

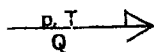
SYMULACJA TRANSPORTU CIEPŁA W SIECIACH

W artykule przedstawiono zasady nowej metody symulacji komputerowej przepływu energii cieplnej, transportowanej rurociągami za pomocą cieczy jako nośnika tej energii. Metoda może być stosowana przede wszystkim do badań symulacyjnych sieci ciepłych i stanowi rozwinięcie wcześniej opracowanej przez autora metody symulacji przepływu cieczy w sieciach rurociągów, opartej na teorii grafów więzów. W pracy podano przede wszystkim zasady rozszerzenia teorii tak, aby możliwe było odwzorowanie zjawiska sprzężonego przepływu dwóch strumieni energii — hydraulicznej i cieplnej.

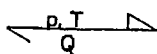
Opisana metoda służy do budowy modeli matematycznych procesów transportu energii cieplnej za pomocą czynnika nośnego (w ciepłownictwie — wody) oraz do łatwej symulacji komputerowej takich procesów. Poruszone zagadnienia są rozwinięciem problematyki opisanej w [1], [2], [3]. Dlatego bez zmian obowiązują zasady ukierunkowania grafów więzów w części dotyczącej przepływu masy (wody) oraz równania opisujące zjawiska hydrauliczne w elementach sieci cieplnej. Symulację komputerową według proponowanej metody można prowadzić korzystając z pakietu oprogramowania FINN [2] rozszerzonego o kilka podprogramów, które przedstawiają właściwości modułów dalej opisanych. W procesie transportu energii cieplnej za pomocą nośnika występują trzy zmienne stanu: ciśnienie p , przepływ Q i temperatura T . Są one sprzężone parami p z Q oraz Q z T , bowiem iloczyn skalarny $p \cdot Q$ jest mocą hydrauliczną, a iloczyn skalarny $Q \cdot T$ jest proporcjonalny do strumienia unoszonego ciepła (współczynnikiem proporcjonalności jest iloczyn gęstości cieczy przez ciepło właściwe). Graficzne przedstawienie tego sprzężonego procesu energetycznego wymaga rozwinięcia znanej teorii grafów więzów przez wprowadzenie dodatkowych konwencji. Przy tym konwencja dotycząca przepływu cieczy pozostaje bez zmian, jak w dotychczasowej metodzie. Odcinek w grafie więzów symbolizuje w tym przypadku kanał przepływu obu sprzężonych strumieni energii (hydraulicznej i cieplnej), a symbol literowy oznacza element przekształcający te strumienie energii. Przy tym, dla porządku, z jednej strony odcinka zaznacza się obie zmienne wyężeniowe p i T , a z drugiej zmienną przepływową Q .

$$\frac{p, T}{Q} A$$

Kierunek przepływu energii hydraulicznej zaznacza się półstrzałką otwartą, zgodnie z klasyczną konwencją, a kierunek przepływu energii cieplnej — półstrzałką zamkniętą. Możliwe są więc dwa przypadki:

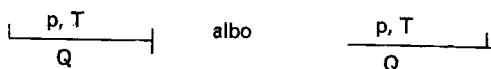


kierunek przepływu obu strumieni energii zgodny:



kierunek przepływu strumieni energii przeciwny.

Przyczynowość (wybór zmiennych niezależnych i zależnych) dla zmiennych p i Q oznacza się, jak w klasycznej teorii grafów więzów, kreską poprzeczną na końcu odcinka symbolizującego kanał przepływu energii w ten sposób, że sygnał p ma zwrot w kierunku kreski, a sygnał Q w drugą stronę. Półkreską poprzeczną na końcu odcinka zaznacza się zwrot zmiennej T . Możliwe są dwa przypadki przyczynowości:



Na tym polega istota rozszerzenia teorii grafów więzów na przypadek sprzężonego przepływu masy i ciepła w rurociągach. Należy to jednak uzupełnić trzema uwagami ogólnymi:

- podobnie, jak w klasycznej teorii grafów więzów można wprowadzić dowolny element struktury cieplno-hydraulicznej sieci, byleby go ściśle zdefiniować za pomocą równań, element taki w opisywanej metodzie będzie konsekwentnie nazywany modułem;
- przy ukierunkowaniu pełnego grafu, symbolizującego daną sieć cieplną, należy przestrzegać zasady, że najpierw ukierunkowuje się go od strony procesu hydraulicznego, według znanych zasad, a następnie od strony procesu cieplnego;
- w grafie można stosować moduły zwyrodniałe, tzn. takie, które przekształcają tylko jeden rodzaj energii, niezależnie od stanu strumienia energii sprzężonej; wówczas ukierunkowanie i przyczynowość dla danego modułu i kanałów łączących go z resztą grafu zaznacza się tylko dla tego strumienia energii, który jest przekształcony.

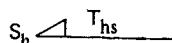
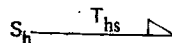
Podstawowy zbiór modułów opisujących strukturę cieplno-hydrauliczną modeli matematycznych sieci cieplnych zdefiniowano przyjmując następujące założenia ogólne:

- procesy przejściowe przy unoszeniu i wymianie ciepła są znacznie wolniejsze od hydraulicznych procesów przejściowych i dlatego przy budowie modeli matematycznych sprzężonego przepływu masy i ciepła procesy hydrauliczne można traktować jako bezinercyjne, a więc można stosować tzw. modele statyczne przepływu wody w sieciach;
- ilość ciepła wytwarzana w hydraulicznych urządzeniach generacyjnych (pompy) czy dyssypatywnych (zasuwki) jest nieznaczną w stosunku do ilości ciepła wytwarzanego w źródle i odbieranego w rozdzielniach osiedlowych; dlatego urządzenia te można traktować jako nie wywołujące zmian temperatury płynącej przez nie wody, tzn. można przedstawiać w grafie za pomocą modułów zwyrodniałych, o charakterystykach czysto hydraulicznych.

Wyróżniono trzy grupy w podstawowym zbiorze modułów struktury cieplno-hydraulicznej sieci: jednokanałowe, dwukanałowe i trójkanałowe.

Wśród modułów jednokanałowych najliczniej reprezentowane są zwyrodniałe moduły, przekształcające wyłącznie strumień energii hydraulicznej. Należą do nich wszystkie moduły jednokanałowe zdefiniowane w [2], [3]. Oprócz tego potrzebne są dwa zwyrodniałe moduły cieplne:

- idealne źródło temperatury generujące przyrost temperatury niezależnie od wartości sprzężonych zmiennych hydraulicznych;
- idealny upust temperatury generujący spadek temperatury niezależnie od wartości sprzężonych zmiennych hydraulicznych



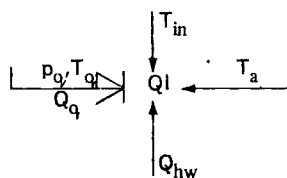
Źródło i upust temperatury mogą być modulowane zmiennymi zewnętrznymi.

Ważnym modułem jednokanałowym jest impedancja cieplno-hydrauliczna rozdzielni osiedlowej QI. Moduł ten opisuje nie tyle transport ciepła, ile jego odbiór przez wymianę, bowiem wymiana ciepła

ła jest dominującym zjawiskiem w odbiornikach sieci (węzłach cieplnych).

Zmiennymi stanu dla rozdzielni osiedlowej są: przepływ Q_Q , spadek ciśnienia p_Q i spadek temperatury T_Q . Moduł rozprasa zarówno energię cieplną jak i hydrauliczną. Od strony hydraulicznej możliwe są dwie formy przyczynowości: admitancyjna (zmienna niezależna p_Q) i impedancyjna (zmienna niezależna Q_Q) z tym, że z powodów podanych w [1],[2] i [3], w odniesieniu do modułu R_Q , zalecana jest również tutaj forma admitancyjna. Od strony cieplnej sytuacja jest taka, że do rozdzielni doprowadzana jest rurociągiem zasilającym woda o określonej temperaturze wejściowej T_{in} , a odprowadzona rurociągiem powrotnym woda o temperaturze obniżonej o T_Q . Stąd wynika forma przyczynowości odnośnie zmiennej T_Q . Mianowicie, ze względu na sens fizyczny, musi to być zmienna wyjściowa z modułu QI.

W świetle powyższego graf modułu QI ma postać:



Oprócz zmiennej T_{in} jest on modulowany sygnałami temperatury zewnętrznej T_a i rozbioru ciepłej wody użytkowej Q_{hw} . Wynika to stąd, że rozdzielnia osiedlowa zasilą węzły centralnego ogrzewania, w których ilość odbieranego ciepła zależy od temperatury zewnętrznej oraz węzły ciepłej wody użytkowej, w których ilość odbieranego ciepła zależy od rozbioru ciepłej wody.

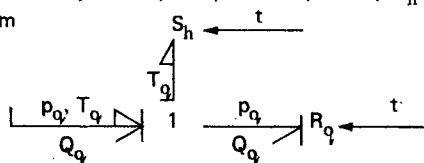
Równanie hydrauliczne dla elementu QI jest identyczne jak dla elementu R_Q z [1],[2] i [3]. Postać równań cieplnych opisujących spadek temperatury zależy od rodzaju odbiorników. Najbardziej typowym w sieciach krajowych odbiornikiem jest nieautomatyzowana instalacja centralnego ogrzewania i połączona z nią od strony zasilania sieciowego zautomatyzowana instalacja ciepłej wody użytkowej. Równania opisujące moduł QI od strony cieplnej ze względów praktycznych (pojemność komputera) powinny być jak najprostsze (por. równania opisujące przepływ cieczy). W wymienionym typowym przypadku spadek temperatury T_Q :

- rośnie ze wzrostem Q_{hw} ;
- rośnie ze wzrostem T_{in} ;
- maleje ze wzrostem T_a ;
- maleje ze wzrostem Q_Q .

Ponadto zależy od efektów dynamicznych:

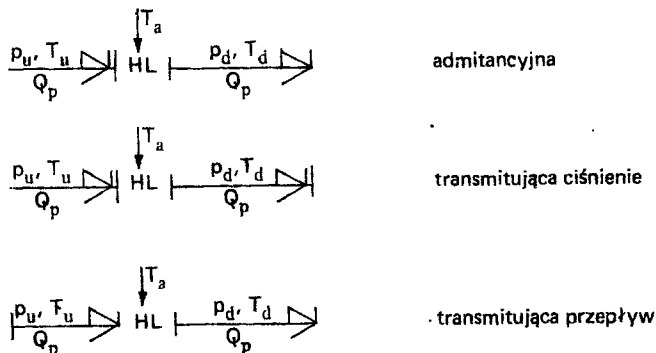
- opóźnienia transportowego, malejącego ze wzrostem Q_Q ;
- akumulacji ciepła w zładzie wody w dołączonych do rozdzielni instalacjach,
- akumulacji ciepła w budynkach.

Już ten najprostszy typowy przypadek odbiorników stwarza trudności z poprawnym sformułowaniem możliwie prostych równań cieplnych. Sytuacja komplikuje się w przypadku odbiorników innego typu, zwłaszcza zautomatyzowanych, jak np. kombinaty szklarniowe, węzły przemysłowe (z odbiorami dla wentylacji i celów technologicznych) itp. W takich przypadkach praktyczniej jest modelować odbiornik za pomocą dwóch modułów zwyrówniających: upustu temperatury S_h i elementu R_Q , połączonych węzłem wyłączeniowym



z tym, że zmiany spadku temperatury T_q muszą być zsynchronizowane w czasie ze zmianami przewodności hydraulicznej (por. równanie R_q z [1], [2], [3] tak, aby oddać istotne cechy odbiornika. Dane do określenia tej synchronizacji można uzyskać z badań eksperymentalnych (na rzeczywistym odbiorniku) lub symulacyjnych (na oddzielnie budowanym, dokładnym modelu matematycznym tego odbiornika).

Sprężony transport ciepła i masy odwzorowują przede wszystkim dwukanałowe moduły typu HL, opisujące zjawiska ciepło-hydrauliczne zachodzące w rurociągach. W modułach tych występuje pięć zmiennych stanu: ciśnienia na wlocie i wylocie rurociągu, temperatury na wlocie i wylocie oraz przepływ przez rurociąg. Ze względu na sens fizyczny możliwe są trzy formy:

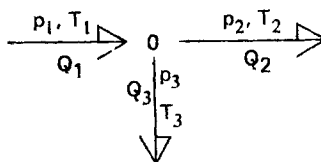


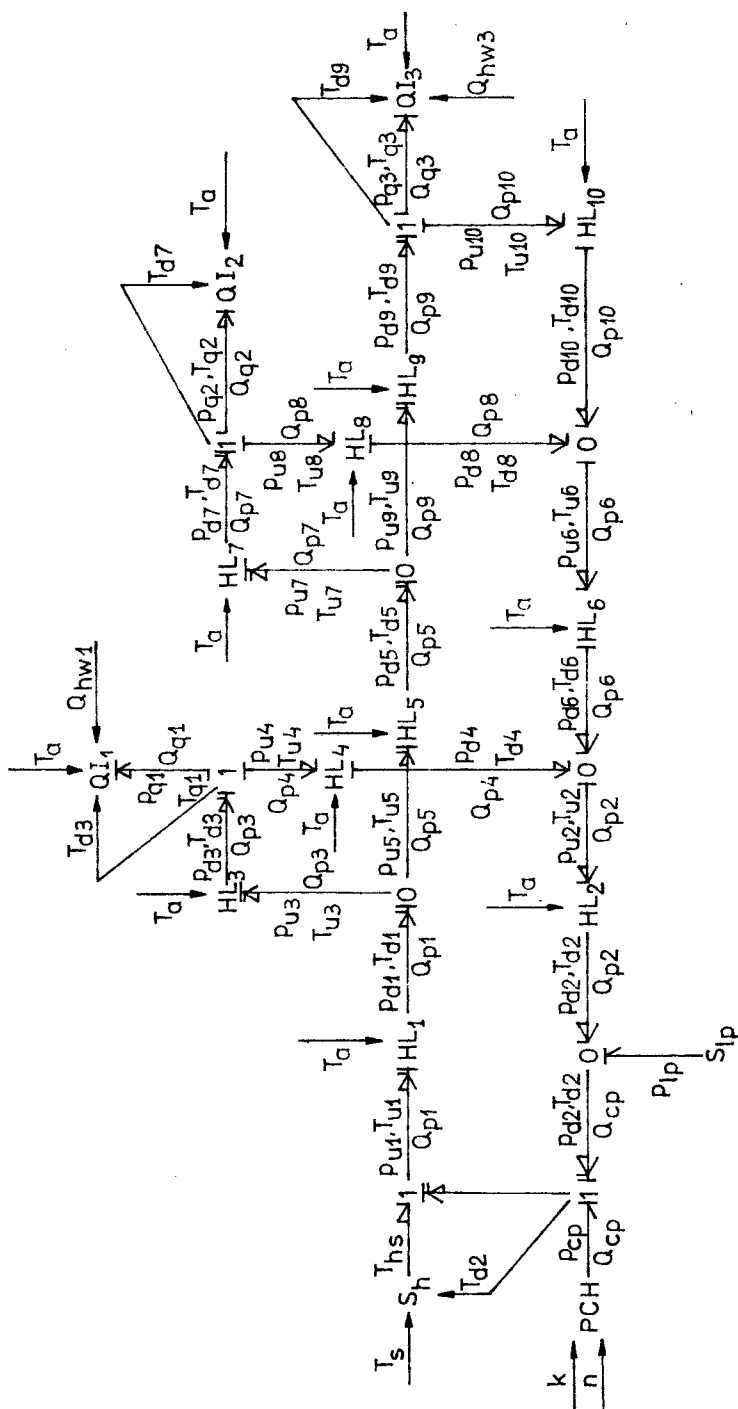
Rozróżnienie dotyczy form przyczynowości od strony hydraulicznej. Od strony cieplnej temperatura na wylocie musi być zawsze zmienną zależną, a temperatura na wlocie - zmienną niezależną. Moduł HL opisany jest takimi samymi równaniami hydraulicznymi, jak moduł SL w [2], [3]. Równania opisujące zależność temperatury na wylocie od temperatury na wlocie i od przepływu powinny uwzględniać:

- 1) zmienny współczynnik transmisji temperatury (mniejszy od jedności), malejący ze spadkiem przepływu i rosnący ze wzrostem temperatury zewnętrznej;
- 2) opóźnienie transportowe, malejące ze wzrostem przepływu;
- 3) akumulację ciepła w płaszczu izolacyjnym rurociągu (w formie inercji pierwszego rzędu, o stałej czasowej malejącej ze wzrostem przepływu).

W skład zbioru podstawowego modułów wchodzi również węzły wyłączeniowe 1 i przepływowe 0, które są elementami trójkanałowymi. Węzły wyłączeniowe zachowują właściwości takie, jak w klasycznej teorii grafów więzów, również w odniesieniu do temperatur jako zmiennych wyłączeniowych. Tak więc w węźle wyłączeniowym przepływy we wszystkich kanałach są sobie równe, natomiast suma temperatur (ewentualnie przyrostów temperatur) równa się zero. Rzecz ma się nieco inaczej dla węzłów przepływowych. W tym przypadku trzeba rozróżnić dwa rodzaje węzłów:

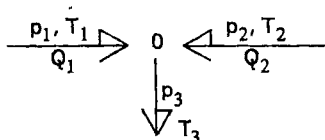
trójnik rozdzielający





Rys. 1 Graf więzów modelu matematycznego prostej sieci rozgałęznej, służącego do symulacji sprężonego przepływu ciepła i masy

trójnik mieszający



Od strony hydraulicznej oba rodzaje trójników zachowują swoje właściwości, zdefiniowane w klasycznej teorii grafów węzłów, tzn. wszystkie ciśnienia są sobie równe, a suma przepływów równa się zero. Również w trójniku rozdzielającym wszystkie temperatury są sobie równe, a więc ma on niejako właściwości klasycznego węzła O. Inaczej wygląda sprawa temperatur w trójniku mieszającym, w którym suma iloczynów temperatur przez sprzężone z nimi przepływy równa się zero. Wynika stąd np. to, że temperatura w kanale wylotowym (po zmieszaniu) jest średnią ważoną temperatur w kanałach wlotowych, przy czym przepływy w tych kanałach są współczynnikami wagi. Dla porządku należy zaznaczyć, że w przypadku dołączenia do węzła 1 lub 0 modułu zwyrodniałego (por. rozdział 5 osiedlową) powinno się w programie symulacyjnym deklarować zerowe wartości odpowiednich zmiennych w kanale łączącym:

- temperatury dla elementów czysto hydraulicznych;
- ciśnienia dla elementów czysto cieplnych dołączonych do węzła 1;
- przepływu dla elementów czysto cieplnych dołączonych do węzła 0.

Jako przykład, na rysunku 1 pokazano graf węzłów modelu cieplno-hydraulicznego prostej sieci rozgałęznej z trzema odbiornikami, której modele hydrauliczne opisano w [1], [2], [3]. Źródło ciepła w tym grafie jest przedstawione za pomocą dwóch modułów zwyrodniałych: pompowego PCH i źródła przyrostu temperatury S_h , modulowanego sygnałem nastawy temperatury regulowanej na wyjściu z ciepłowni T_s i temperatury powrotu do ciepłowni T_{d2} . Przyrost temperatury T_{hs} jest po prostu różnicą między nastawą i temperaturą powrotu.

Metoda, w zarysie opisana wyżej, może znaleźć przede wszystkim zastosowanie w badaniach symulacyjnych do określenia algorytmów sterowania siecią w odpowiedzi na zakłócenia pochodzące np. od odbiorników (zawyżone temperatury powrotu) lub ze źródła (zanizone temperatury zasilania lub zanizone ciśnienie) oraz algorytmów sterowania temperaturą wyjściową z ciepłowni. Stąd jej przydatność, zwłaszcza dla projektantów komputerowych systemów sterowania sieciami cieplnymi.

Literatura

- [1] Serwach A.: Simulation of Hydraulic Transients in Heating Networks, Proceedings of the Third International Conference on Pressure Surges, Canterbury, England, March 25–27, 1980.
- [2] Serwach A., Frydliński S.: Analiza zakłóceń hydraulicznych w sieci ciepłej spowodowanych pracą zautomatyzowanych węzłów cieplnych. Etap 3-Oprogramowanie użytkowe, Opracowani MERA-PIAP, Nr rejestr. 2975, Warszawa, 1980.
- [3] Serwach A., Frydliński S.: Symulacja przepływów w sieciach, Biuletyn MERA-PIAP 2/88, 1981.