

Marek DURNAŚ

Instytut Automatyki Przemysłowej

Politechnika Szczecińska

POMIAR ZMIENNYCH W CZASIE OPÓŹNIEŃ TRANSPORTOWYCH

Streszczenie. W wielu zagadnieniach praktycznych zachodzi potrzeba pomiaru zmiennych w czasie opóźnień, których aktualna wielkość jest niezbędna do wyznaczenia sygnałów sterujących w regulowanym obiekcie. Klasycznymi przykładami obiektów sterowania, w których istnieją niestacjonarne elementy opóźniające są sieci transportujące wodę i paliwa. Do jeszcze bardziej skomplikowanych obiektów należą sieci z zamkniętymi pętlami transportowymi jak sieci ciepłownicze czy też układy krwionośne zwierząt. Poprawne procedury sterowania tego typu obiektami wymagają dokładnej znajomości czasów opóźnień występujących aktualnie w odcinkach sieci. Pomiar zmiennego w czasie opóźnienia powinien więc polegać bieżącym określeniu jego wartości dla z góry ustalonej drogi przemieszczania się medium. W pracy przedstawiono warianty układów umożliwiających bieżący pomiar opóźnienia dla zmiennych szybkości przepływu medium w sieciach transportowych.

MEASUREMENT OF TIME –VARIABLE TRANSPORT DELAYS

Summary. There are many practical examples, where time–variable delays have to be measured. Usually, the current values of time delays are necessary for determining of signals controlling plant. Thus, the process of measuring time-variable delays should yield the current values of time-delays for set “way” of transportation of medium through the transportation network (piping system, etc.). The paper presents several variants of systems realising „on-line” measurements of delays for variable velocity of media flows. Besides of theoretical considerations the paper presents examples of application of systems to measurement of variable transport delays.

1. WPROWADZENIE

Problematyka pomiaru zmiennych w czasie opóźnień transportowych wiąże się ściśle z zagadnieniami związanymi ze sterowaniem sieciami transportowymi, w których transport odbywa się ze zmienną w czasie szybkością, co jest równoznaczne z występowaniem niestacjonarnych elementów opóźniających. Klasycznymi przykładami obiektów sterowania, w których istnieją niestacjonarne elementy opóźniające, są sieci transportujące np. wodę i paliwa. Do jeszcze bardziej skomplikowanych obiektów należą sieci z zamkniętymi pętlami transportowymi jak sieci ciepłownicze czy też układy krążenia u zwierząt. Poprawne procedury sterowania tego typu obiektami wymagają albo dokładnej znajomości czasów opóźnień występujących aktualnie w odcinkach sieci lub też bieżącego wyznaczania czasu predykcji (wyprzedzenia) dla prognozowanych zmian zapotrzebowania na ilość dostarczanego przez sieć czynnika. Zagadnienie to wydaje się nie sprawiać większych problemów pomiarowych, jednak w przypadkach, gdy jedynym dostępnym sygnałem pomiarowym jest prędkość medium lub wielkość jego przepływu przez wybrany punkt odcinka sieci, problem przestaje być trywialny. Pomiar zmiennego w czasie opóźnienia powinien bowiem polegać na bieżącym rozwiązywaniu zagadnienia:

$$S(x_1, x_2) = \alpha(x_1, x_2) \int_{t-\tau(t)}^t q(\zeta) d\zeta, \quad (1)$$

gdzie: $S(x_1, x_2)$ - odległość pomiędzy wybranymi punktami sieci, $\alpha(x_1, x_2)$ - parametr uwzględniający zmienne wymiary poprzeczne odcinka sieci pomiędzy punktami x_1 i x_2 , t - czas bieżący, $\tau(t)$ - zmienne w czasie opóźnienie transportowe, $q(t)$ - zmienny w czasie przepływ objętościowy medium przez wybrany punkt sieci. W przypadku pomiaru prędkości $v(t)$ zamiast $q(t)$, parametr $\alpha(\cdot)$ jest bezwymiarowy.

Zagadnienie to nie jest zagadnieniem typowym, gdyż poszukiwana wielkość, zmienne opóźnienie transportowe $\tau(t)$, występuje w dolnej granicy całkowania. Opóźnienie $\tau(t)$ należy wyznaczyć na podstawie znajomości mierzonego $q(t)$, przy czym zakładamy, że $q(t) > 0$ ponieważ jedynie wówczas równanie (1) posiada jednoznaczne rozwiązanie. Opóźnienie $\tau(t)$ wyznacza czas, w którym cząstka transportowanego czynnika znajdująca się w punkcie x_2 przebyła drogę od punktu x_1 do punktu x_2 w chwili t . Podobnie możemy wyznaczyć zmienne w czasie wyprzedzenie (predykcję) pod warunkiem znajomości prognozy zmian przepływu $q(t)$ w czasie $t \in (t, t + \tau(t))$

$$S(x_1, x_2) = \alpha(x_1, x_2) \int_t^{t+\tau(t)} q(\zeta) d\zeta. \quad (2)$$

Wówczas zmienna $\tau(t)$ określa czas w jakim cząstka transportowanego czynnika znajdująca się w punkcie x_1 przebędzie drogę do punktu x_2 przy prognozowanym $q(t)$.

2. METODY WYZNACZANIA ZMIENNEGO W CZASIE OPÓŹNIENIA TRANSPORTOWEGO

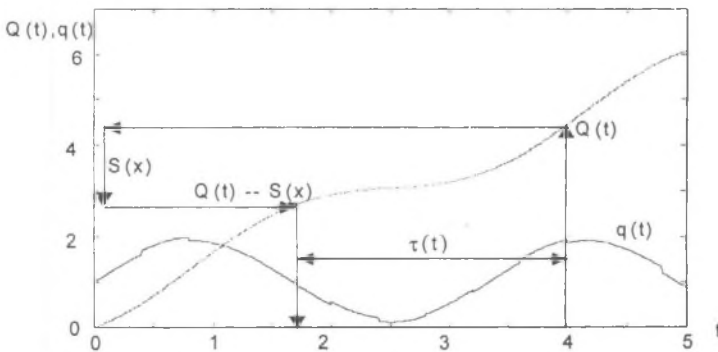
Istnieje kilka metod rozwiązania równań typu (1) lub (2) i wyznaczenia bieżącej wartości $\tau(t)$. Pierwsza z nich polega na scałkowaniu zależności (1), co prowadzi do równania funkcyjnego:

$$\frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)} = Q(t) - Q(t - \tau(t)), \text{ przy czym } Q(t) = \int_0^t q(\xi) d\xi. \quad (3)$$

Po przekształceniu, można uzyskać jawną postać $\tau(t)$ określoną wzorem:

$$\tau(t) = t - Q^{-1} \left\{ Q(t) - \frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)} \right\}, \quad (4)$$

gdzie $Q^{-1}(\cdot)$ jest funkcją odwrotną do funkcji $Q(t)$. Z wzoru (4) wynika, że przy zastosowaniu tej metody, należy całkować wielkość $q(t)$ i zapamiętywać wartość funkcji $Q(t)$ przez dostatecznie długi okres czasu T_{max} , uzależniony od przyjętego maksymalnego zakresu pomiarowego funkcji $\tau(t)$. Bezwzględny warunkiem realizowalności tego typu pomiaru jest istnienie jednoznacznej funkcji $Q^{-1}(t)$, teoretycznie w przedziale $t \in [t - \tau(t), t]$. Oznacza to, że po pierwsze wartość $q(t)$ musi być zawsze większa od zera, a po drugie, że wymaganie poprawności pomiaru w chwili $t = 0$, pociąga za sobą konieczność pomiaru wartości $Q(t)$ dla ujemnych czasów $t \in [t - \tau(t), t]$. W praktyce, w żadnym z układów pomiarowych nie można uzyskać poprawnego pomiaru w chwili jego rozpoczęcia (czas ustalenia wskazań), tak więc spełnienie drugiego z wymienionych warunków nie jest bezwzględnie wymagane. Metodę rozwiązywania zależności (4) przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Metoda wyznaczenia zmiennego w czasie opóźnienia transportowego z zależności (4)
Fig. 1. The method of determining time – variable delay on the basis of formula (4)

Na rys.1. przez $S(x)$ oznaczono $S(x) = S(x_1, x_2) : \alpha(x_1, x_2)$. Należy zauważyć, że przy okresowych zmianach wartości $q(t)$ i odpowiedniej wartości parametru $S(x) = nT$ (n jest liczbą całkowitą, natomiast T okresem zmian $q(t)$), wartość $\tau(t)$ jest wielkością stałą w czasie.

Metoda ta, pozwalająca uzyskać analityczną postać wielkości $\tau(t)$ przy zdeterminowanej postaci $q(t)$, nie jest jednak metodą umożliwiającą poprawny pomiar opóźnienia dla przypadków w których mierzona na bieżąco wartość $q(t)$ przyjmuje wartość bliską zeru w jakimkolwiek odcinku czasu. Algorytm rozwiązujący zależność (4) wpada w „pułapkę”, której obejście prowadzi do zmiany postaci wzoru wyjściowego. Ponadto aplikacja układowa do pomiaru $\tau(t)$ przy pomocy przedstawionej powyżej metody sprawia duże kłopoty.

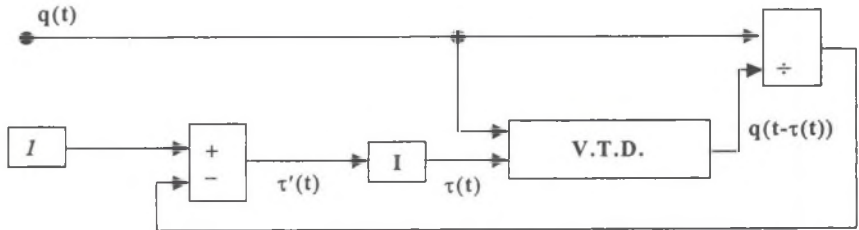
Drugą metodą, jest obustronne zróżniczkowanie zależności (1), co przy założeniu niezależności parametrów $S(x_1, x_2)$ i $\alpha(x_1, x_2)$ od czasu prowadzi do prostego równania różniczkowo – funkcyjnego pierwszego rzędu z odchylnym argumentem o postaci :

$$\frac{d\tau(t)}{dt} \cdot q(t - \tau(t)) + q(t) - q(t - \tau(t)) = 0. \quad (5)$$

Analiza kształtu równania (5) prowadzi do wniosku, że i w tym przypadku wielkość przepływu $q(t)$ musi być zawsze większa od zera, gdyż dla $q(t - \tau(t)) = 0$ równanie traci sens. Spełnienie tego warunku jest konieczne również ze względu na wymagania układowe. Układ pomiarowy, możliwy do skonstruowania, musiałby być oparty o przekształcone równanie (5) w postaci:

$$\frac{d\tau(t)}{dt} + \frac{q(t)}{q(t - \tau(t))} = 1. \quad (6)$$

Ponieważ w równaniu (6) występuje jedynie mierzona na bieżąco i zapamiętywana wartość przepływu, układ taki nie wymagałby całkowania wielkości bezpośrednio mierzonej $q(t)$. Schemat blokowy układu do symulacji pomiaru zmiennego w czasie opóźnienia transportowego bazującego na równaniu (6) przedstawiono na rysunku 2.

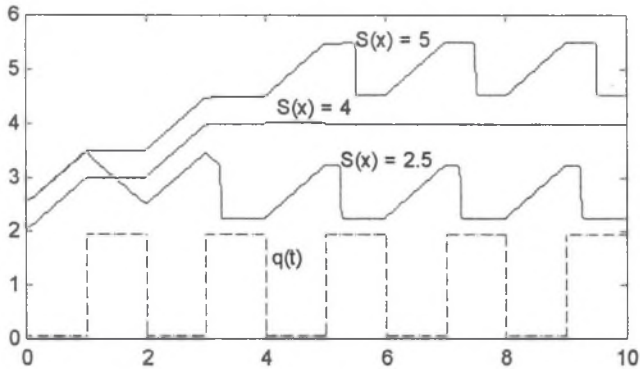


Rys. 2. Schemat układu do symulacji pomiaru zmiennego opóźnienia transportowego (V.T.D. – blok zmiennego w czasie opóźnienia transportowego, I – integrator)

Fig. 2. The block diagram of system for simulation of variable time delay (V.T.D. – variable time delay, I – integrator)

Układ ten wymaga nastawienia odpowiednich warunków początkowych. Jest to konsekwencja różniczkowania zależności (1). Ze względu na specyfikę równania (6) warunki początkowe $\tau(0)$ integratora oraz początkowa wielkość opóźnienia $\tau_p(0)$ nastawiana na bloku V.T.D. powinny spełniać zależność $\tau(0) \cdot \tau_p(0) = S(x_1, x_2) : \alpha(x_1, x_2) = S(x)$. Równanie (6) posiada proste rozwiązania analityczne jedynie dla przypadków gdy $q(t) = c \exp(bt)$. Badania

symulacyjne układu opartego na równaniu (6) wykazały, że układ ten jest wrażliwy na niedokładne nastawienie warunków początkowych oraz na wprowadzane zakłócenia pomiarowe przy małych wartościach $q(t)$. Wynika to z faktu używania w układzie elementu dzielącego. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych układu z rysunku 2, a więc przebiegi $\tau(t)$ dla różnych wartości $S(x)$ przedstawiono na rysunku 3. W trakcie badań zastosowano sygnał testujący $q(t)$ w postaci okresowej fali prostokątnej. Czas stanu przejściowego, zależy od wyboru warunków początkowych oraz od kształtu zmian przepływu $q(t)$ w czasie.



Rys. 3. Wyniki uzyskane z symulacji pomiaru opóźnienia transportowego $\tau(t)$ według zależności (6)

Fig. 3. Results of simulation of measuring of time delay obtained on the basis of formula (6)

Czas ten jest tym krótszy, im warunki początkowe będą lepiej zgadzać się z średnią wartością opóźnienia czasowego $\tau(t)$ z poprzednich okresów. Jednak w praktyce pomiarowej wielkość ta jest nieznaną. Badania wykazują, że czas stanu przejściowego nie przekracza dwukrotnej wartości parametru $T_d = S(x)/q_{sr}(t)$, gdzie q_{sr} – średni przepływ $q(t)$. Problem dzielenia przez siebie dwóch sygnałów mierzonych w równaniu (6) można w pewien przybliżony sposób wyeliminować stosując specyficzną „regularyzację” równania (5) przez podwyższenie rzędu równania wprowadzając człon $\tau''(t)$ z małym parametrem. W rezultacie otrzymujemy równanie typu

$$\varepsilon \frac{d^2 \tau(t)}{dt^2} + \frac{d \tau(t)}{dt} \cdot q(t - \tau(t)) - q(t - \tau(t)) + q(t) = 0, \quad (7)$$

przy czym $0 < \varepsilon \ll 1$. Równanie to pozwala na uniknięcie problemów numerycznych z dzieleniem sygnałów pomiarowych, natomiast dla szybkozmiennych przebiegów $\tau(t)$ pozwala na jedynie przybliżone rozwiązanie zagadnienia. Układ pomiarowy realizujący wyznaczenie zmiennego w czasie opóźnienia transportowego jest w tym przypadku bardziej skomplikowany w porównaniu do poprzedniego, natomiast pozwala na pomiar przepływu pulsującego o zmiennym znaku. W przypadku realizacji układowej równania (7) warunki początkowe wprowadzane na integrator $\tau(0)$ i blok zmiennego opóźnienia transportowego są

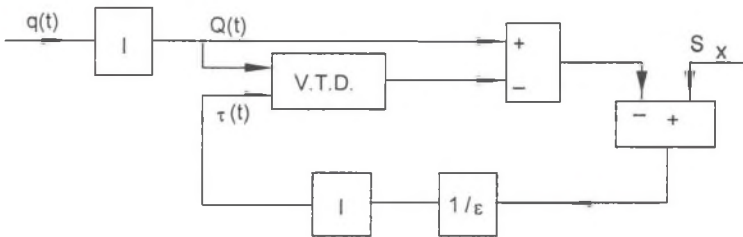
identyczne. Warunek $\tau'(0)$ powinien mieć wartość zerową. Niestety wrażliwość „błędu pomiarowego” na dobór warunków początkowych jest podobna do wrażliwości układu opartego na zależności (6). Ponieważ wykorzystanie zależności (4) do pomiaru opóźnienia sprawia trudności w początkowym okresie pomiaru, to znaczy w okresie, w którym opóźnienie nie jest jeszcze wyznaczalne proponuje się wykorzystanie modyfikacji tej zależności poprzez dodanie członu różniczkującego z małym parametrem. Otrzymuje się wówczas funkcyjne równanie różniczkowe pierwszego rzędu z odchylnym argumentem:

$$\varepsilon \frac{d\tau(t)}{dt} + Q(t) - Q(t - \tau(t)) = \frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)}, \quad (8)$$

gdzie: $0 < \varepsilon < 1$. Równanie to ma rozwiązanie analityczne dla funkcji $q(t) = c \cdot \exp(bt)$ oraz $q(t) = c + b \cdot t$ przy odpowiednio przyjętej funkcji początkowej. Kształt tego równania ma jednak prostszą formę od równania (6) i (7) ze względu na wydzieloną postać pochodnej i niższy rząd. Przekształcając równanie (8) do postaci:

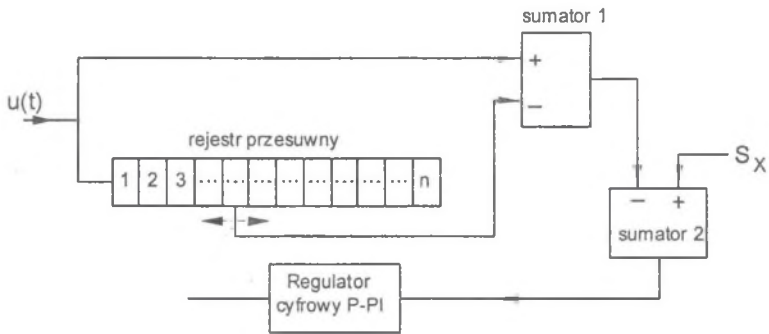
$$\frac{d\tau(t)}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} (Q(t - \tau(t)) - Q(t)) + \frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)}, \quad (9)$$

można zbudować układ ze sprzężeniem zwrotnym przedstawiony na rys.2



Rys.4. Schemat układu do symulacji pomiaru zmiennego w czasie opóźnienia $\tau(t)$. S_x – zadana odległość, I – integrator, V.T.D. – blok zmiennego opóźnienia transportowego
 Fig.4. The block diagram of system for simulation of measuring variable time delay. S_x – set distance, I – integrator, V.T.D. – variable time transport delay

W schemacie tym układ całkujący można zastąpić dowolnym układem spełniającym warunek astatyzmu (na przykład regulatorem PID), jednak najbardziej kłopotliwą sprawą jest stan przejściowy trwający od momentu rozpoczęcia pomiaru przepływu, do pojawienia się na wyjściu bloku V.D.T. sygnału z opóźnioną całką przepływu. Problem ten związany z funkcją początkową w równaniach z odchylnym argumentem, prowadzi do znacznych chwilowych zakłóceń w przebiegu wartości mierzonego opóźnienia transportowego w początkowej fazie pomiaru. Z tego względu zaleca się przyjęcie początkowego opóźnienia jako funkcji stałej o wartości równej $S_x \cdot (q(0))^{-1}$. Wzrost pomiarowy zmiennego w czasie opóźnienia transportowego ma bardzo prostą postać przedstawioną na rysunku (5).

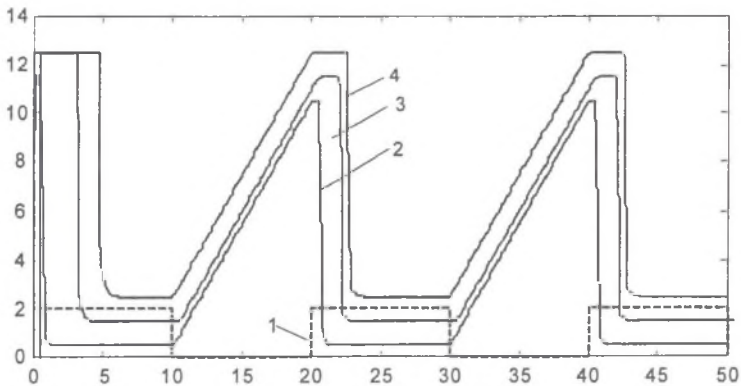


Rys. 5. Schemat przetwornika pomiarowego do pomiaru zmiennego w czasie opóźnienia transportowego. S_x – zadana odległość, $u(t)$ – sygnał wejściowy

Fig. 5. The scheme of measuring device for measurements of time - variable transport delays. S_x – set distance, $u(t)$ – input signal

W schemacie tym ilość komórek stosu n jest stosunkiem maksymalnego opóźnienia na odcinku S_x do okresu próbkowania sygnału $q(t)$.

Przeprowadzone badania symulacyjne układu do pomiaru zmiennego opóźnienia transportowego wykazały bardzo dużą zgodność wyników symulacji z rozwiązaniami analitycznymi, a przykładowe wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Wyniki uzyskane z symulacji pomiaru opóźnienia transportowego $\tau(t)$ według zależności (9) (1 – $q(t)$, 2,3,4 – $\tau(t)$)

Fig. 6. Results of simulation of measuring of time delay) obtained on the basis of formula (9) (1 – $q(t)$, 2,3,4 – $\tau(t)$)

Jak wynika z rysunku 6 aplikacja układowa przetwornika pomiarowego jest stosunkowo prosta. Niestety konieczność całkowania chwilowych wartości przepływu $q(t)$ wymaga cyklicznego zerowania integratora.

3. ZASTOSOWANIE UKŁADÓW DO POMIARU ZMIENNEGO W CZASIE OPÓŹNIENIA TRANSPORTOWEGO

Układy do pomiaru zmiennego w czasie opóźnienia transportowego mogą mieć bardzo szerokie zastosowanie w systemach sterowania sieciami ciepłowniczymi. Otóż w nowoczesnych, całkowicie zautomatyzowanych systemach ciepłowniczych występuje zagadnienie predykcyjnego sterowania źródłem ciepła w zależności od prognoz meteorologicznych oraz aktualnego poboru mocy cieplnej przez odbiorców. Sterowanie predykcyjne źródła ciepła w rozległych sieciach ciepłowniczych wymaga znajomości aktualnego rozkładu temperatury wzdłuż rurociągów magistralnych. Chwilowa wartość mocy cieplnej dostarczanej do systemu ciepłowniczego przez źródło wyraża się wzorem

$$P(t) = c_w \cdot q(t) \cdot [T_{zas}(t) - T_p(t)], \quad (10)$$

gdzie: c_w - ciepło właściwe czynnika grzewczego, $q(t)$ - przepływ, T_{zas} - temperatura wody na wyjściu ze źródła ciepła, T_p - temperatura czynnika na powrocie. Wielkość mocy cieplnej dostarczanej przez źródła do odbiorców systemu ciepłowniczego można więc zmieniać poprzez zmianę przepływu $q(t)$ oraz zmianę różnicy temperatur $T_{zas}(t) - T_p(t)$. Moc cieplna odbierana przez odbiorców systemu ciepłowniczego $P(t)$ jest funkcją temperatury $T_{er}(t)$ [1].

$$\bar{P}(t) = F(T_{er}(t), t). \quad (11)$$

Można zauważyć, że jedynie przy zachowaniu równowagi pomiędzy mocą dostarczoną do systemu i mocą odbieraną przez n odbiorców, proces sterowania wytwarzaniem ciepła będzie przebiegał bez zakłóceń. Stąd:

$$\sum_{i=1}^n F_i(T_{er}(t), t) = c_w \cdot q(t) \cdot [T_{zas}(t) - T_p(t)]. \quad (12)$$

Zachowanie tej zależności wymaga albo odpowiednich zmian $q(t)$ albo odpowiedniego dostosowania $T_{zas}(t)$. W systemach rozległych, opóźnienia transportowe (kilkugodzinne) nie pozwalają na realizację sterowania bez uwzględnienia prognoz meteorologicznych. Moc chwilowa dostarczana do odbiorców powinna być równa mocy zużywanej przez te odbiory. Każda niezgodność pomiędzy tymi wielkościami powoduje zmianę przepływu $q(t)$ w kierunku, aby spełniony był warunek (12). Osiągnięcie $q(t) = const$ jest możliwe jedynie wówczas, gdy moc dostarczana do odbiorców będzie równa mocy odbieranej w tej samej chwili [2], a więc:

$$c_w \cdot q(t) = \frac{F(T_{er}(t), t)}{T_{zas}(t + \tau) - T_p(t + 2\tau)} = const. \quad (13)$$

Ze względu na możliwe przypadki błędnych prognoz meteorologicznych i zakłóceń w odbiorze mocy cieplnej przez odbiorców, zależność (13) nie może być spełniona jedynie z dużym przybliżeniem. Należy więc wyznaczyć zmienne w czasie opóźnienie transportowe $\tau(t)$ w rurociągach magistralnych oraz oszacować rozkłady temperatur wzdłuż magistral

ciepłowniczych w celu wprowadzenia odpowiednich korekcji w sterowaniu źródłem ciepła. Sterowanie takie odbywa się w oparciu o matematyczny model systemu ciepłowniczego [3], a więc umożliwia optymalny wybór wariantu zmiany mocy cieplnej wytwarzanej w źródle.

4. WNIOSKI

Przedstawione metody wyznaczania zmiennych w czasie opóźnień transportowych pozwalają na ich realizację układową przy pomocy specjalizowanych elementów cyfrowych. Najprostszym układem w do realizacji technicznej jest układ bazujący na zależności (9). Zastosowanie układów mierzących zmienne opóźnienie transportowe może mieć szczególne zastosowanie w sterowaniu systemów ciepłowniczych minimalizując ilość aparatury pomiarowej używanej do tego celu, jak też umożliwiając predykcyjne sterowanie źródłami ciepła.

LITERATURA

1. Durnaś M, Szwed P.: The simulation of dynamics for automated heat distribution networks. 2nd ISTC "Unconventional elektromechanical and electrotechnical system Vol.2, Szczecin, December 1996.p.693 – 698.
2. Durnaś M, Szwed P.: Procesy cieplne w zautomatyzowanych sieciach ciepłowniczych o małym zasięgu, Materiały Konferencji nt: "Modelowanie i Symulacja '2000 Technika i Ekologia", Kościelisko, 19-23 czerwiec 2000r.str11 - 16
3. Durnaś M.: System predykcyjnego wyznaczania rozkładu temperatury wzdłuż odcinków sieci ciepłowniczej, Prace Trzeciej Krajowej Konferencji PES-3, Zakopane- Kościelisko. czerwiec 2001, str.327 - 335

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Brunon Szadkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 1 grudnia 2001

Abstract

There are many practical examples where time-variable delays have to be determined, mainly in order to tune signals controlling plant. The networks for water or fuel transportation are classic examples of plants under control, where elements representing non-stationary transport delays are present. The piping network for heat transportation as well as animal blood circulation system can be treated as more complicated examples of the considered systems, because they contain closed transportation loops. The correct procedures for control of technical systems of considered type should base on processing signals representing the current values of delays for chosen sections of the network. The measurement of time-variable delay should base on the current solution of a problem defined by the formula:

$$S(x_1, x_2) = \alpha(x_1, x_2) \int_{t-\tau(t)}^t q(\zeta) d\zeta \quad (1)$$

where: $S(x_1, x_2)$ – the distance between chosen elements of network

$\alpha(x_1, x_2)$ – „distributed” parameter representing geometrical dimensions of network

$q(t)$ – flow of medium through chosen points of network.

$\tau(t)$ – time - variable transport delay

The above problem seems to be a non-typical one, because one wants to find out the time-variable delay $\tau(t)$ which represents the lower limit for interval of integration. It has been assumed that distance $S(x_1, x_2)$ as well as $\alpha(x_1, x_2)$ do not depend on time (however problem can be extended and quasi-stationary changes $S(x, t)$ and $\alpha(x, t)$ can be included as well). The function $q(t)$ usually fulfils the condition $q(t) \geq 0$, or $q(t) > 0$, which makes that equation may have unique solution. The paper presents several variants of systems for measurement of time-variable delays. The metrological properties of the presented systems have been compared with each other. The proposed system bases on different methods of determining of $\tau(t)$. The first method the bases on algorithm solving the equation:

$$\tau(t) = t - Q^{-1} \left\{ Q(t) - \frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)} \right\} \quad (2)$$

where: $Q(t)$ – integral calculated for integrand $q(t)$, $Q^{-1}(t)$ – the inverse function to $Q(t)$. The second method is connected with solving the differential equation:

$$\frac{d\tau(t)}{dt} q(t - \tau(t)) + q(t) - q(t - \tau(t)) = 0 \quad (3)$$

The third method proposes the application of a follow-up system operating according to the equation:

$$\varepsilon \cdot \frac{d\tau(t)}{dt} + Q(t) - Q(t - \tau(t)) = \frac{S(x_1, x_2)}{\alpha(x_1, x_2)} \quad (4)$$

where ε – small parameter. It results from simulation experiments, that third method allows avoiding difficulties of technical nature. Besides theoretical considerations the paper presents examples of application of systems to measurement of variable transport delays.