

doc. dr inż. ANDRZEJ SERWACH

mjr inż. STEFAN FRYDLIŃSKI

Przemysłowy Instytut

Automatyki i Pomiarów MERA-PIAP

Warszawa

## SYMULACJA PRZEPŁYWÓW W SIECIACH

*w artykule opisana jest metoda symulacji przepływów cieczy w sieciach rurociągów. Dotyczy ona szczególnie przepływu wody jako czynnika grzewczego w sieciach ciepłych. Metoda jest oparta na technice grafów więzów. W budowie modeli matematycznych sieci zastosowano koncepcję modułową. Główne moduły opisują typowe elementy sieci: rurociąg (dwa modele – dynamiczny i statyczny), charakterystykę zespołu pomp wirowych, oporność zaworu (zasuw, kłapy zwrotnej), oporność rozdzielni osiedlowej, oporność przecieku itp.*

*W pracy podano przykłady rozwiązywania zagadnień statyki i dynamiki przepływów w sieciach. Omówiono także osobliwości programowania dotyczące opisywanej metody symulacji, wynikające z cech modeli matematycznych oraz właściwości komputerów cyfrowych i użytego języka symulacji. Symulacja komputerowa jest realizowana za pomocą znanego języka symulacji procesów ciągłych CSMP.*

### 1. Wstęp

Najpopularniejsze w naszym kraju są wysokotemperaturowe, dwuprzewodowe, zdalaczynne sieci ciepłe. Ich głównymi elementami są elektrociepłownie, dwururowa sieć i rozdzielnie osiedlowe (komory), które kierują czynnikiem grzewczym do węzłów ciepłych w budynkach mieszkalnych i obiektach użyteczności publicznej. Wymagania oszczędności energii i podniesienia komfortu mieszkańców sprawiają, że coraz szersze zastosowanie w węzłach ciepłych znajdują układy automatycznej regulacji temperatury. Układy te, z hydraulicznego punktu widzenia, wprowadzają w obwody zmienne rezystancje. Podobny skutek wywołują również inne zjawiska np. awaryjne pęknięcie rurociągu, które jest skokowym dołączeniem do sieci rezystancji bocznikującej. Zmiany rezystancji powodują w sieci hydraulicznej zakłócenia, które mogą być w skrajnych przypadkach przyczyną jej niestabilnej pracy. Innym źródłem zakłóceń hydraulicznych w sieci są zmiany dyspozycyjnej wydajności źródła, takie, jak zmiany obrotów pomp obiegowych (zazwyczaj jako wynik sterowania ręcznego lub automatycznego) lub nagłe wyłączenie pompy (przypadek awaryjny).

Analiza wpływu zakłóceń hydraulicznych na pracę sieci może być efektywnie prowadzona za pomocą symulacji komputerowej.

#### Oznaczenia

f(t) — bezwymiarowa funkcja czasu z początkową wartością równą zero, symbolizującą względną wartość przewodności rozdzielni osiedlowej,

g — przyspieszenie ziemskie,

- H — różnica poziomów między wlotowym i wylotowym końcem rurociągu,
- k — liczba równoległa połączonych pomp stałobrotowych w zestawie pomp obiegowych,
- $K_v$  — współczynnik admitancji (przewodności) hydraulicznej rurociągu w warunkach przepływu turbulentnego,
- $K_{v1}$  — współczynnik admitancji szczeliny, przez którą następuje wyciek z sieci,
- $K_{v\dot{q}}$  — zastępczy współczynnik admitancji rozdzielni osiedlowej w warunkach przepływu turbulentnego,
- $K_{vs}$  — zastępczy współczynnik przepływu zaworu uwzględniający oporność instalacji (wynika z definicji roboczej charakterystyki regulacyjnej),
- n — prędkość obrotowa pompy o zmiennych obrotach w zestawie pomp obiegowych,
- $n_m$  — wartość maksymalna n,
- $p_{cp}$  — spadek ciśnienia między króćcem tłocznym i ssącym pompy,
- $p_{cpm}$  — wartość maksymalna  $p_{cp}$ ,
- $p_d$  — ciśnienie w wylotowym końcu rurociągu,
- $p_{dl}$  — pośrednia zmienna ciśnieniowa,
- $p_{dio}$  — warunek początkowy dla  $p_{dit}$ ,
- $p_{dit}$  — pośrednia zmienna ciśnieniowa po opóźnieniu transportowym,
- $p_{lp}$  — ciśnienie w króćcu wylotowym pompy uzupełniającej przecieki,
- $p_q$  — spadek ciśnienia między przyłączem zasilającym i powrotnym rozdzielni osiedlowej,
- $p_u$  — ciśnienie we wlotowym końcu rurociągu,
- $p_{ui}$  — pośrednia zmienna ciśnieniowa,
- $p_{uio}$  — warunek początkowy dla  $p_{uit}$ ,
- $p_{uit}$  — pośrednia zmienna ciśnieniowa po opóźnieniu transportowym,
- $p_v$  — spadek ciśnienia na zaworze (zasuwie, klapie zwrotnej itp.),
- $Q_{cp}$  — wydajność zespołu pomp obiegowych,
- $Q_{cpm}$  — maksymalna wydajność pojedynczej pompy obiegowej (bez obciążenia),
- $Q_d$  — przepływ w wylotowym końcu rurociągu,
- $Q_{di}$  — pośrednia zmienna przepływu,
- $Q_{dio}$  — warunek początkowy dla  $Q_{dit}$ ,
- $Q_{dit}$  — pośrednia zmienna przepływowa po opóźnieniu transportowym,
- $Q_{impl}$  — pośrednia implikowana zmienna przepływowa,
- $Q_l$  — przepływ przez szczelinę pękniętego elementu sieci (przeciek),
- $Q_p$  — przepływ ustalony przez rurociąg,
- $Q_o$  — przepływ przez rozdzielnię osiedlową,
- $Q_u$  — przepływ we wlotowym końcu rurociągu,
- $Q_{ui}$  — pośrednia zmienna przepływowa,
- $Q_{uio}$  — warunek początkowy dla  $Q_{uit}$ ,
- $Q_{uit}$  — pośrednia zmienna przepływowa po opóźnieniu transportowym,
- $Q_v$  — przepływ przez zawór (zasuwę, klapę zwrotną itp.),
- t — czas,
- T — opóźnienie transportowe fal ciśnienia propagujących przez rurociąg,

- $T_f$  — moment czasowy pojawienia się pęknięcia w sieci,  
 $Z$  — impedancja falowa rurociągu,  
 $\varrho$  — gęstość wody  
 $\varphi(h)$  — robocza charakterystyka regulacyjna zaworu.

## 2. Modułowe modele matematyczne sieci

Typowe elementy sieci są opisywane przez własne modele matematyczne, które łączą się między sobą za pomocą zmiennych wejściowych i wyjściowych. Tak więc model sieci jest konstruowany jako kombinacja modułów standardowych. Do graficznego przedstawienia modelu matematycznego użyto techniki grafów więzów [1]. Minimalny zestaw modułów zawiera modele matematyczne następujących elementów sieci: rurociągów (model dynamiczny i statyczny), baterii pomp obiegowych, zasuw, pomp uzupełniających przecieki, przewodności przecieków i osiedlowych instalacji wewnętrznych (w formie zastępczej przewodności). Jeżeli jest to niezbędne, zestaw ten może być uzupełniony przez dodanie innych elementów np.: źródła ciśnienia lub przepływu dla symulacji pominiętej części sieci w przypadkach, gdy sieć jest zbyt duża, aby mogła być symulowana w całości, akumulatorów pneumohydraulicznych (naczyń wzbiórczych zamkniętych) itp.

Moduł dynamiczny rurociągu ma decydujący wpływ na dynamikę sieci. Powinny w nim być uwzględnione zjawiska propagacji fal wzdłuż rurociągu, tarcia statycznego cieczy w warunkach przepływu turbulentnego i ciśnienia hydrostatycznego wynikającego z różnicy poziomów końców rurociągu. Te efekty są pokazane na rys. 1a, który przedstawia graf więzów modułu złożony z elementów podstawowych. Na rysunku 1b jest podany zagregowany graf więzów tego modułu, jako dwukanałowy element DLF. Moduł dynamiczny rurociągu ma cztery formy ukierunkowania, z których każda może być opisana przez dwa z czterech poniższych zestawów równań [3]

$$\left. \begin{aligned}
 p_{ui}(t) &= p_{uit}(t) + ZQ_u(t) \\
 p_{uit}(t) &= p_{ui}(t-T) \\
 &\text{z warunkiem początkowym} \\
 p_{uit}(t) &= p_{uio} \Leftrightarrow 0 \leq t \leq T \\
 p_{ui}(t) &= p_d(t) + \varrho g H + K_v^{-2} Q_d(t) |Q_d(t)| - ZQ_d(t)
 \end{aligned} \right\} \quad /1/$$

$$\left. \begin{aligned}
 p_d(t) &= p_{dit}(t) - K_v^{-2} Q_d(t) |Q_d(t)| - ZQ_d(t) - \varrho g H \\
 p_{dit}(t) &= p_{di}(t-T) \\
 &\text{z warunkiem początkowym} \\
 p_{dit}(t) &= p_{dki} \Leftrightarrow 0 \leq t \leq T \\
 p_{di}(t) &= p_u(t) + ZQ_u(t) \\
 Q_u(t) &= Q_{uit}(t) + Z^{-1} p_u(t) \\
 Q_{uit}(t) &= Q_{ui}(t-T) \\
 &\text{z warunkiem początkowym} \\
 Q_{uit}(t) &= Q_{uio} \Leftrightarrow 0 \leq t \leq T \\
 Q_{ui}(t) &= Q_d(t) - Z^{-1} [p_d(t) + \varrho g H + K_v^{-2} Q(t) |Q_d(t)|]
 \end{aligned} \right\} \quad /2/$$

$$\left. \begin{aligned}
 Q_u(t) &= Q_{uit}(t) + Z^{-1} p_u(t) \\
 Q_{uit}(t) &= Q_{ui}(t-T) \\
 &\text{z warunkiem początkowym} \\
 Q_{uit}(t) &= Q_{uio} \Leftrightarrow 0 \leq t \leq T \\
 Q_{ui}(t) &= Q_d(t) - Z^{-1} [p_d(t) + \varrho g H + K_v^{-2} Q(t) |Q_d(t)|]
 \end{aligned} \right\} \quad /3/$$

$$Q_d(t) = \frac{1}{2} Z K_V^2 [\sqrt{1 + 4Z^{-1} K_V^2 |Q_{impl}|} - 1] \text{sign } Q_{impl}$$

$$Q_{impl}(t) = Q_{dit}(t) - Z^{-1} [p_d(t) + \rho g H]$$

$$Q_{dit}(t) = Q_{di}(t - T)$$

z warunkiem początkowym

$$Q_{dit}(t) = Q_{dio} \iff 0 \leq t \leq T$$

$$Q_{di}(t) = Q_u(t) + Z^{-1} p_u(t)$$

/4/

Powyższe równania są otrzymane przez przekształcenie równań /3/, /4/, /15/ i /18/ z /2/. Forma impedancyjna  $\longrightarrow$  DLF  $\longrightarrow$  jest opisana przez równania /1/ i /2/; forma admitancyjna  $\longrightarrow$  DLF  $\longrightarrow$  przez równania /3/ i /4/; forma transmitująca przepływ  $\longrightarrow$  DLF  $\longrightarrow$  przez równania /1/ i /4/; a forma transmitująca ciśnienie  $\longrightarrow$  DLF  $\longrightarrow$  przez równania /2/ i /3/.

Przez pominięcie w module dynamicznym rurociągu zjawisk falowych, tzn. opuszczenie elementu DL w grafie z rys. 1a otrzymuje się model matematyczny modułu statycznego rurociągu, którego szczegółowy graf więzów jest pokazany na rys. 2a, natomiast graf zagregowany (dwukanałowy element SL) na rys. 2b. Możliwe są tylko trzy ukierunkowania elementu SL:

— admitancyjna  $\longrightarrow$  SL  $\longrightarrow$  opisana równaniem

$$Q_p = K_V \sqrt{|p_u - p_d - \rho g H|} \text{sign } (p_u - p_d - \rho g H) \quad /5/$$

— transmitująca przepływ  $\longrightarrow$  SL  $\longrightarrow$  opisana równaniem

$$p_u = p_d + \rho g H + K_V^2 Q_p |Q_p| \quad /6/$$

— transmitująca ciśnienie  $\longrightarrow$  SL  $\longrightarrow$  opisana równaniem

$$p_d = p_u - \rho g H - K_V^2 Q_p |Q_p| \quad /7/$$

Modele matematyczne modułów rurociągów opisane równaniami /1/ i /7/ są ważne wtedy i tylko wtedy, jeżeli:

$$p_u \geq 0, \quad p_d \geq 0 \quad /8/$$

Przekroczenie warunku /8/ oznacza wystąpienie zjawiska kawitacji, a w skrajnym przypadku rozdzielania słupa cieczy w rurociągu, co powinno być opisane modelami innego typu.

Zespół pomp obiegowych składa się na ogół z kilku równolegle połączonych pomp wirowych z kłapami zwrotnymi, z których jedna ewentualnie ma zmienną prędkość obrotową. Taki układ umożliwia ciągłą dwustopniową regulację wydajności. Uproszczony model matematyczny takiego zestawu pomp może być zrealizowany przy następujących założeniach:

- każda pompa ma typową charakterystykę paraboliczną, tzn. przy zerowym przepływie wysokość podnoszenia jest proporcjonalna do obrotów, a przy zerowym obciążeniu wydajność jest proporcjonalna do kwadratu obrotów;
- wszystkie pompy są identyczne.

W tym przypadku zestaw pomp jest opisany następującym układem równań:

$$\left. \begin{aligned} p_{cp} = 0 &\Leftrightarrow \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}} > k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2 \\ p_{cp} = \max(p_{cp1}, p_{cp2}) &\Leftrightarrow \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}} \leq k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2 \cap k > 0 \\ p_{cp} = p_{cpm} \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{n_m}\right)^2 - \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}}}{\frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}}}} &\Leftrightarrow \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}} \leq k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2 \cap k = 0 \\ p_{cp1} = p_{cpm} \sqrt{\frac{k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2}{k+1} - \frac{Q_{cp}}{(k+1)Q_{cpm}}} \end{aligned} \right\} \quad /9/$$

gdzie:

$$\begin{aligned} p_{cp2} = p_{cpm} \sqrt{1 - \frac{Q_{cp}}{kQ_{cpm}}} &\Leftrightarrow Q_{cp} \leq kQ_{cpm} \\ p_{cp2} = 0 &\Leftrightarrow Q_{cp} > kQ_{cpm} \end{aligned}$$

Model powyższy jest ważny, jeżeli  $Q_{cp} \geq 0$ .

W przypadku, gdy wszystkie pompy w zestawie są stałobrotowe, tzn.:  $\frac{n}{n_m} = 1$ , równania /9/ upraszczają się do postaci:

$$\left. \begin{aligned} p_{cp} = 0 &\Leftrightarrow \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}} > k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2 \\ p_{cp} = p_{cpm} \sqrt{1 - \frac{Q_{cp}}{(k+1)Q_{cpm}}} &\Leftrightarrow \frac{Q_{cp}}{Q_{cpm}} \leq k + \left(\frac{n}{n_m}\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad /10/$$

Graficznym przedstawieniem powyższego modułu pomp obiegowych jest specjalny element grafu więzów  $\begin{matrix} k & \xrightarrow{\quad} \\ n & \xrightarrow{\quad} \end{matrix} \text{PCH} \frac{p_{cp}}{Q_{cp}}$ , który zawiera własności źródła ciśnienia i wewnętrznej rezystancji boczniującej.

Zawory wszelkiego typu (zasuwy, kłapy zwrotne itp.) są opisane przez powszechnie znane równanie Bernoulliego w formie zawierającej roboczą charakterystykę przepływową:

$$Q_v = K_{vs} \varphi(h) \sqrt{|p_v|} \text{sign } p_v$$

Sterowanie skokiem zaworu może być zewnętrzne np. automatyczne za pomocą regulatora lub wewnętrzne, jak w przypadku kłapy zwrotnej, gdzie:

$$\varphi(h) = 1 \Leftrightarrow p_v \geq 0$$

$$\varphi(h) = 0 \Leftrightarrow p_v < 0$$

W konwencji grafów więzów równanie /11/ jest reprezentowane przez modułową rezystancję hydrauliczną  $h \xrightarrow{\quad} R_v \leftarrow \frac{p_v}{Q_v}$  w ukierunkowaniu przewodnościowym. Ukierunkowanie to jest szczególne.

Inie ważne, bowiem zerowa przewodność (zamknięcie zaworu) może być symulowana bez komplikacji (przy odwrotnym ukierunkowaniu odpowiada temu przypadkowi nieskończenie duża rezystancja). Zestaw pomp uzupełniających przecieki może być w najprostszym przypadku symulowany jako źródło stałego ciśnienia  $S_{lp} \xrightarrow{p_{lp}}$  i opisany przez proste równanie:

$$p_{lp} = \text{const} \quad /13/$$

W przypadku, gdy przecieki są porównywalne z nominalną wydajnością pomp uzupełniających, do symulacji tych ostatnich konieczne jest użycie modułu takiego, jak w przypadku pomp obiegowych, opisanego równaniami /10/.

Efekt pęknięcia rurociągu może być symulowany za pomocą rezystancji bocznikującej, tzn. połączonej z modułami rurociągów węzłem Q, modulowanej skokową funkcją czasu  $t \rightarrow R_1 \leftarrow \frac{p_1}{Q_1}$

Rezystancja ta w ukierunkowaniu admitancyjnym jest opisana równaniem:

$$Q_1 = K_{y1} \cdot 1 (t - T_f) \sqrt{p_1} \quad /14/$$

Model modułu przecieków jest ważny dla  $p_1 \geq 0$ . W przeciwnym przypadku wystąpiłoby zasysanie powietrza do rurociągu, co wymaga budowy innego modelu matematycznego.

Obciążeniem sieci są rozdzielnie osiedlowe, z których czynnik grzewczy jest dostarczany do lokalnych węzłów cieplnych. Najprostszym modelem matematycznym rozdzielni osiedlowej jest zmienna rezystancja w ukierunkowaniu admitancyjnym  $t \rightarrow R_q \leftarrow \frac{p_q}{Q_q}$ , która może być przedstawiona za pomocą równania:

$$Q_q = K_{yq} \cdot f(t) \sqrt{|p_q|} \text{sign } p_q \quad /15/$$

Ukierunkowanie admitancyjne zastosowano tutaj z tego samego powodu, co w przypadkach zaworów i oporności przecieków. Bezwymiarowa funkcja  $f(t)$  przedstawia zmiany przewodności hydraulicznej rozdzielni osiedlowej, wywołane działaniem zaworów regulatorów temperatury i/lub ciśnienia w lokalnych węzłach cieplnych.

#### 4. Procedura symulacji

Procedura symulacji składa się z dwóch części: zaprojektowania matematycznego modelu sieci i napisania programu symulacyjnego, według którego komputer automatycznie wykonuje żądane obliczenia. Ogólnie rzecz biorąc jest to procedura iteracyjna, w której występują pętle powiązań między obiema głównymi częściami i poszczególnymi krokami. Pierwszym z tych kroków jest zazwyczaj określenie danych wejściowych. Danymi wejściowymi do symulacji są schematy hydrauliczne sieci oraz charakterystyki jej elementów, np. oporność rurociągu, impedancja falowa i czas opóźnienia transportowego rurociągu, różnica poziomów końców rurociągu, charakterystyka przepływowa pompy, charakterystyka regulacyjna zasuwy itp. Charakterystyki te służą do określenia wartości parametrów występujących w równaniach opisujących moduły zdefiniowane w poprzednim rozdziale. Źródłami danych wejściowych mogą być obliczenia i dokumentacja projektowa, jak również badania eksperymentalne elementów sieci.

Następnym krokiem jest określenie celu symulacji. Od niego przede wszystkim zależą dalsze działania w części projektowej procedury. Możliwości zastosowań modeli symulacyjnych przepływów w sieciach dzielą się na dwie zasadnicze grupy w zależności od tego, czy dany problem wymaga analizy przepływów ustalonych czy też przejściowych. Do analizy przepływów ustalonych należy używać tzw. statycznych modeli sieci opartych na modułach statycznych rurociągów, natomiast do analizy procesów

sów przejściowych niezbędne jest stosowanie modeli dynamicznych, w których są wykorzystywane moduły dynamiczne rurociągów. Zatem wybór celu musi wynikać z możliwości stosowania powyższych dwóch typów modeli matematycznych sieci. Modele statyczne mogą służyć do:

- określania zastępczej przewodności rozgałęzienia sieci na podstawie znanych przewodności gałęzi zastępowanych, co jest przydatne np. do wyznaczania współczynnika przewodności rozdzielni osiedlowej, który reprezentuje sieć wewnątrzosiedlową;
- wyznaczania wartości współczynnika przewodności danej gałęzi, która zapewnia uzyskanie badanego przepływu w tej gałęzi, przy znanych przewodnościach pozostałych gałęzi i znanych charakterystykach źródła, co jest konieczne do określania parametrów kryz w przyłączach odbiorców do sieci;
- badania wpływu zmian przewodności rozdzielni osiedlowych, wywoływanych działaniem automatyki w węzłach cieplnych, na rozkład ciśnień i przepływów w sieci;
- doboru nastaw statycznych w układach regulacji ciśnień w źródle i/lub przepompowniach.

Natomiast modele dynamiczne można wykorzystać do:

- doboru nastaw dynamicznych w układach regulacji ciśnień w źródle i/lub przepompowniach;
- określenia dopuszczalnej (maksymalnej) prędkości zamykania i otwierania zasuw;
- badania stanów awaryjnych takich, jak pęknięcie rurociągu czy wyłączenie pompy.

Po ustaleniu celu symulacji należy wykonać zastępczy schemat hydrauliczny sieci, w którym umieszcza się tylko elementy mające istotny wpływ na badany proces. Uwzględnienie czy też pominięcie jakiegoś elementu w schemacie zastępczym jest dokonywane arbitralnie i poprawność decyzji zależy od doświadczenia prowadzącego symulację. Ewentualna błędna decyzja, której skutki uwidoczniają się w późniejszych fazach procedury, wymaga powrotu do tego kroku i wprowadzenia odpowiedniej korekty. Przykładowo, na rys. 3 pokazano schemat zastępczy prostej sieci rozgałęznej, a na rys. 4 — sieci pierścieniowej. Na podstawie takiego schematu buduje się graf więzów modelu matematycznego sieci przyporządkowując elementom sieci ich odpowiedniki w grafie, tzn. moduły z zestawu podanego w poprzednim rozdziale, łącząc te moduły węzłami 0 lub 1, zgodnie z ogólnymi zasadami budowy grafów więzów [1]. Jako przykłady na rys. 5 pokazano graf więzów modelu statycznego sieci z rys. 3 (model dynamiczny uzyskuje się zastępując elementy SL przez DLF), a na rys. 6 — graf więzów modelu dynamicznego sieci z rys. 4.

Postać schematu zastępczego i odpowiadającego mu grafu więzów jest również uwarunkowana możliwościami obliczeniowymi komputera, na którym prowadzi się symulację, a konkretnie ograniczenia dla języka symulacyjnego. Dlatego w przypadku bardzo rozbudowanej sieci zachodzi konieczność jej podziału na fragmenty, które muszą być modelowane osobno. Występuje wówczas problem wprowadzenia w graf (model matematyczny) elementów zastępczych, symulujących odrzucone części sieci. Elementami tymi są źródła i upusty ciśnienia, źródła i upusty przepływu oraz zastępcze rezystancje hydrauliczne. Dla przykładu, na rys. 7 jest pokazany zastępczy schemat hydrauliczny prostego fragmentu sieci. W tym przypadku odrzucono część zasilającą i dalsze odbiorniki. Rodzaje elementów, które należy umieścić w grafie więzów zamiast odrzuconych części sieci zależą przede wszystkim od tego, czy rozwiązywany jest problem statyczny czy też dynamiczny. Graf więzów modelu matematycznego dla problemu statycznego, w przytoczonym przykładzie, pokazano na rys. 8. Część zasilająca sieci od strony źródła modeluje się w tym przypadku za pomocą źródła stałego ciśnienia  $S_{ps}$  połączonego szeregowo (przez węzeł 1) z elementem rezystancyjnym  $\xrightarrow{P_{rs}} R_s$ . Część powrotną od strony źródła modeluje się natomiast za pomocą źródła stałego ciśnienia  $S_{pr}$   $\xrightarrow{P_r}$  połączonego szeregowo z elementem rezystancyjnym  $\xrightarrow{P_{pr}} R_r$ . Elementy rezystancyjne służą do odwzorowywania wpływu natężenia przepływu na spadek ciśnienia ze źródła i wzrost ciśnienia w upuscie. Są one opisywane monotonicznymi funkcjami  $p_{rs}(Q_{p1})$  i  $p_{pr}(Q_{p2})$ . Przy założeniu przepły-

wów turbulentnych, jak to uczyniono generalnie, powinna to być funkcja typu parabolicznego. Jeżeli spadki ciśnień z powodu zmian przepływów są pomijalne, wówczas pozostają czyste źródła i upusty stałociśnieniowe. Dalsze odrzucone odbiorniki zostały zamodelowane jako zastępcza admitancja

$\frac{p_{l0}}{Q_{l0}} \rightarrow R_{l0} \xleftarrow{t}$  opisywana równaniem analogicznym do równania rozdzielni osiedlowej /15/.

W przypadku symulacji problemu dynamicznego zastosowanie elementów zastępujących odrzucone części sieci jest trudniejsze, a przy tym występuje częściej; bowiem problemy dynamiczne zajmują znacznie więcej komórek pamięci komputera. Trudność polega na tym, że odrzucone części sieci są również obiektami dynamicznymi, a więc zależność między odpowiednimi parami zmiennych sprzężonych  $\langle p, Q \rangle$  nie da się przedstawić w prostej formie funkcyjnej. Wyjściem z sytuacji jest zastosowanie modulowanych źródeł i upustów. Na rysunku 9 pokazano graf więzów modelu matematycznego dynamiki dla rozważanego przykładu. Część zasilającą sieć od strony źródła przedstawiono jako źródło zmiennego w czasie ciśnienia  $\xrightarrow{t} S_{ps} \xrightarrow{p_s}$ , a część powrotną sieci od strony źródła za pomocą zmiennego w czasie źródła ciśnienia  $\xrightarrow{t} S_{pr} \xrightarrow{p_{pr}}$ . Od strony zasilania odrzucone odbiorniki przedstawiono jako upust zmiennego przepływu  $\xleftarrow{t} S_{fs} \xleftarrow{Q_{fs}}$ , a od strony powrotu jako źródło zmiennego przepływu  $\xleftarrow{t} S_{fr} \xleftarrow{Q_{rl}}$ . Zmiany w czasie przebiegów  $p_s(t)$  i  $p_r(t)$  oraz  $Q_{sl}(t)$  i  $Q_{rl}(t)$  powinny być zsynchronizowane (zwłaszcza parami), aby odwzorować dynamikę odrzuconych części sieci.

Następnym krokiem po zbudowaniu grafu więzów jest ukierunkowanie, co należy robić zgodnie z ogólnymi zasadami ukierunkowania grafów więzów [1]. Spośród elementów grafu występujących przy symulacji sieci, źródła idealne np.  $S_{Lp}$  lub z impedancją wewnętrzną np. PCH mają kierunkowość narzuconą z definicji. Elementy typu rezystancyjnego opisujące zasowy, przecieki czy rozdzielnie osiedlowe mogą być ukierunkowywane alternatywnie: admitancyjnie, jak to zrobiono w poprzednim rozdziale lub impedancyjnie, co uzyskuje się po przekształceniu odpowiednich równań z poprzedniego rozdziału tak, aby zmienne niezależne i zależne zamieniły się miejscami. Zalecana jest jednak forma admitancyjna, ze względu na łatwość uzyskania efektu zerowej admitancji (odcięcia przepływu).

Przy stosowaniu formy impedancyjnej jest niedopuszczalne, aby współczynnik przewodności w równaniu elementu w trakcie obliczeń przyjmował wartość zero.

Najwięcej możliwości ukierunkowania mają elementy symulujące rurociagi: element dynamiczny DLF — cztery możliwości i element statyczny SL — trzy możliwości. Dlatego przy ukierunkowywaniu grafu należy przede wszystkim wykorzystywać tę różnorodność wariantów. Należy przy tym zaznaczyć, że łatwiej jest ukierunkować graf modelu dynamicznego, niż statycznego, właśnie ze względu na większą liczbę wariantów kierunkowości elementu DLF w porównaniu do SL. Dla przykładu, przejście z modelu dynamicznego sieci pierścieniowej przedstawionego na rys. 6 do odpowiadającego mu modelu statycznego polega oczywiście na zastąpieniu elementów DLF przez elementy SL w odpowiednim ukierunkowaniu, ale z jednym wyjątkiem: element  $DLF_{12}$  jest ukierunkowany impedancyjnie, a takie ukierunkowanie nie jest możliwe w przypadku elementu SL. Dlatego trzeba tu zastosować element  $SL_{12}$  w formie transmitującej ciśnienie, co jednocześnie zmusza do zmiany kierunkowości elementu  $R_{q2}$  na formę impedancyjną z wszystkimi omówionymi poprzednio konsekwencjami. Jeżeli graf nie daje się ukierunkować mimo możliwości użycia różnych wariantów, oznacza to błąd w przyjętym modelu matematycznym sieci i należy wnieść odpowiednie poprawki do schematu zastępczego i odpowiadającego mu grafu.

Kolejnym etapem jest określenie funkcji wymuszających, tzn. przebiegów w czasie zmiennych wejściowych (zewnętrznych) modelu matematycznego opisanego poprzednio ukierunkowanym grafem oraz wartości współczynników w równaniach elementów grafu (modułów sieci). Przebiegi zmiennych zew-

netrznych mogą mieć postać zarówno funkcji standardowych (skokowych, o stałej prędkości narastania itp.) lub ich kombinacji, jak również dowolnych zdeterminowanych ciągów czasowych. Przebiegi stochastyczne, aczkolwiek również możliwe, nie są jednak praktycznie użyteczne w tych zagadnieniach. Wybór rodzaju funkcji wymuszających zależy przede wszystkim od celu symulacji, natomiast wartości współczynników równań określa się z wcześniej zebranych danych wejściowych, przy czym dane te trzeba uzupełniać, jeżeli nie są wystarczające. Niejednokrotnie wartości współczynników praktyczniej jest obliczać już w trakcie symulacji, umieszczając niezbędne do obliczeń zależności w początkowej fazie programu symulacyjnego. Jeżeli podczas określania współczynników stwierdza się znaczne rozbieżności między ich wartościami liczbowymi (w tych samych grupach), np. między współczynnikami przewodności hydraulicznej, oznacza to nieprawidłowości przyjętego modelu matematycznego i konieczność wprowadzenia poprawek w pierwszych stadiach procedury. Ogólnie można stwierdzić, że wartości współczynników danego typu nie powinny się różnić bardziej niż o dwa rzędy. Ostatnim krokiem części projektowej procedury jest ustalenie rodzaju i zakresu informacji wydawanej w procesie symulacji. Na ogół sprowadza się to do wyznaczenia zmiennych obserwowalnych i wyboru formy ich wydruku. W przypadkach, gdy celem symulacji jest optymalizacja parametryczna, np. optymalny dobór parametrów układu regulacji ciśnienia w przepompowni, niezbędne jest określenie wskaźnika jakości. W każdym przypadku wybrany wskaźnik jakości powinien mieć własności miary w przestrzeni rozwiązań.

Oprogramowanie użytkowe dla symulacji przepływów w sieciach jest pisane w języku CSMP [4], w który mogą być wyposażone komputery serii IBM-360 i IBM-370 oraz krajowe R-32.

Wybór typowego języka symulacji procesów ciągłych został podyktowany następującymi względami:

- języki proceduralne typu Fortran IV są bardzo uciążliwe do programowania problemów symulacyjnych ze względu na konieczność przedstawienia zjawiska, z natury rzeczy, dziejącego się równoległe w formie procedury szeregowej;
- CSMP jest powszechnie znanym językiem nieproceduralnym opartym na Fortranie IV i dzięki temu umożliwiającym wykorzystanie zalet Fortranu IV (zwłaszcza bogatej biblioteki podprogramów) z jednocześnie uniknięciem niedogodności programowania (sortowanie odbywa się automatycznie w komputerze);
- strata czasu maszynowego na translację z CSMP w Fortran IV i sortowanie automatyczne są normalnie nieistotne w odniesieniu do czasu wymaganego na przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych;
- opracowanie specjalnego, problemowo zorientowanego języka do symulacji przepływów w sieciach jest nieuzasadnione, gdyż zagadnienie to nie występuje powszechnie, aby celowe było ponoszenie niezbędnych nakładów, a poza tym język specjalistyczny niepotrzebnie ograniczyłby elastyczność proponowanej metody symulacji.

Każdy typ elementu grafu, tzn. każdy moduł sieci, jest opisany odpowiednimi równaniami. Oznacza to że można dla każdego modułu napisać typowy fragment programu, który następnie można w całości i wielokrotnie użyć przy pisaniu programu dla określonego problemu. Dzięki temu w proponowanej metodzie istnieje możliwość pisania programu komputerowego bezpośrednio z grafu węzłów, bez konieczności rozpisywania równań całej modelowanej sieci. Program taki składa się wówczas z typowych fragmentów połączonych prostymi zależnościami między zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi modułów, w sposób narzucony przez węzły 0 i 1 w grafie. Fragmenty programów opisujące moduły można przy tym używać w programie głównym albo bezpośrednio, albo jako podprogramy, tzn. CSMP-owskie funkcje MACRO lub PROCEDURE, czy też Fortranowskie podprogramy FUNCTION i SUBROUTINE. Stosowanie podprogramów jest celowe wówczas, gdy dany typ modułu występuje w grafie węzłów wielokrotnie.

Zastosowanie CSMP do symulacji przepływów w sieciach sposobem modułowym wymaga uwzględ-

nienia przy programowaniu szeregu niuansów wynikających z kolizji między właściwościami języka i cechami używanych modeli matematycznych. Przede wszystkim ze względu na często występujące w programach funkcje impulsowe i skokowe należy stosować tylko stałokrokowe metody całkowania. Zastosowanie całkowania zmiennokrokowego może w takich warunkach wywołać niestabilność obliczeń.

W modelach matematycznych dynamicznego modułu rurociągu występują równania różnicowe względem czasu z niezerowym warunkiem początkowym. Równania takie są modelowane za pomocą podprogramu typu FUNCTION, w którym jedną ze zmiennych wejściowych jest funkcja DELAY (z zerowym warunkiem początkowym). Podprogram zawiera funkcję logiczną podającą na wyjście wartość liczbową warunku początkowego lub też wartość obliczoną z funkcji DELAY — zależnie od wartości wiodącej zmiennej czasowej.

Modele matematyczne modułów przedstawione w punkcie 3 w przeważającej większości przypadków (z wyjątkiem DLF) są opisane równaniami algebraicznymi. Połączenie tych modułów we wspólny model sieci powoduje powstanie szeregu pętli sprzężeń zwrotnych typu algebraicznego (nie zawierających funkcji z pamięcią, tzn. całki lub opóźnienia czasowego). Takiego modelu matematycznego nie można symulować w CSMP bez zastosowania specjalnych zabiegów przerywania pętli algebraicznych. Użycie zalecanej w podręczniku CSMP funkcji iterującej IMPLICITE nie wchodzi tutaj w grę, bowiem pętle występują na granicy modułów, a zastosowanie IMPLICITE wymagałoby interweniowania w ich wnętrze, co likwiduje korzyści wynikające z modułowej struktury programów. Narzuca się natomiast inny sposób przerywania pętli algebraicznej polegający po prostu na przerobieniu jej na pętlę dynamiczną przez wprowadzenie elementów z pamięcią typu całki lub opóźnienia czasowego. Najprościej można to zrobić wprowadzając w dowolne miejsce pętli omówiony wyżej podprogram symulujący równanie różnicowe względem czasu z warunkiem początkowym, z tym, że dla celów przerywania pętli deklaruje się minimalny, tzn. zerowy czas opóźnienia. W ten sposób formalnie pętla algebraiczna nie istnieje, bowiem zawiera funkcję opóźnienia, zaś praktycznie opóźnienie będzie zerowe lub, co najwyżej, o jeden krok całkowania, w zależności od sposobu posortowania przez komputer sąsiednich instrukcji.

Zastosowanie powyższego formalnego przerywania pętli algebraicznej nie zawsze jest skuteczne. Wynika to stąd, że modele matematyczne typu algebraicznego nie uwzględniają rzeczywistych opóźnień zachodzących w każdym obiekcie fizycznym z jednej strony, a komputer dyskretyzuje proces ciągły z drugiej strony. Zbieżność tych dwóch przyczyn powoduje często niestabilność obliczeń, zwłaszcza, jeżeli w pętli występują funkcje nieliniowe o przeciwstawnych tendencjach wzrostu, jak to np. ma miejsce przy połączeniu elementu typu PCH, o charakterystyce monotonicznie malejącej z elementem typu  $R_0$  o charakterystyce monotonicznie rosnącej. W takim przypadku konieczne jest wprowadzenie w pętlę filtru dolnoprzepustowego zbudowanego z integratora z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, o jednostkowym współczynniku wzmocnienia. Stała czasowa filtru powinna być dobrana tak, aby nie zakłócać w sposób istotny modelowanego procesu przez rozmywanie fal ciśnienia lub przepływu, a jednocześnie, aby całkowanie nie było obciążone znacznym błędem dyskretyzacji. W praktyce stałe czasowe filtrów powinny być co najmniej o rząd mniejsze od czasów opóźnień transportowych w elementach DLF i co najmniej o rząd większe od kroku całkowania. Zaleca się, aby przy modelowaniu problemów dynamicznych stosować filtry dolnoprzepustowe na wyjściach każdego elementu DLF. W przypadku modelowania problemów statycznych wystarcza stosowanie filtrów dolnoprzepustowych tylko na wyjściach elementów generacyjnych, np. typu PCH.

Przy bardzo rozbudowanych programach może zachodzić konieczność dzielenia segmentu DYNAMIC na sekcje sortowane i niesortowane, bowiem komputer nie jest w stanie posortować całego segmentu jednocześnie. Podział taki zazwyczaj nie może być dokonany w sposób prosty, bowiem jak podkreślono wyżej, cały problem jest z reguły opisany modelem zawierającym wiele pętli sprzężeń zwrotnych i

nie można znaleźć takiego miejsca, w którym nie dochodziłoby do przecięcia któreś z pętli. Dlatego dla wszystkich zmiennych wykorzystywanych w poprzedzających sekcjach, a obliczanych w następujących sekcjach, należy w segmencie INITIAL zadeklarować wartości początkowe.

W punkcie 3 zaznaczono zakresy ważności modeli matematycznych poszczególnych modułów. W niektórych przypadkach symulacji, zwłaszcza w problemach dynamicznych, zakresy te mogą być przekraczane.

Jeżeli zachodzi podejrzenie wystąpienia takiego przypadku, celowe jest wprowadzenie w program główny odpowiedniego podprogramu fortranowskiego, którego zadaniem będzie sygnalizacja tych przekroczeń z działaniem czynnym w postaci przerwania obliczeń i wydruku wartości żądanych zmiennych stanu w chwili wystąpienia przekroczenia.

Pakiet oprogramowania modułowego FINN, umożliwiający stosowanie wyżej opisanego sposobu programowania jest zamieszczony w [5].

Napisany z uwzględnieniem powyższych zaleceń program symulacyjny powinien być sprawdzony przed przystąpieniem do właściwych obliczeń. Sprawdzenie polega na wstępnym uruchomieniu, które może być jednocześnie wykorzystane do określenia warunków początkowych. Niezależnie od tego, czy symulowany jest sieciowy problem statyczny, czy też dynamiczny, użycie CSMP narzuca „dynamiczny” sposób prowadzenia obliczeń. Oznacza to, że maszyna liczy w funkcji czasu, jako wiodącej zmiennej niezależnej. Różnica polega tylko na tym, że w przypadku problemu statycznego wynikami są wartości ustalone zmiennych stanu, a w przypadku problemu dynamicznego ich wartości bieżące. Dlatego konieczna jest znajomość wartości zmiennych wyjściowych z funkcji, z pamięcią i historią w zerowej chwili czasu. Obliczanie warunków początkowych w segmencie INITIAL z zależności statycznych, jak to zaleca podręcznik CSMP, nie jest w tym przypadku praktyczne ze względu na złożoność symulowanych problemów, które same w sobie często są właśnie obliczaniem zależności statycznych.

Zaleca się więc tutaj inny sposób postępowania, dający się streścić w poniższej sekwencji:

- 1) przyjęcie orientacyjnych wartości warunków początkowych i wprowadzenie ich do programu próbnego;
- 2) założenie w programie próbnym stałych wartości wszystkich funkcji wymuszających, przy czym wartości te powinny być ważne dla zerowej chwili czasu;
- 3) uruchomienie programu próbnego z czasem liczenia dobranym tak, aby proces przejściowy spowodowany niedopasowaniem wstępnych wartości warunków początkowych ustalił się;
- 4) przyjęcie za warunki początkowe do zasadniczych obliczeń wartości ustalonych odpowiednich zmiennych stanu z obliczeń próbnych.

Można zastosować pewną modyfikację powyższego sposobu w przypadku ustalania warunków początkowych przy symulacji problemów dynamicznych, które są zazwyczaj liczone długo przez komputer, a występujące tam oscylacje są słabo tłumione. W takim przypadku warunki początkowe obliczyć można symulując odpowiednik statyczny modelu dynamicznego i wyniki wprowadzić jako dane do segmentu INITIAL programu symulującego dynamikę.

Wstępne uruchomienie programu może wykazać szereg nieprawidłowości zarówno formalnych jak i merytorycznych (zły dobór kroku całkowania, czasu liczenia, miejsc usytuowania i wartości stałych czasowych filtrów itp.). W takim przypadku należy wprowadzić odpowiednie poprawki cofając się o krok w procedurze.

Ostatnim krokiem procedury jest wykonanie przez komputer obliczeń zasadniczych. Wyniki tych obliczeń mogą być niezadawalające zarówno z przyczyn nieprawidłowego zaprogramowania, jak również nieprawidłowego zaprojektowania modelu matematycznego. W zależności od przyczyny należy wówczas powrócić do odpowiedniego kroku.

## 5. Przykłady symulacji

### 5.1. Analiza wpływu działania automatyki węzłów cieplnych na rozkład ciśnień i przepływów w sieci

Zamiar wprowadzenia masowej automatyzacji węzłów cieplnych, uzasadniony przede wszystkim możliwościami uzyskania w ten sposób oszczędności energii, wywołał obawy wśród ciepłowników, że działanie automatyki węzłów może spowodować groźne w skutkach zakłócenia równowagi hydraulicznej sieci. Rozpowszechniony jest zwłaszcza pogląd, że pełne otwarcie zaworów regulatorów temperatury, spowodowane dostarczeniem ze źródła wody o za niskiej temperaturze spowoduje tak duże obniżenie ciśnień, zwłaszcza na końcówkach sieci, że w rezultacie odbiorcy będą znacznie bardziej niedogrzani, niż byłoby to w przypadku niewprowadzenia automatyzacji. Godny odnotowania jest przy tym fakt braku obaw przed skutkami masowego zamknięcia się zaworów regulatorów temperatury np. w przypadku gwałtownego wzrostu temperatury otoczenia, na który źródło nie zdąży zareagować. Powyższe opinie są kształtowane wyłącznie na podstawie rozważań jakościowych. Ze względów zasadniczych nie mogą być poparte danymi eksperymentalnymi — dotychczas nigdzie w kraju nie wprowadzono powszechnej automatyzacji węzłów. Tym niemniej problem jest ważny i przed wprowadzeniem masowej automatyzacji powinien być rozpatrzony. Dane ilościowe w takiej analizie mogą być, stosunkowo małym nakładem kosztów i robocizny, uzyskane za pomocą symulacji komputerowej według opisanej w tym artykule metody.

Trudności analizy złożonych układów hydraulicznych, jakimi są sieci rurociągów ciepłowniczych, są natury obliczeniowej, ale właśnie możliwości symulacji komputerowej pozwalające przewyżczać te trudności. Poniższa analiza jest próbą przedstawienia wstępnych danych ilościowych na temat skutków działania automatyki węzłów. Przeprowadzono ją na skrajnie uproszczonym modelu matematycznym sieci rozgałęznej, składający się ze źródła i trzech odbiorników — rozdzielni (komór) osiedlowych. Schemat hydrauliczny tej sieci pokazano na rys. 3.

To znaczne uproszczenie nie pozwala traktować wyników symulacji jako ostatecznych, ale z drugiej strony umożliwia łatwą interpretację wyników. Ustrzeżono się w ten sposób przed zalewem trudnej do zinterpretowania ilości informacji.

Działanie regulatorów temperatury w węzłach cieplnych odbija się na charakterystykach hydraulicznych sieci w ten sposób, że zmianie ulegają wartości przewodności hydraulicznych rozdzielni osiedlowych, które w przypadku braku automatyki mają wartości stałe. Dlatego badane były w trakcie analizy ciśnienia i przepływy w sieci dla różnych skrajnych wartości przewodności hydraulicznych rozdzielni osiedlowych. Do rozwiązania problemu użyto modelu statycznego sieci. Jego graf więzów pokazano na rys. 5.

W ORC-SPEC przeprowadzono badania eksperymentalne kilkunastu kompletnie zautomatyzowanych indywidualnych węzłów cieplnych, zasilanych z jednej komory (rozdzielni osiedlowej). Badano fragment warszawskiego osiedla Chomiczówka przy ul. Marii Dąbrowskiej. Węzły w konfiguracji szeregowo-równoległej były wyposażone w regulatory bezpośredniego działania firmy MERTIK w obwodach ciepłej wody i regulatory hybrydowe typu BTH produkcji ZA MERA-POLNA w obwodach centralnego ogrzewania. Badania te wykazały, że przewodność hydrauliczna poszczególnych węzłów w różnych warunkach zasilania i pogody zmienia się w zakresie 0,4 — 1,3 wartości nominalnej (obliczeniowej). Efekt ten jest uśredniony w rozdzielni osiedlowej na skutek niejednoczesnego działania regulatorów w węzłach i w rezultacie wahania wartości zastępczej przewodności hydraulicznej rozdzielni osiedlowej nie wykraczają poza przedział 0,6 — 1,2 przewodności nominalnej.

Powyższe wyniki stanowiły podstawę do założenia zmian przewodności poszczególnych odbiorników w obliczeniach symulacyjnych.

Użyty program symulacyjny, złożony z modułów FINN, podano w [5]. Badano trzy różne przypadki

dla sieci o tej samej strukturze przedstawionej na rys. 3.

A — duże ciśnienie dyspozycyjne źródła, małe opory rurociągów;

B — duże ciśnienie dyspozycyjne źródła, duże (czterokrotnie większe niż w przypadku A) opory rurociągów;

C — małe ciśnienie dyspozycyjne źródła, małe (jak w przypadku A) opory rurociągów.

Wartości parametrów dla poszczególnych przypadków zestawiono w tablicy 1.

W każdym przypadku badano rozkład ciśnień i przepływów w sieci dla piętnastu wariantów :

- wariant bazowy, w którym wszystkie przewodności odbiorników mają wartości nominalne;
- sześć wariantów, w których przewodność jednego wybranego odbiornika przyjmuje wartości maksymalne i minimalne;
- sześć wariantów, w których zmianom podlegają jednocześnie przewodności dwóch wybranych odbiorników;
- dwa warianty, w których wszystkie przewodności odbiorników przyjmują jednocześnie wartości skrajne.

W tablicy 2 zestawiono wartości względne ( w odniesieniu do wariantu bazowego) podstawowych zmiennych stanu: ciśnienia dyspozycyjnego w źródle i przepływów przez poszczególne odbiorniki. Analiza tych wyników pozwala na sformułowanie podanych niżej wniosków .

□ Zmiany przewodności hydraulicznej rozdzielni osiedlowych, wywołane działaniem regulatorów temperatury w węzłach cieplnych w zakresie 0,6 — 1,2 wartości nominalnej nie powodują groźnych zakłóceń hydraulicznych w sieci. W skrajnym przypadku jednoczesnego otwarcia wszystkich zaworów (wariant 14) spadek ciśnienia dyspozycyjnego w źródle nie przekracza 11 %, a w przypadku przeciwnym — jednoczesnego przycięcia wszystkich zaworów (wariant 15) przyrost ciśnienia dyspozycyjnego w źródle nie przekracza 27 %.

□ Odbiorniki niezautomatyzowane (w których przewodność względna jest równa jedności) i zautomatyzowane (o zmiennej przewodności) zakłócają się wzajemnie, z tym, że zakłócenia są mniej skuteczne dla odbiorników zautomatyzowanych niż odwrotnie. Chodzi o to, że zmiany przepływu w odbiornikach niezautomatyzowanych nie przekraczają kilku procent wartości nominalnych, natomiast zmiany przepływu w odbiornikach zautomatyzowanych, które w idealnym przypadku powinny być proporcjonalne do zmian przewodności; są znacznie tłumione przez wpływ niezautomatyzowanej części sieci.

Wzrost oporów rurociągów ma, generalnie rzecz biorąc, ujemny wpływ na działanie zautomatyzowanych sieci (abstrahując od względów energetycznych). Większe opory rurociągów powodują, co prawda nieznaczne, zmniejszenie wahań przepływu w odbiornikach niezautomatyzowanych, ale jednocześnie powodują znaczne tłumienie zmian przepływu wymuszanych zmianami przewodności (stopnia otwarcia zaworów) w odbiornikach zautomatyzowanych. Zakłócenia te są mniejsze dla odbiornika bliższego źródła.

Wyniki symulacji rozważanego tutaj prostego przypadku mogą stanowić wskazówki jak zachowywać się będą rozległe sieci, w miarę sukcesywnego wprowadzania automatyzacji węzłów. Warianty od 2 do 7 odpowiadają sieci zautomatyzowanej w 66 %. Warianty 14 i 15 dotyczą sieci kompletnie zautomatyzowanej. Takie uogólnienie pozwala wysunąć wniosek, że w miarę wzrostu stopnia zautomatyzowania danej sieci, dla uzyskania zamierzonego skutku w poszczególnych węzłach cieplnych konieczne jest intensywniejsze działanie zaworów regulatorów, tzn. działanie w szerszym zakresie zmian otwarcia. Dla przykładu, to samo otwarcie zaworów w zakresie 0,6 — 1,2 wartości nominalnej przewodności, w przypadku zautomatyzowania tylko 33% odbiorników, powoduje zmiany przepływu w odbiornikach zautomatyzowanych w zakresie 0,63 — 1,17 wartości nominalnej, natomiast w przypadku kompletnie zautomatyzowanej sieci, zakres zmian przepływu maleje do przedziału 0,69 — 1,11. Przykład ten dotyczy odbiornika 1 w przypadku A.

## 5.2. Uderzenia hydrauliczne w sieci na skutek pęknięcia rurociągu lub wyłączenia pompy obiegowej

W typowych obecnie, niezautomatyzowanych sieciach ciepłych procesy dynamiczne zachodzące przy przepływie wody mogą mieć istotne znaczenie w przypadku stanów awaryjnych, takich, jak pęknięcie rurociągu lub awaria napędu pompy obiegowej. Efekty te zilustrowano na przykładzie uproszczonej sieci, badanej w poprzednim punkcie. Oprócz parametrów równań, które występują również w modelu statycznym i są wymienione w tabelicy 1 (przypadek A), niezbędna jest tutaj znajomość parametrów dynamicznych, tzn. impedancji falowych i czasów opóźnień transportowych dla wszystkich rurociągów. Mają one następujące wartości:

$$T_1 = T_2 = 2 \text{ s}; \quad T_3 = T_4 = T_7 = T_8 = 1,5 \text{ s}; \quad T_5 = T_6 = 2,5 \text{ s}; \quad T_9 = T_{10} = 1 \text{ s};$$

$$Z_1 = Z_2 = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-5}\text{s}; \quad Z_5 = Z_6 = 2,6 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-5}\text{s};$$

$$Z_3 = Z_4 = Z_7 = Z_8 = Z_9 = Z_{10} = 3,9 \cdot 10^6 \text{ Nm}^{-5}\text{s}$$

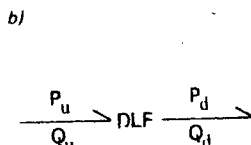
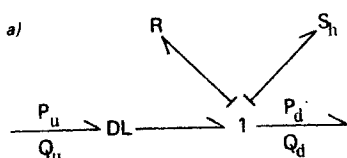
Na rysunku 10 pokazano przebiegi przejściowe ciśnień w węzłowych punktach sieci, wywołane skokowym spadkiem obrotów jednej z czterech równolegle połączonych pomp obiegowych, natomiast na rys. 11 — przebiegi tych samych ciśnień spowodowanych pęknięciami rurociągu. Bardziej intensywne zmiany zachodzą przy wyłączeniu pompy, nie należy jednak tego wyniku generalizować. Po prostu wyłączenie pompy w tym konkretnym przypadku powoduje większą zmianę ilości energii w układzie niż pęknięcie rurociągu.

## 6 Podsumowanie

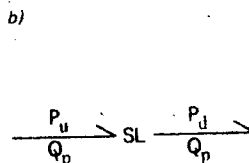
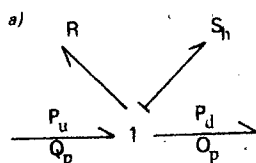
Przedstawiona w tym artykule metoda symulacji komputerowej pozwala na ciągłą w czasie obserwację przebiegów zmiennych stanu, ale tylko w wybranych punktach sieci (na końcach rurociągów). Jest to więc utrzymanie ciągłości modeli względem czasu z jednoczesną ich dyskretyzacją w przestrzeni. Z praktycznego punktu widzenia nie jest to istotne ograniczenie.

Zaletą modułowej koncepcji budowy modeli matematycznych jest możliwość znacznego uproszczenia programowania, które sprowadza się do zestawienia odpowiednich podprogramów z pakietu FINN, zgodnie z regułami języka CSMP i teorii grafów więzów. Tak więc program można napisać bezpośrednio z grafu więzów bez potrzeby rozpisywania układów równań.

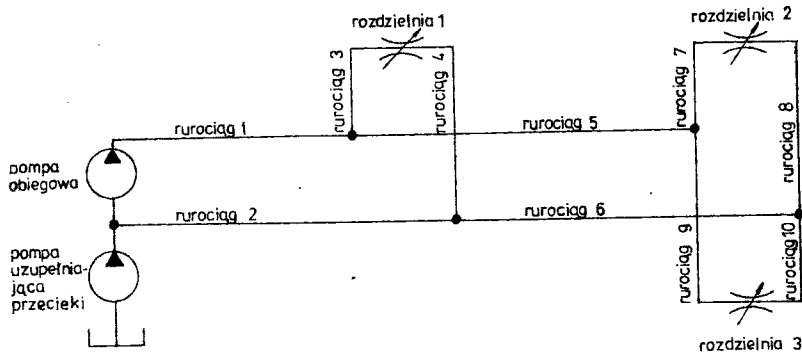
Metoda może być zastosowana, z ewentualnymi modyfikacjami, do symulacji innych rodzajów sieci rurociągów — nie tylko do sieci ciepłowniczych. Bezpośrednio można ją użyć do symulacji miejskich sieci wodociągowych.



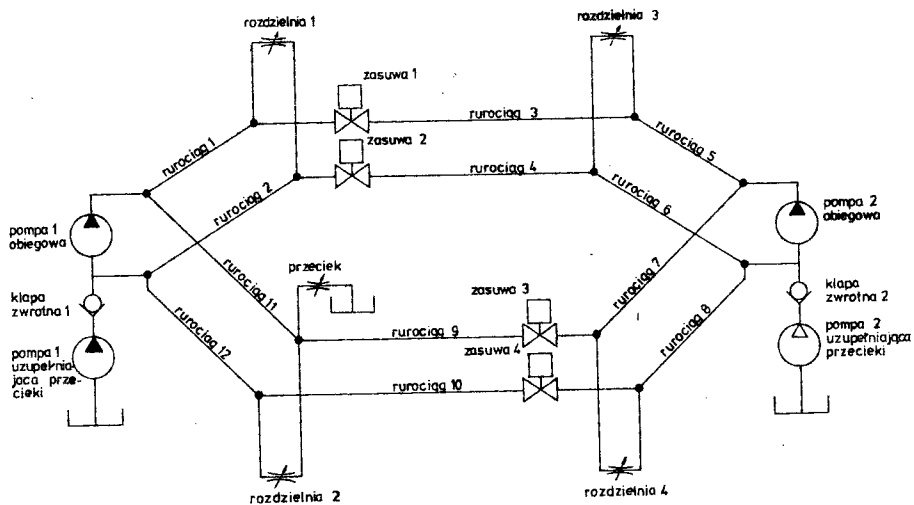
Rys. 1. Graf więzów modułu dynamicznego rurociągu  
a) szczegółowy, b) zagregowany



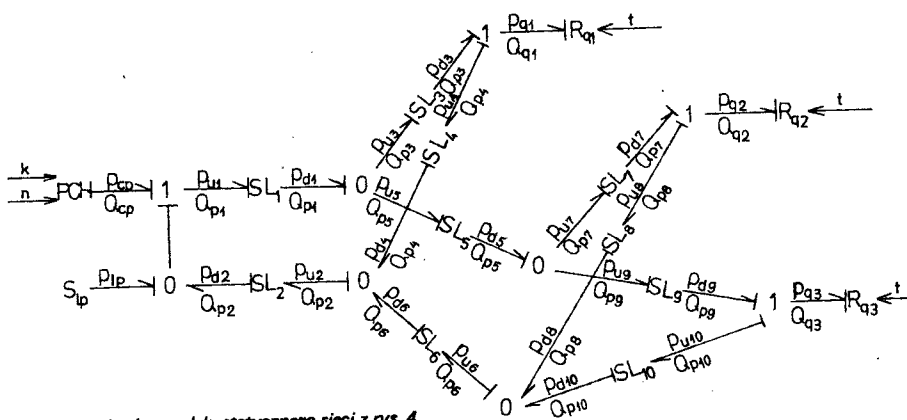
Rys. 2. Graf więzów modułu statycznego rurociągu:  
a) szczegółowy, b) zagregowany



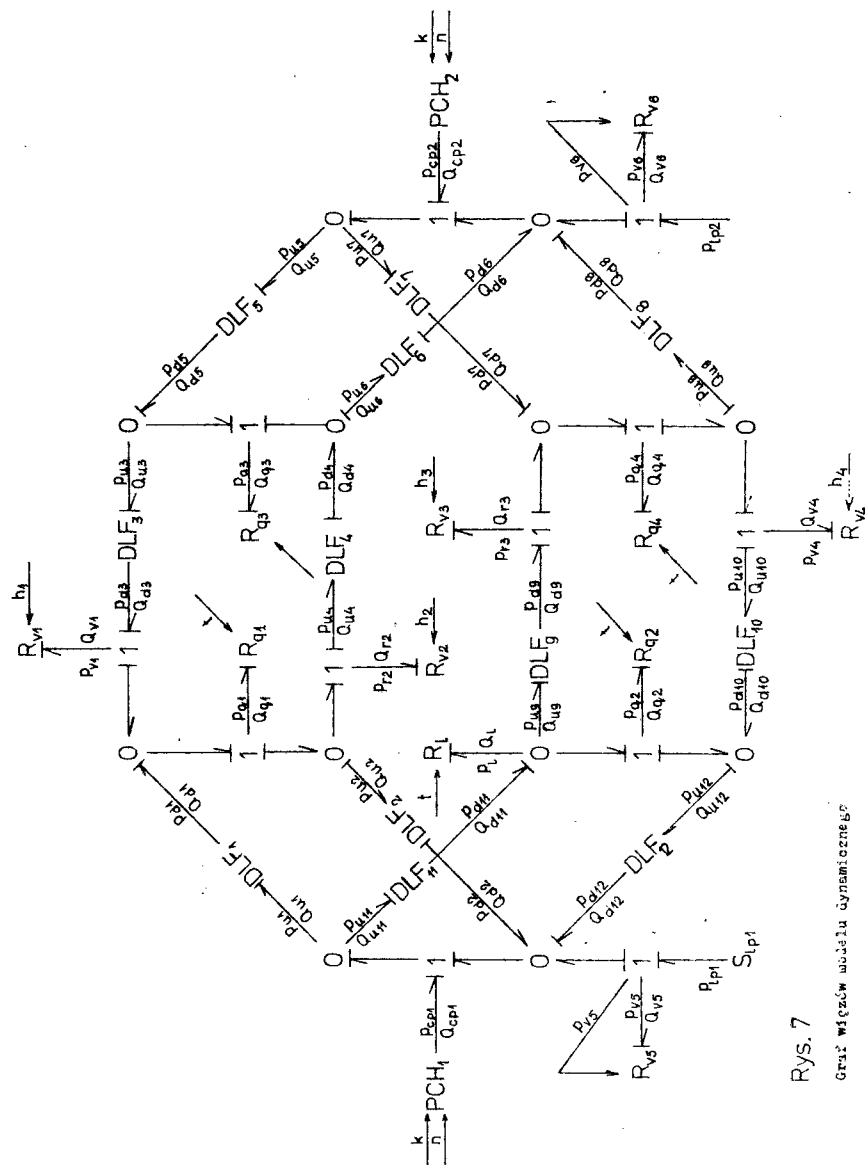
Rys. 3. Zastępczy schemat hydrauliczny prostej sieci rozgałęznej



Rys. 4. Zastępczy schemat hydrauliczny prostej sieci pierścieniowej



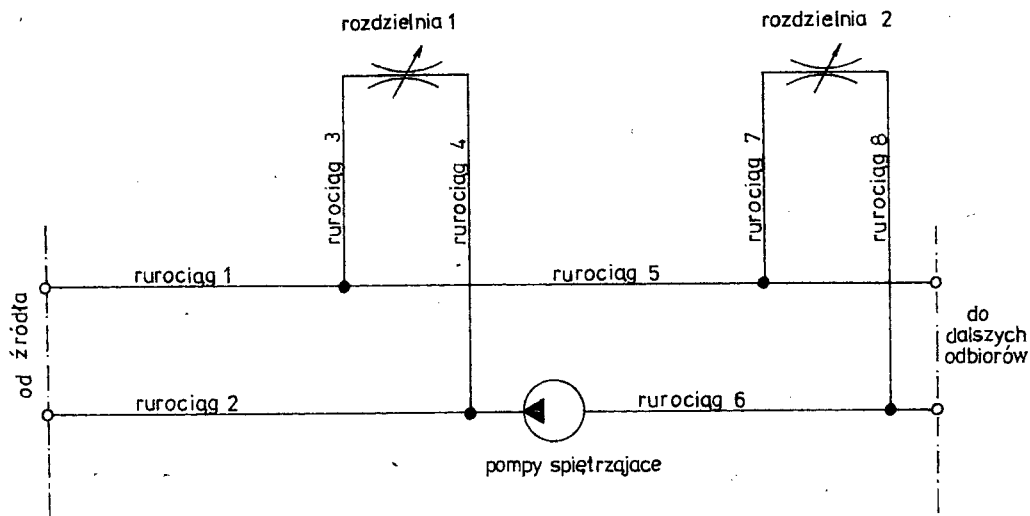
Rys. 5. Graf więzów modelu statycznego sieci z rys. 4.



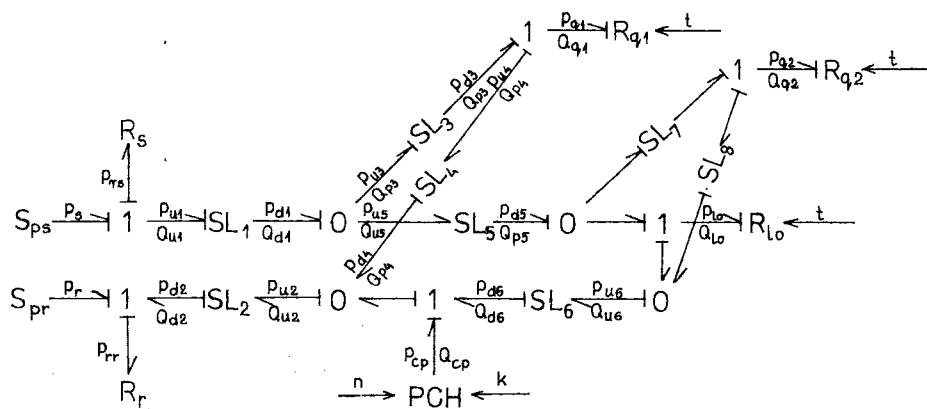
Rys. 7

Graf więzów modelu dynamicznego

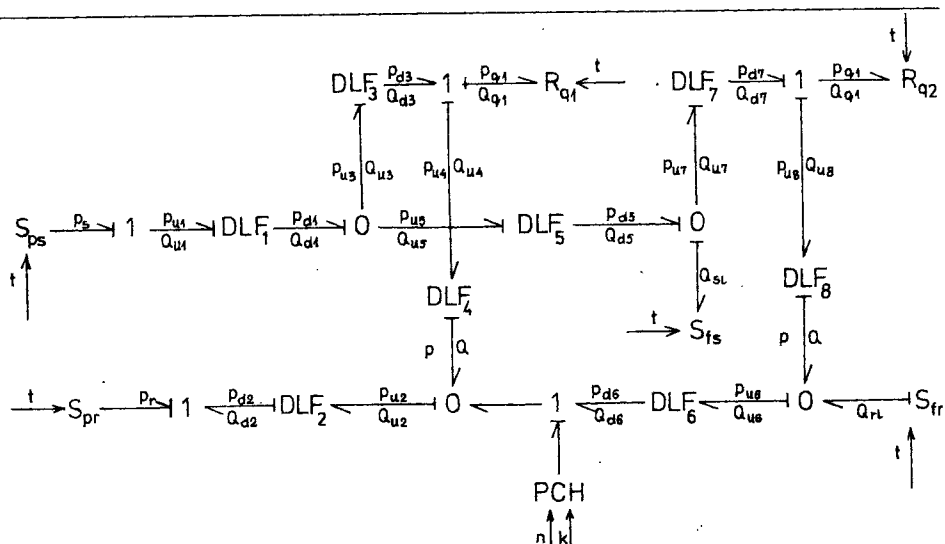
Rys. 6. Graf więzów modelu dynamicznego sieci z rys. 5



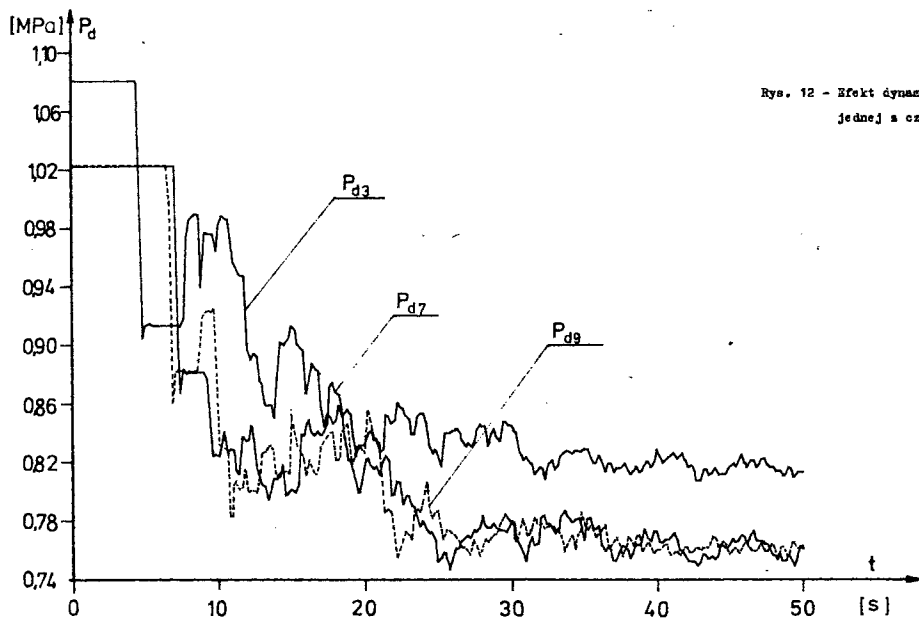
Rys. 7. Zastępczy schemat hydrauliczny wydzielonego fragmentu sieci



Rys. 8. Graf więzów modelu statycznego wydzielonego fragmentu sieci z rys. 8



Rys. 9. Graf więzów modelu statycznego wydzielonego fragmentu sieci z rys. 8.



Rys. 12 - Efekt dynamiczny jednej z czep

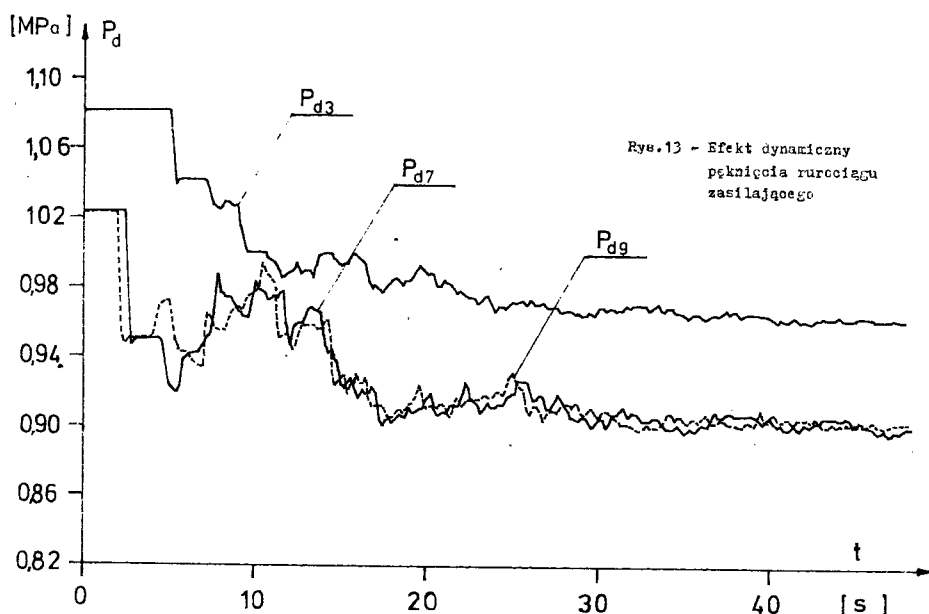
Rys. 10. Efekt dynamiczny wyłączenia jednej z czterech pomp obiegowych

Tablica 1

| Rodzaj danych                           | Symbol                                                 | Miano                        | Wartość               |                       |                       |
|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                         |                                                        |                              | Przypadek A           | Przypadek B           | Przypadek C           |
| Parametr                                | g                                                      | $m \cdot s^{-2}$             | 9,81                  | 9,81                  | 9,81                  |
|                                         | $H_1 = H_3 = H_5 = H_7 = H_9$                          | m                            | 5                     | 5                     | 5                     |
|                                         | $H_2 = H_4 = H_6 = H_8 = H_{10}$                       | m                            | -5                    | -5                    | -5                    |
|                                         | k                                                      | —                            | 3                     | 3                     | 3                     |
|                                         | $K_{v1} = K_{v2}$                                      | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $3 \cdot 10^{-3}$     | $1,5 \cdot 10^{-3}$   | $3 \cdot 10^{-3}$     |
|                                         | $K_{v5} = K_{v6}$                                      | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $2 \cdot 10^{-3}$     | $10^{-3}$             | $2 \cdot 10^{-3}$     |
|                                         | $K_{v3} = K_{v4} = K_{v7} = K_{v8} = K_{v9} = K_{v10}$ | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $10^{-3}$             | $0,5 \cdot 10^{-3}$   | $10^{-3}$             |
|                                         | $K_{vq1}$                                              | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $0,127 \cdot 10^{-3}$ | $0,129 \cdot 10^{-3}$ | $0,127 \cdot 10^{-3}$ |
|                                         | $K_{vq2}$                                              | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $0,141 \cdot 10^{-3}$ | $0,149 \cdot 10^{-3}$ | $0,141 \cdot 10^{-3}$ |
|                                         | $K_{vq3}$                                              | $N^{\frac{1}{2}} m^4 s^{-1}$ | $0,141 \cdot 10^{-3}$ | $0,149 \cdot 10^{-3}$ | $0,141 \cdot 10^{-3}$ |
|                                         | $Q_{cpm}$                                              | $m^3 s^{-1}$                 | 0,15                  | 0,15                  | 0,15                  |
|                                         | $P_{cpm}$                                              | Pa                           | $1,7 \cdot 10^6$      | $1,7 \cdot 10^6$      | $0,99 \cdot 10^6$     |
|                                         | $P_{lp}$                                               | Pa                           | $0,4 \cdot 10^6$      | $0,4 \cdot 10^6$      | $0,4 \cdot 10^6$      |
|                                         | $\xi$                                                  | $kg m^{-3}$                  | $10^3$                | $10^3$                | $10^3$                |
| Zmienna stanu dla wariantu 1 (bazowego) | $Q_{q1}$                                               | $m^3 s^{-1}$                 | 0,126                 | 0,123                 | 0,104                 |
|                                         | $Q_{q2}$                                               | $m^3 s^{-1}$                 | 0,139                 | 0,131                 | 0,114                 |
|                                         | $Q_{q3}$                                               | $m^3 s^{-1}$                 | 0,139                 | 0,131                 | 0,114                 |
|                                         | $P_{op}$                                               | Pa                           | $0,97 \cdot 10^6$     | $1,02 \cdot 10^6$     | $0,66 \cdot 10^6$     |

Tablica 2

| Wariant | Przewodność odbiorników<br>(wartości względne) |       |       |  | Podstawowe zmienne stanu (wartości względne)                            |          |          |          |  |                                                                         |          |          |          |  |
|---------|------------------------------------------------|-------|-------|--|-------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--|-------------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|--|
|         |                                                |       |       |  | Przypadek A – duże ciśnienie dyspozycyjne źródła, małe opory rurociągów |          |          |          |  | Przypadek B – duże ciśnienie dyspozycyjne źródła, duże opory rurociągów |          |          |          |  |
|         | $f_1$                                          | $f_2$ | $f_3$ |  | $Q_{q1}$                                                                | $Q_{q2}$ | $Q_{q3}$ | $P_{cp}$ |  | $Q_{q1}$                                                                | $Q_{q2}$ | $Q_{q3}$ | $P_{cp}$ |  |
| 1       | 1,0                                            | 1,0   | 1,0   |  | 1,00                                                                    | 1,00     | 1,00     | 1,00     |  | 1,00                                                                    | 1,00     | 1,00     | 1,00     |  |
| 2       | 1,2                                            | 1,0   | 1,0   |  | 1,17                                                                    | 0,98     | 0,98     | 0,96     |  | 1,14                                                                    | 0,98     | 0,98     | 0,97     |  |
| 3       | 0,6                                            | 1,0   | 1,0   |  | 0,63                                                                    | 1,04     | 1,04     | 1,08     |  | 0,66                                                                    | 1,05     | 1,05     | 1,07     |  |
| 4       | 1,0                                            | 1,2   | 1,0   |  | 0,98                                                                    | 1,16     | 0,97     | 0,96     |  | 0,98                                                                    | 1,12     | 0,97     | 0,98     |  |
| 5       | 1,0                                            | 0,6   | 1,0   |  | 1,05                                                                    | 0,64     | 1,06     | 1,09     |  | 1,04                                                                    | 0,68     | 1,07     | 1,06     |  |
| 6       | 1,0                                            | 1,0   | 1,2   |  | 0,98                                                                    | 0,97     | 1,16     | 0,96     |  | 0,98                                                                    | 0,97     | 1,12     | 0,98     |  |
| 7       | 1,0                                            | 1,0   | 0,6   |  | 1,05                                                                    | 1,06     | 0,64     | 1,09     |  | 1,04                                                                    | 1,07     | 0,68     | 1,06     |  |
| 8       | 1,2                                            | 1,2   | 1,0   |  | 1,14                                                                    | 1,13     | 0,95     | 0,92     |  | 1,12                                                                    | 1,10     | 0,95     | 0,95     |  |
| 9       | 0,6                                            | 0,6   | 1,0   |  | 0,66                                                                    | 0,67     | 1,10     | 1,18     |  | 0,69                                                                    | 0,72     | 1,12     | 1,13     |  |
| 10      | 1,0                                            | 1,2   | 1,2   |  | 0,96                                                                    | 1,13     | 1,13     | 0,92     |  | 0,97                                                                    | 1,09     | 1,09     | 0,96     |  |
| 11      | 1,0                                            | 0,6   | 0,6   |  | 1,10                                                                    | 0,68     | 0,68     | 1,18     |  | 1,09                                                                    | 0,73     | 0,73     | 1,13     |  |
| 12      | 1,2                                            | 1,0   | 1,2   |  | 1,14                                                                    | 0,95     | 1,13     | 0,92     |  | 1,12                                                                    | 0,95     | 1,10     | 0,95     |  |
| 13      | 0,6                                            | 1,0   | 0,6   |  | 0,66                                                                    | 1,10     | 0,67     | 1,18     |  | 0,69                                                                    | 1,12     | 0,72     | 1,13     |  |
| 14      | 1,2                                            | 1,2   | 1,2   |  | 1,11                                                                    | 1,10     | 1,10     | 0,89     |  | 1,10                                                                    | 1,06     | 1,06     | 0,93     |  |
| 15      | 0,6                                            | 0,6   | 0,6   |  | 0,69                                                                    | 0,70     | 0,70     | 1,27     |  | 0,72                                                                    | 0,76     | 0,76     | 1,20     |  |



Rys. 11. Efekt dynamiczny pęknięcia rurociągu zasilającego

#### Literatura

- [1] Karnopp D., Rosenberg R.C.: Analysis and Simulation of Multiport Systems – The Bond Graph Approach to Physical System Dynamics, The MIT Press, 1968.
- [2] Serwach A.: Difference Method in the Simulation of Fluid Lines. Advances in Computer Methods for Partial Differential Equations II – Proceedings of the Symposium IMACS (AICA), Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania, USA, 1977.
- [3] Serwach A.: Simulation of Hydraulic Transients in Heating Networks, Proceedings of the Third International Conference on Pressure Surges, Canterbury, England, 1980.
- [4] SOS/JS CSMP – System modelowania procesów ciągłych na emc JS. Opis języka. Opracowanie OBRKSAiP – CENTRUM MERA-ELWRO, Nr 4.2001.00028-01 35.001, Wyd. 1, Wrocław 1977.
- [5] Serwach A., Frydliński S.: Analiza zakłóceń hydraulicznych w sieci ciepłej spowodowanych pracą zautomatyzowanych węzłów ciepłych. Etap 3 – Oprogramowanie użytkowe. Opracowanie MERA-PIAP, nr rejestr. 2975, Warszawa, 1980.