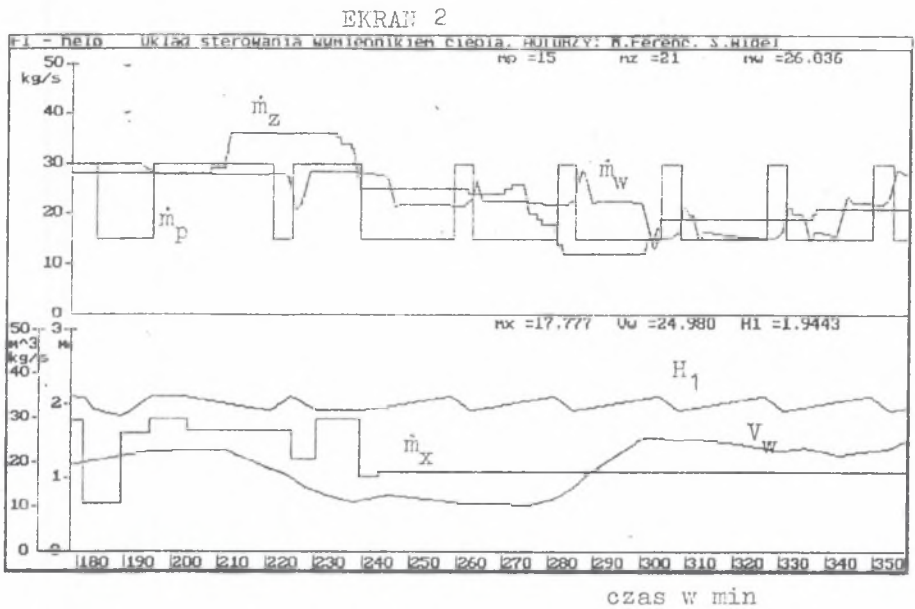
$T_{x4}$  - temperature of supplied industrial wastes

$T_w$  - clean water temperature in the tank

$T_{w4}$  - clean water temperature in the heat exchanger's output

$x_r$  - opening ratio of regulating valve in percent

heat retrieval efficiency = heat given back in the exchanger/heat that can be given back after cooling down industrial wastes down to the incoming water temperature

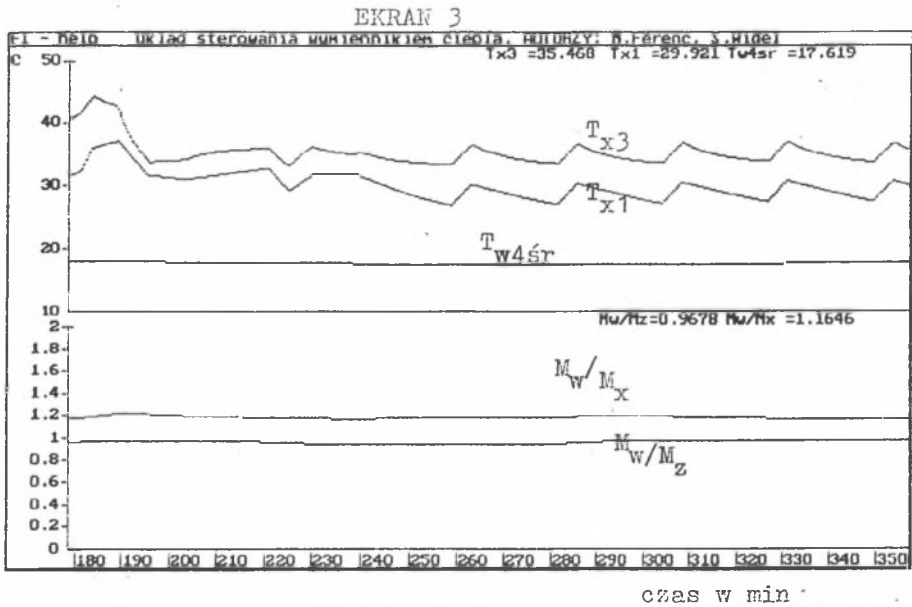


Rys.7. Parametry procesu obserwowane na ekranie 2 w czasie od 180 do 350 minut

- $\dot{m}_p$  - wydajność pompy ścieków
- $\dot{m}_z$  - pobór wody ze zbiornika
- $\dot{m}_w$  - przepływ wody przez wymiennik
- $H_1$  - poziom ścieków w sekcji 1 (patrz rys.1)
- $\dot{m}_x$  - dopływ ścieków do zbiornika ścieków

Fig.7. Process parameters showed on the screen 2 between 180 - 350 minute

- $\dot{m}_p$  - flow intensity of industrial wastes pump
- $\dot{m}_z$  - water consumption from the tank
- $\dot{m}_w$  - water flow through the exchanger
- $H_1$  - industrial wastes level in box 1 (see figure 1)
- $\dot{m}_x$  - industrial wastes in flow to the tank



Rys. 8. Parametry procesu obserwowane na ekranie 3 w czasie od 180 do 350 min.

- $T_{x3}$  - temperatura ścieków w zbiorniku 3
- $T_{x1}$  - temperatura ścieków w zbiorniku 1
- $T_{w4sr}$  - średnia temperatura wody za wymiennikiem ciepła
- $M_w$  - masa wody doprowadzonej do zbiornika
- $M_x$  - masa ścieków dopływających do zbiornika ścieków
- $M_z$  - masa wody pobieranej ze zbiornika wody czystej

Fig. 8. Process parameters showed on the screen 3 between 180 - 350 minute

- $T_{x3}$  - temperature of industrial wastes in the tank 3
- $T_{x1}$  - temperature of industrial wastes in the tank 1
- $T_{w4sr}$  - mass of the water supplied to the tank
- $M_w$  - mass of the water supplied to the tank
- $M_x$  - mass of the waste water supplied to the industrial wastes tank
- $M_z$  - mass of the water consumed from the clean water tank

## LITERATURA

- [1] Ferenc M., Wideł St.: Opracowanie programu układu mikroprocesowego do sterownia obiektów energetycznych na przykładzie średnioobrotowego silnika wysokoprężnego - Międzyresortowy Program Badawczo-Rozwojowy, PRI 14 ETAP 1. NB-400/RAU-2/RME-2/88 zadanie 30-3, praca nie publikowana, Gliwice, 1989 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Prof. Pol. Śl. Jan Składzien

Wpłynęło do Redakcji 10.12.91

## Abstract

In textile industry factories during the dying and washing process they have got a lot of hot sullage. (Temperature of this industrial wastes varies from 30°C do 50°C).

About 30% of heat is retrievable by having an appropriate installation of heat exchangers and water accumulation. Such installation consists of the underground tank for industrial wastes, made of concrete and divided into three parts.

There is a pipe heat exchanger to warm up clean water sunk in every part of the tank.

Heated water is accumulated in the tank for clean water and it may be reused in technological process.

In this paper automatization of such heat exchange is considered.

To control the process we chose a proportional step regulator and a programmable logic controller (PLC).

The method of our research was based on a computer simulation. We worked out a mathematical model of dynamics of:

- thermic process (accumulation and exchange of heat)
- hydraulic process (flow and accumulation of water)
- control unit,



We wrote the computer program for the IBM-PC compatible microcomputer. The executable program including simulation continuous process module and user interface module was written in C. We worked out the simulation PLC system module in our own symbolic language.

We enclose figures showing how basic process parameters change in time. The figures and the algorithm for PLC system are the result of our work. Algorithm tells us how to change the regulator set point according to industrial wastes temperature measured on the exit from the tank and to the water level in the clear water tank.

We assume that the control unit works properly with typical motorial disturbances provided that:

- the clear water tank is never overfull or empty
- exit temperature of sullage is less than 35°C
- the salvage of heat is as high as possible.