

doc. dr inż. ANDRZEJ SERWACH
mgr inż. STEFAN FRYDLIŃSKI
mgr inż. BARBARA OMYLIŃSKA

Przemysłowy Instytut
Automatyki i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

KOMPUTEROWA SYMULACJA DYNAMIKI CIECZOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA

W artykule zaproponowano nowy model matematyczny pozwalający badać dynamikę cieczowego wymiennika ciepła, będący rozwinięciem klasycznego modelu statycznego. Przeanalizowano właściwości tego modelu. Podano metodę identyfikacji parametrów dynamicznych wymienników drogą pośrednią — za pomocą symulacji komputerowej, do której wykorzystuje się wyniki badań eksperymentalnych. Jako przykład zamieszczono charakterystyki dynamiczne wymiennika JAD-D i przeanalizowano ich wrażliwość na zmiany parametrów dynamicznych.

1. Wstęp

W literaturze na temat wymienników ciepła występuje wyraźny brak powiązań między modelami statycznymi i dynamicznymi tych obiektów. Modele statyczne są zbudowane na podstawie teorii podobieństwa i są poparte wynikami badań eksperymentalnych [1],[4]. Zupełnie w innym kierunku rozwinięta się teoria procesów dynamicznych w wymiennikach. Teoretyczne modele dynamiczne są wyprowadzane z podstawowych równań przepływu masy i energii. Są to więc modele o parametrach rozłożonych, opisane równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Aby takie modele mogły być analizowane znanymi metodami, jest niezbędna linearyzacja równań podstawowych. W rezultacie otrzymuje się teoretyczne wyniki pozwalające na analizę procesów dynamicznych w wymienniku tylko w warunkach niewielkich odchyień od punktu pracy [2],[6]. W rzeczywistości, zakłócenia mają zwykle amplitudy na tyle duże, że przyjmowanie modelu zlinearyzowanego nie jest słuszne. Ponadto określenie parametrów równań modelu teoretycznego jest praktycznie niemożliwe z uwagi na brak prostych powiązań z wynikami badań eksperymentalnych. Dlatego są stosowane dynamiczne modele wymienników uzyskiwane drogą identyfikacji według metody *czarnej skrzynki*, czyli z pominięciem fizycznej strony zjawisk [2],[3]. W artykule zaproponowano nowy nieliniowy model dynamiczny cieczowego wymiennika ciepła, mający charakter fenomenologiczny.

2. Proponowany model matematyczny

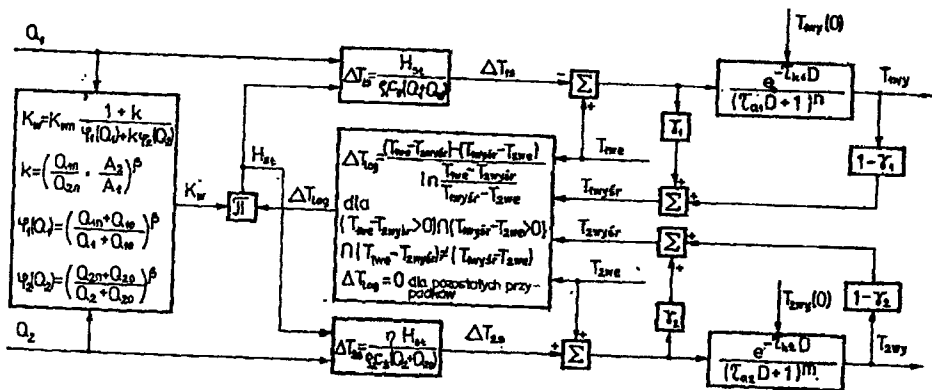
Niżej podano oznaczenia zmiennych i parametrów użytych w schemacie blokowym modelu matematycznego (rys. 1).

A_1, A_2 — powierzchnia czynna przekroju poprzecznego strumienia pierwotnego i wtórnego [m^2];

C_1, C_2 — ciepło właściwe cieczy w obwodzie pierwotnym i wtórnym [$J kg^{-1} K^{-1}$];

$D = \frac{d}{dt}$ — operator różniczkowania [s^{-1}];

- H_{st} – strumień ciepła przekazywanego przez wymiennik [W];
- k – współczynnik uwzględniający wpływ stosunku nominalnych prędkości omywania przegrody przez strumień pierwotny i wtórny na postać charakterystyki statycznej [];
- K_w – wydajność cieplna [WK⁻¹];
- K_{wn} – nominalna wydajność cieplna [WK⁻¹];
- m, n – liczbą członów inercyjnych pierwszego rzędu symulujących wpływ akumulacji ciepła w obwodzie wtórnym i pierwotnym [];
- Q_1, Q_2 – przepływ w obwodzie pierwotnym i wtórnym [m³s⁻¹];
- Q_{10}, Q_{20} – parametry korekcyjne zapobiegające zerowaniu mianowników w równaniach charakterystyki statycznej [m³s⁻¹];
- Q_{1n}, Q_{2n} – przepływ nominalny w obwodzie pierwotnym i wtórnym [m³s⁻¹];
- T_{1we}, T_{2we} – temperatura wejściowa w obwodzie pierwotnym i wtórnym [°C];
- T_{1wy}, T_{2wy} – temperatura wyjściowa w obwodzie pierwotnym i wtórnym [°C];
- $T_{1wyśr}, T_{2wyśr}$ – średnia dynamiczna temperatura wyjściowa w obwodzie pierwotnym i wtórnym [°C];
- ΔT_{1s} – spadek temperatury w obwodzie pierwotnym [K];
- ΔT_{2s} – przyrost temperatury w obwodzie wtórnym [K];
- ΔT_{log} – średnia logarytmiczna napędowa różnica temperatur [K];
- β – współczynnik zależny od charakteru przepływu [];
- γ_1, γ_2 – współczynnik wagi w średniej dynamicznej temperaturze wyjściowej w obwodzie pierwotnym i wtórnym [];
- ρ_1, ρ_2 – gęstość cieczy w obwodzie pierwotnym i wtórnym [kg m⁻³];
- η – sprawność wymiennika [];
- $\varphi_1(Q_1), \varphi_2(Q_2)$ – funkcja bezwymiarowa w znormalizowanym równaniu wydajności cieplnej [];
- τ_{a1}, τ_{a2} – stała czasowa akumulacji w obwodzie pierwotnym i wtórnym [s];
- τ_{k1}, τ_{k2} – opóźnienie transportowe w unoszeniu ciepła w obwodzie pierwotnym i wtórnym [s].



Rys. 1.

Powyższy model matematyczny jest bezpośrednim rozwinięciem modelu statycznego. Nieliniowe zależności statyczne są przedstawione jako znormalizowana postać w odniesieniu do wartości nominalnych znanych równań opisujących stany ustalone [1],[4].

Właściwości dynamiczne są uwzględnione w ten sposób, że temperatury wyjściowe w obu obwodach są opóźnione w stosunku do odpowiednich przebiegów statycznych, o czas opóźnienia transportowego wynikający ze skończonej prędkości unoszenia ciepła oraz o inercję odwzorowującą efekt akumulacji ciepła. W rzeczywistości wymiennik jest typowym obiektem o parametrach rozłożonych. W odniesieniu do proponowanego modelu rozłożony charakter procesów wewnątrz wymiennika objawia się tak, że do obliczania średniej logarytmicznej napędowej różnicy temperatur powinny być brane przebiegi temperatur wyjściowych mniej opóźnione, niż to ma miejsce u wylotów wymiennika. Efekt ten uzyskano wprowadzając dynamiczne średnie ważne temperatury wyjściowe do obliczania napędowej różnicy temperatur. Stałe czasowe opóźnienia transportowego i inercji cieplnej w każdym z obwodów, zależą przede wszystkim od przepływów w tych obwodach. Tutaj przyjęto je dla uproszczenia jako stałe parametry, bowiem jak wykazały badania eksperymentalne [2], przy zmianach przepływu w zakresie $\pm 50\%$ wartości nominalnej, jego wpływ na zmianę parametrów dynamicznych jest pomijalny. Wyniki badań eksperymentalnych zamieszczone w [3] również nie pozwalają stwierdzić wyraźniej zależności między przepływem i stałymi czasowymi. Zaznaczyć należy, że w przypadku typowych zastosowań wymienników w układach regulacji temperatury dąży się zwykle do utrzymania na niezmiennym poziomie przepływu wtórnego, a zmiany temperatury uzyskuje się przez sterowanie przepływem pierwotnym, za pomocą regulatora. Wówczas założenie stałości parametrów dynamicznych obwodu pierwotnego, wywołane zmianami przepływu w tym obwodzie, są mało istotne dla automatycznej regulacji temperatury na wyjściu obwodu wtórnego, gdyż nie wpływają bezpośrednio na przebiegi zmiennych objętych pętlą sprzężenia zwrotnego.

3. Sposób identyfikacji parametrów dynamicznych

W modelu matematycznym wymiennika występują dwie grupy parametrów – statyczne i dynamiczne. Do grupy pierwszej należą: $A_1, A_2, k, K_{wn}, Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{10}, Q_{20}, \beta, \eta$; a do drugiej: $m, n, \gamma_1, \gamma_2, \tau_{a1}, \tau_{a2}, \tau_{k1}, \tau_{k2}$.

Parametry Q_{1n} i Q_{2n} są danymi obliczeniowymi dla konkretnego wymiennika. Parametry K_{wn} (ilożyczyn: współczynnika przenikania ciepła, dla nominalnych przepływów, razy powierzchnia wymiany ciepła) i η można przyjąć z danych producenta lub określić z badań eksperymentalnych. Badanie takie jest proste i może być wykonane np. w węźle cieplnym. Trzeba tylko zarejestrować w stanie ustalonym, wartości temperatur wejściowych i wyjściowych odpowiadające przepływowi nominalnym. Wówczas parametry K_{wn} i η oblicza się z zależności:

$$K_{wn} = \frac{S_1 c_1 Q_{1n} (T_{1wc} - T_{1wy})}{(T_{1wc} - T_{2wy}) - (T_{1wy} - T_{2wy})} \cdot \ln \frac{T_{1wy} - T_{2wy}}{T_{1wy} - T_{2wc}}$$

$$\eta = \frac{S_2 c_2 Q_{2n} (T_{2wy} - T_{2wc})}{S_1 c_1 Q_{1n} (T_{1wc} - T_{1wy})}$$

Wykorzystanie danych podanych przez producenta zaleca się do wymienników nowych, natomiast danych eksperymentalnych – do wymienników po dłuższym okresie eksploatacji, ze względu na wpływ kamienia kotłowego, korozji itp. Parametry A_1 i A_2 określa się z wymiarów geometrycznych wymiennika, a parametr k jest obliczony ze wzoru podanego na schemacie blokowym (rys. 1). Parametr β zależy od stopnia turbulencji. Na ogół wymienniki pracują w warunkach rozwiniętej turbulencji i

wówczas $\beta = 0,8$. Parametry Q_{10} i Q_{20} określić można arbitralnie jako co najmniej stokrotnie mniejsze od odpowiednich przepływów nominalnych.

Parametry dynamiczne powinny być określane na podstawie badań eksperymentalnych odpowiedzi przejściowej wymiennika, metodą pośrednią — za pomocą symulacji komputerowej. Istota metody polega na eksperymentalnym zarejestrowaniu odpowiedzi przejściowej wymiennika i następnie odtworzenie tej sytuacji w modelu wymiennika dla różnych wartości parametrów dynamicznych, dobieranych tak, aby uzyskać jak największą zgodność przebiegów fizycznych i symulowanych. Eksperyment laboratoryjny, mający na celu zarejestrowanie fizycznych odpowiedzi przejściowych, powinien być możliwie najprostszy, aby ułatwić identyfikację komputerową. Zgodnie z regułami analizy czynnikowej, powszechnie używanej w naukach eksperymentalnych, zakłócenia powinny być wprowadzane pojedynczo, przy stałych wartościach pozostałych zmiennych wejściowych. Wystarczy przy tym zbadanie odpowiedzi na jeden wybrany rodzaj zakłócenia. Z punktu widzenia teorii automatycznej regulacji najlepiej, aby zakłócenie miało charakter skokowy. Wówczas właściwości dynamiczne badanego obiektu ujawniają się najwyraźniej w odpowiedziach przejściowych zmiennych wyjściowych.

Reasumując powyższe uwagi zaleca się, aby eksperyment polegał na badaniu przebiegów temperatur wyjściowych, w obu obwodach wymiennika, w odpowiedzi na skokową zmianę przepływu pierwotnego, przy niezmiennych wartościach przepływu wtórnego i obu temperatur wejściowych. Takie warunki próby powinno zapewnić stanowisko laboratoryjne. Wybór rodzaju wymuszenia wynika zarówno stąd, że przepływ pierwotny jest zazwyczaj używany jako zmienna sterująca wymiennikiem, jak i z łatwości laboratoryjnej realizacji skokowej zmiany tego przepływu (oczywiście w odniesieniu do szybkości procesów przejściowych wymiany ciepła). Aparatura sterująco-pomiarowa, użyta do generacji wymuszenia i rejestracji odpowiedzi, powinna być dobrana tak, aby jej właściwości dynamiczne były nieistotne w odniesieniu do dynamiki badanego procesu. Ewentualnie powinny one być dokładnie znane (zwłaszcza dla rejestracji temperatur), aby można je było uwzględnić w modelu.

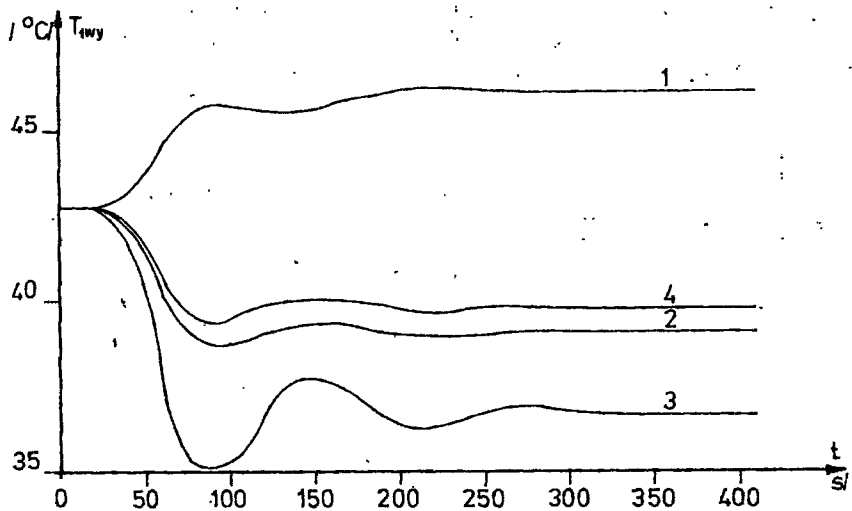
W przypadku dysponowania wynikami badań uzyskanymi w wyżej opisanych warunkach, identyfikacja komputerowa sprowadza się do wielokrotnego (dla różnych zestawów wartości parametrów dynamicznych) obliczenia odpowiedzi przejściowych modelu na skokową zmianę wartości zmiennej wejściowej Q_1 , przy stałych wartościach pozostałych trzech zmiennych wejściowych. Ośmiem parametrów dynamicznych czyni praktycznie nierozwiązywalnym problemem znalezienia właściwego zestawu ich wartości, jeżeli przyjęć nieukierunkowany sposób poszukiwań. W istocie, sytuacja nie jest tak beznadziejna. Przede wszystkim, niezależnie od pozostałych, można na wstępie dokładnie określić opóźnienia transportowe w obu obwodach, jako przedziały czasu od chwili wystąpienia wymuszenia, do momentów zarejestrowania jakichkolwiek obserwowalnych zmian temperatur wyjściowych. Następnie liczbę członów inercyjnych w obu obwodach można wybrać arbitralnie. Doświadczenia wykazują [2], że wystarczają liczby nie większe niż pięć. W takim razie liczba nieznanych parametrów dynamicznych redukuje się do czterech (dwa współczynniki wagi i dwie stałe czasowe akumulacji). Te parametry należy dobierać metodą prób i błędów, ale parami, czyli zmieniać w danym kroku, albo współczynniki wagi, albo stałe czasowe akumulacji. Takie postępowanie powinno zazwyczaj doprowadzić do zadawających rezultatów po kilku krokach. Istotne znaczenie ma tutaj doświadczenie i intuicja prowadzącego symulację. Jako wartości startowe zaleca się przyjęcie współczynników wagi $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,5$ (start ze średniej arytmetycznej) i stałych czasowych akumulacji o wartościach odniesionych do przedziału czasu, który upływa od chwili początku zmian (po czasie opóźnienia transportowego), do chwili osiągnięcia przez odpowiednią temperaturę wyjściową po raz pierwszy wartości równej około 70% wartości ustalonej. W przypadku $m=n=5$ wartości startowe stałych czasowych są jedną szóstą tych przedziałów czasu.

Dla przykładu, opisaną wyżej metodą zidentyfikowano właściwości dynamiczne wymiennika typu JAD-D stosowanego w węzłach cieplnych. Posłużono się przy tym danymi eksperymentalnymi z [3].

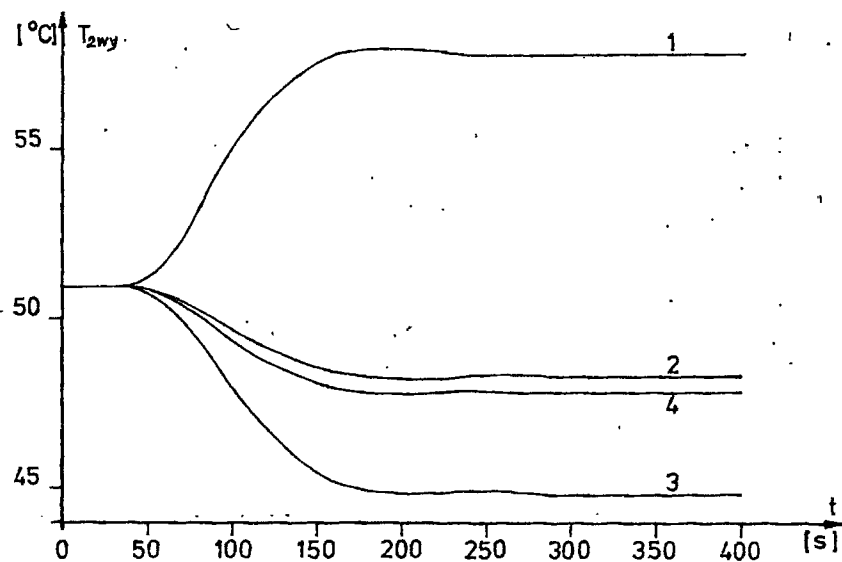
Wartości parametrów statycznych wymiennika JAD-D (określone do zastosowania w II stopniu węzła ciepłej wody użytkowej) są następujące: $K_{wn} = 2550 \text{ WK}^{-1}$ dla $Q_{1n} = 0,365 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ i $Q_{2n} = 0,413 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; $k = 5,87$ dla $\beta = 0,8$; $\eta = 0,9$.

Parametry dynamiczne mają natomiast wartości: $m=n=5$; $\gamma_1 = \gamma_2 = 0,5$; $\tau_{a1} = 8,5 \text{ s}$; $\tau_{a2} = 15,2 \text{ s}$; $\tau_{k1} = 18,0 \text{ s}$; $\tau_{k2} = 22,5 \text{ s}$.

Na rysunkach 2 i 3 są pokazane odpowiedzi przejściowe wymiennika JAD-D na skokowe wymuszenia o następującej postaci:



Rys. 2

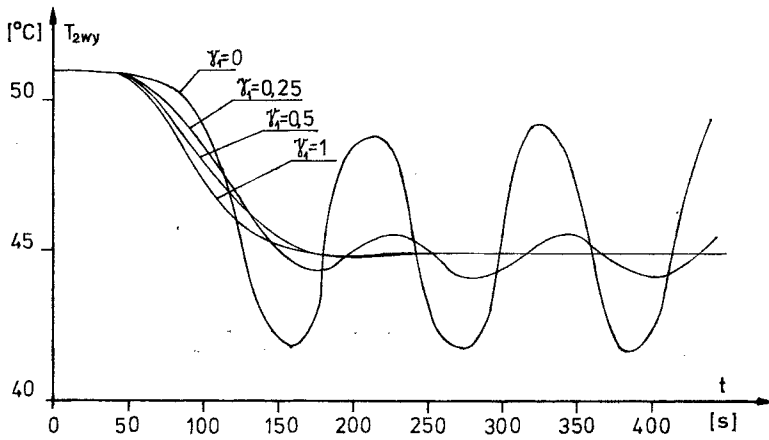


Rys. 3

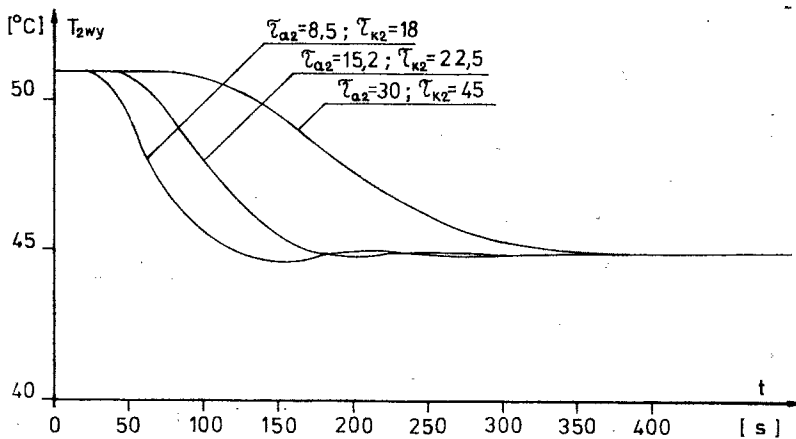
- 1 – przyrost temperatury wejściowej w obwodzie pierwotnym z 70°C do 85°C;
- 2 – spadek temperatury wejściowej w obwodzie wtórnym z 34,8°C do 30°C;
- 3 – spadek przepływu pierwotnego z $2,62 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $1,32 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- 4 – przyrost przepływu wtórnego z $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ do $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Zakłócenia były wprowadzone pojedynczo przy startowych wartościach pozostałych trzech zmiennych wejściowych. Warunki początkowe dla temperatur wyjściowych odpowiadały wartościom startowym wszystkich zmiennych wejściowych.

Dla ilustracji wpływu parametrów dynamicznych na właściwości wymiennika, przykładowo pokazano zmiany charakteru odpowiedzi przejściowej, temperatury wyjściowej z obwodu wtórnego, na skokowy spadek przepływu pierwotnego (wymuszenie 3, rys. 2 i 3), w zależności od wartości współczynnika wagi w średniej dynamicznej temperaturze wyjściowej z obiegu pierwotnego (rys.4) i od proporcji



Rys. 4.



Rys. 5.

między stałymi czasowymi w obu obwodach (rys.5). Wartości czasu opóźnienia transportowego i stałej czasowej akumulacji w obwodzie 2 dlatego zmieniono synchronicznie, gdyż w rzeczywistości większemu opóźnieniu transportowemu odpowiada zwykle większa stała czasowa akumulacji. Nie pokazano wpływu zmian współczynnika wagi w obwodzie wtórnym na charakter odpowiedzi przejściowych, bowiem jest on pomijalny dla badanego typu wymiennika. Do obliczeń wykorzystano oprogramowanie SOWA [5].

4. Podsumowanie

Wymienniki ciepła typu przepływowego, do których należy wzięty jako przykład JAD-D, wykazują tendencję do oscylacyjnych procesów przejściowych. Wynika to z dużej wydajności cieplnej tych wymienników oraz z silnych sprzężeń skrośnych między obwodami: pierwotnym i wtórnym. Dotychczasowe metody identyfikacji nie uwzględniają tego faktu. Zaproponowany tutaj model matematyczny pozwala na uzyskanie przebiegów przejściowych o różnym charakterze — poczynając od oscylacji nietłumionych, aż do przebiegów silnie rozmytych. Charakter odpowiedzi przejściowych zależy od konfiguracji wartości parametrów dynamicznych. Największy wpływ na intensywność oscylacji ma wartość współczynnika wagi w obwodzie pierwotnym. Przy niskich jego wartościach otrzymuje się oscylacje nietłumione. Natomiast wpływ stałych czasowych na tendencję do odpowiedzi oscylacyjnej jest tym mniejszy, im większe różnice między ich wartościami w obiegu pierwotnym i wtórnym (z reguły stałe czasowe obiegu wtórnego są większe).

W opisie sposobu identyfikacji komputerowej celowo wykorzystano doświadczenie i intuicję człowieka, rezygnując z zastosowania metod optymalizacji automatycznej, które z teoretycznego punktu widzenia, mogłyby posłużyć do znalezienia zestawu parametrów dynamicznych, spełniającego wybrane kryterium optymalizacji. Takie podejście jest poparte kilkunastoletnim doświadczeniem autorów w dziedzinie zastosowań symulacji komputerowej do projektowania i identyfikacji układów dynamicznych. Bezpośrednie odwołanie się do doświadczenia i intelektu specjalisty, w celu rozwiązania zagadnień technicznych o charakterze optymalizacyjnym, w każdym sprawdzonym przez autorów przypadku prowadziło do wyników pewniejszych oraz szybciej i taniej uzyskiwanych, niż podczas stosowania znanych algorytmów optymalizacji automatycznej.

Literatura

- [1] Bednarkiewicz M., Pietrzak Z.: Analiza pracy wężła ciepłej wody, wyposażonego w wymienniki typu JAD-D. Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, XI, 1979, nr 10(121).
- [2] Campbell D.P.: Dynamika procesów. PWN, 1962.
- [3] Chmielnicki W. i inni: Właściwości statyczne i dynamiczne elementów systemu ciepłowniczego — etap I. Opracowanie Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1980.
- [4] Kwiatkowski J., Cholewa L.: Zasady doboru wymienników ciepła. Technika Instalacyjna, 1974, nr 3/4.

- [5] Omylińska B., Frydliński S., Serwach A.: Symulacja komputerowa węzłów cieplnych — etap III. Uruchomienie docelowych programów symulacyjnych na maszynie cyfrowej. Opracowanie ME-RA-PIAP, Warszawa, 1980, nr rej. 2869.
- [6] Takahashi Y., Rabins M.J., Auslander D.M.: Sterowanie i systemy dynamiczne. WNT, 1976.