

Urszula POCLASK
Instytut Automatyki
Politechnika Śląska

DOBÓR WŁASNOŚCI METROLOGICZNYCH PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH DLA POTRZEB
STEROWANIA UKŁADEM WODOCIĄGOWYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę oceny własności metrologicznych przyrządów pomiarowych, wykorzystującą związek pomiędzy wartością wskaźnika jakości sterowania a błędami pomiaru. Umożliwiło to określenie takiej dokładności pomiaru, która zapewni odpowiednio małą niepewność informacji, a z drugiej strony nie będzie wymagała zbyt dokładnych przyrządów pomiarowych. Metodę zilustrowano na przykładzie fragmentu układu wodociągowego.

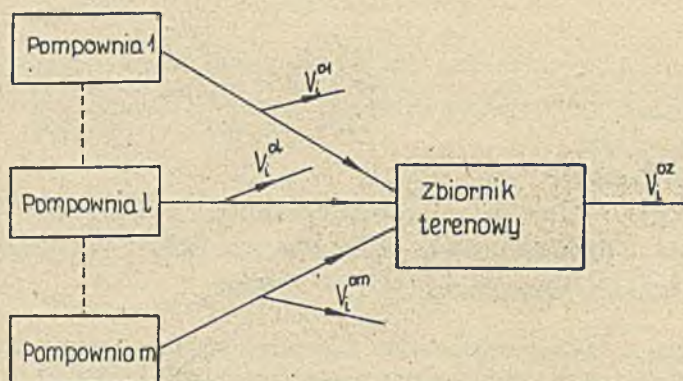
1. WSTĘP

Zagadnienie doboru aparatury pomiarowej dostarczającej informacji o stanie obiektu (środowiska) stanowi jedno z zadań projektowania systemów pomiarowych. Decyzje urządzenia sterującego i efektywność jego działania zależą od jakości i ilości informacji dostarczanej z przyrządów pomiarowych. Krytycznym zagadnieniem jest kwestia, czy niepewność otrzymanej informacji jest wystarczająco mała.

W dalszej części problem ten zostanie szerzej przedstawiony dla układu wodociągowego jako obiektu sterowania, obejmującego pompownię i zbiorniki terenowe. Typowy schemat połączeń dla takiego układu przedstawiono na rys.1.

Pompownię tłoczą wodę do zbiornika terenowego. Odbiorcy wody są podłączeni do rurociągów tłocznych pompowni oraz do rurociągu wyjściowego ze zbiornika. Pobory wody V_1^{ol} i V_1^{oz} (gdzie $l = 1, \dots, m$, $i = 1, \dots, 24$) są zmiennymi losowymi. Potrzeby odbiorców muszą być zaspokajane w $\alpha \cdot 100\%$. Algorytm optymalnego sterowania przedstawiony w pracy [1] wyznacza harmonogram wydajności każdej pompowni V_1^{op} w kolejnych $i = 1, 2, \dots, 24$ godzinach na okres jednej doby. Wskaźnikiem jakości sterowania jest dobowy koszt energii elektrycznej.

Realizacja harmonogramu wymaga wyposażenia pompowni i zbiornika w aparaturę pomiarową do kontroli natężenia przepływu w rurociągach tłocznych pompowni oraz poziomu wody w zbiorniku. Znajomość wartości natężenia przepływu jest konieczna głównie dla kontroli pracy układów regulacji wydajności. Z losowego charakteru zmiennych losowych V_1^{ol}



Rys.1. Schemat układu wodociągowego.

i V_i^{oz} wynika losowy charakter poziomu wody w zbiorniku h_i^z . Jego wartość dla poszczególnych okresów sterowania może różnić się od wartości wyznaczanej przez harmonogram. Ponieważ zaspokojenie odbiorców z prawdopodobieństwem α w okresie $i+1$ wymaga, aby na końcu i -tego okresu było zgromadzone co najmniej ΔV_i^z wody, zachodzi konieczność ciągłego pomiaru poziomu wody w zbiorniku.

2. DOBÓR ZAKRESU POMIAROWEGO

2.1. Pomiar natężenia przepływu

Zakres zmian natężenia przepływu w rurociągu tłocznym pompowni wyznaczają :

- v_{\max}^{pl} określane przez punkt pracy N pomp w l -tej pompowni, gdzie n - liczba pomp w l -tej pompowni,
- $v_i^{pl} \min = \min (\bar{v}_i^{ol} + \Delta V_i^{ol})$, $i = 1, \dots, 24$ /1/

gdzie :

$$\bar{v}_i^{ol} = \int_{-\infty}^{\infty} v_i^{ol} f_{1i}(v_i^{ol}) dv_i^{ol}$$

- ΔV_i^{ol} - ilość wody odpowiadająca zmianom poborów od wartości średniej przy zaspokojeniu potrzeb odbiorców w $\alpha \cdot 100\%$,
- $f_{1i}(v_i^{ol})$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej v_i^{ol} . Funkcja $f_{1i}(v_i^{ol})$ jest symetryczna wokół wartości średniej \bar{v}_i^{ol}
- N - maksymalna liczba pomp w k -tej pompowni

- $\min (\bar{V}_1^{ol} + \Delta V_1^{ol})$ - najmniejsza wartość spośród wszystkich wartości dla $i = 1, \dots, 24$, $l = \text{const}$

2.2. Pomiar poziomu

Dolną granicę zakresu pomiarowego pomiaru poziomu określa wartość h_{\min} wynikająca z warunków technologicznych eksploatacji zbiornika. Górną granicę wyznacza h_{\max} , określoną przez maksymalną, dopuszczalną pojemność zbiornika.

3. OCENA DOKŁADNOŚCI POMIARU

3.1. Ocena dokładności pomiaru poziomu

Niech przetwornik pomiarowy poziomu będzie obciążony błędem przypadkowym $\Delta h(t)$ o charakterze losowym. Równanie pomiaru poziomu ma postać :

$$h^r_i = h^z_i - \Delta h(t),$$

gdzie : h^r_i - wartość wielkości mierzonej w i -tym okresie sterowania,
 h^z_i - wskazanie przyrządu w i -tym okresie sterowania.

Szczególnie istotne znaczenie dla układu sterowania ma występowanie błędu dodatniego, ponieważ może to doprowadzić do ograniczenia odbiorców. Aby takiego stanu uniknąć, należałoby w każdym okresie sterowania zgromadzić w zbiorniku dodatkowo $V_h(t) = \Delta h(t) \cdot A$ wody. Ponieważ a priori nieznana jest postać sygnału $\Delta h(t)$, należy wyznaczyć taką wartość graniczną $\Delta h_g = A$, odpowiadającą poziomowi ufności γ , której zgromadzenie w zbiorniku pozwala na skompensowanie błędu $\Delta h(t)$, przy poziomie poborów wody określonym przez prawdopodobieństwo α .

Zaspokojenie odbiorców za zbiornikiem z prawdopodobieństwem α w okresie $i+1$ wymaga, aby w zbiorniku na końcu i -tego okresu było zgromadzone co najmniej ΔV_1^z wody. Po i okresach sterowania prawdopodobieństwo zgromadzenia w zbiorniku nie mniejszej ilości wody niż ΔV_1^z wody wynosi:

$$\int_{\Delta V_1^z}^{\infty} f_1^z(V_1^z) dV_1^z = \alpha, \quad /2/$$

gdzie : $f_1^z(V_1^z)$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej V_1^z .

Pobór wody ze zbiornika w $i+1$ okresie sterowania, który chcemy zaspokoić w $\alpha \cdot 100\%$, jest zawarty w przedziale :

$$\overline{V_{i+1}^{oz}} - \Delta V_{i+1}^{oz} \leq V_{i+1}^{oz} \leq \overline{V_{i+1}^{oz}} + \Delta V_{i+1}^{oz}$$

$$\int_{\overline{V_{i+1}^{oz}} - \Delta V_{i+1}^{oz}}^{\overline{V_{i+1}^{oz}} + \Delta V_{i+1}^{oz}} f_{z \ i+1} (V_{i+1}^{oz}) dV_{i+1}^{oz} = \beta$$

gdzie : $f_{z \ i+1}$ - funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa zmiennej V_{i+1}^{oz} .

Prawdopodobieństwo α jest równe iloczynowi trzech wartości :

$$\alpha = \gamma \cdot \beta \cdot \eta \quad /3/$$

Powyższy warunek jest podstawą do wyznaczenia wartości poziomu ufności η .

3.2. Ocena dokładności pomiaru przepływu

Wydajność l-tej pompowni w i-tej godzinie V_i^{pl} , określona przez algorytm optymalnego sterowania, stanowi wartość zadaną dla układu regulacji wydajności. Załóżmy, że l-ta pompownia jest wyposażona w N pomp wirowych połączonych równolegle. Niezależnie od sposobu regulacji (działanie na zaworze tłocznym lub zmiany prędkości obrotowej) regulacją objęta jest jedna pompa, a pozostałe (N-1) pracują przy otwartej zasuwie i przy nominalnych obrotach.

Na skutek błędów pomiaru oraz organów wykonawczych wartość natężenia przepływu V_i^{wl} w rurociągu wyjściowym z pompowni różni się od wartości zadanej V_i^{pl} wyznaczonej przez algorytm. Błąd $\Delta V^1 = V_i^{pl} - V_i^{wl}$ jest zmienną losową, co wynika z losowego charakteru błędów przyrządu pomiarowego i organu wykonawczego. Aby błąd ΔV^1 nie spowodował niezaspokojenia potrzeb odbiorców, wydajność pompowni powinna wzrosnąć o wartość graniczną ΔV_g^1 .

Założmy, że :

- wartość graniczna błędu ΔV^1 wynosi ΔV_g^1 dla poziomu ufności ζ ,
- prawdopodobieństwo wystąpienia poborów w przedziale

$$\overline{V_i^{ol}} - \Delta V_i^{ol} \leq V_i^{ol} \leq \overline{V_i^{ol}} + \Delta V_i^{ol} \quad \text{wynosi } \varrho .$$

Poziom ufności ζ musi spełniać warunek :

$$\zeta = \frac{\alpha}{\varrho}$$

Określenie błędu przyrządu pomiarowego wymaga wydzielenia z błędu ΔV^1 błędu organu wykonawczego. Zakładając, że oba błędy mają rozkład normalny, wartość graniczna błędu przyrządu pomiarowego dla poziomu ufności ζ wynosi :

$$\Delta V_{gp}^1 = G_p^1 \cdot t_{\xi},$$

$$\text{gdzie: } G_p^1 = \frac{\Delta V_g^1}{\sqrt{2} t_{\xi}}$$

t_{ξ} - wartość bezwymiarowej zmiennej standaryzowanej dla poziomu ufności ξ .

Ze wzrostem wartości błędu ΔV_g^1 rośnie wydajność pompowni, a tym samym koszt energii elektrycznej. Przy doborze przyrządu pomiarowego do pomiaru natężenia przepływu należy więc przeprowadzić podobną analizę zależności kosztu energii i ceny przyrządu od dokładności pomiaru, jak to miało miejsce dla pomiaru poziomu.

4. DOBÓR PRYZRĄDÓW DO POMIARU POZIOMU I NATĘŻENIA PRZEPŁYWU

Z przedstawionej w pkt.3 oceny wynika, że skompensowanie błędu Δh_g i ΔV_g^1 wymaga tym większego wzrostu wydajności pompowni, im większa jest wartość błędów granicznych. Jeżeli czas eksploatacji przyrządu o błędzie granicznym Δg wynosi T , to całkowity koszt wynikający z jego zastosowania określa zależność:

$$S(\Delta g) = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P \left\{ \left[K_k^j(\Delta g) - K^j \right] \frac{T}{24} \right\} + c(\Delta g),$$

gdzie: K_k^j - koszt energii elektrycznej zużytej przez system przy kompensacji błędu przyrządu po 24 godzinach eksploatacji dla j -tego harmonogramu,

$c(\Delta g)$ - cena przyrządu,

K^j - koszt energii elektrycznej zużytej przez system po 24 godzinach eksploatacji dla $\Delta g = 0$ i j -tego harmonogramu,

P - liczba harmonogramów występujących w ciągu okresu eksploatacji przyrządu.

Ponieważ błędy pomiaru poziomu i przepływu występują równocześnie, zadanie doboru przyrządów polega na minimalizacji funkcji S , obejmującej koszt równoczesnej kompensacji wszystkich błędów.

Niech zbiór Ω będzie zbiorem określonym w przestrzeni R^{m+1} zmiennych $\Delta V_g^1, \dots, \Delta V_g^m, \Delta h_g$, przy czym zmienne przyjmują tylko wartości dyskretne. Jeżeli r_1, n oznaczają kolejno ilość przyrządów pomiarowych możliwych do zastosowania dla pomiaru natężenia przepływu w l -tej pompowni i poziomu w zbiorniku, to iloczyn $1 \cdot r_1 \cdot n$

określa liczbę różnych kombinacji oprzyrządowania układu. To znaczy zmienna ΔV_g^1 przyjmuje r_1 różnych wartości, a zmienna Δh_g n różnych wartości.

Oznaczmy przez $\Delta_{gu} = [\Delta V_g^1 u \dots \Delta V_g^m u, \Delta h_{gu}]$ wektor, którego składowe określają wartości graniczne błędów dla u-tej kombinacji. Całkowity koszt wynikający z zastosowania przyrządów pomiarowych dla u-tej kombinacji oprzyrządowania, tzn. określany dla wektora Δ_{gu} , wynosi:

$$S_u = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p [K_k^j u - K^j] \frac{T}{24} + c_u, \quad /4/$$

gdzie: $K_k^j u$ - koszt energii elektrycznej zużytej przez system przy kompensacji błędów przyrządów dla Δ_{gu} po 24 godzinach eksploatacji dla j-tego harmonogramu,

$c_u = c(\Delta_{gu})$ - sumaryczna cena wszystkich przyrządów dla u-tej kombinacji.

Przyjmijmy zależność /4/ dla $u=1, \dots, 1 \cdot r_1 \cdot n$ jako definicję funkcji S określonej na zbiorze Ω . Wektor Δ_{gu} , dla którego funkcja S ma wartość najmniejszą, wyznacza optymalny zestaw przyrządów.

5. OPIS WYNIKÓW

Przykład

Rozpatrzmy układ wodociągowy obejmujący dwie pompownie Urbanowice i Paprocany oraz zbiornik Mikołów.

Założenia:

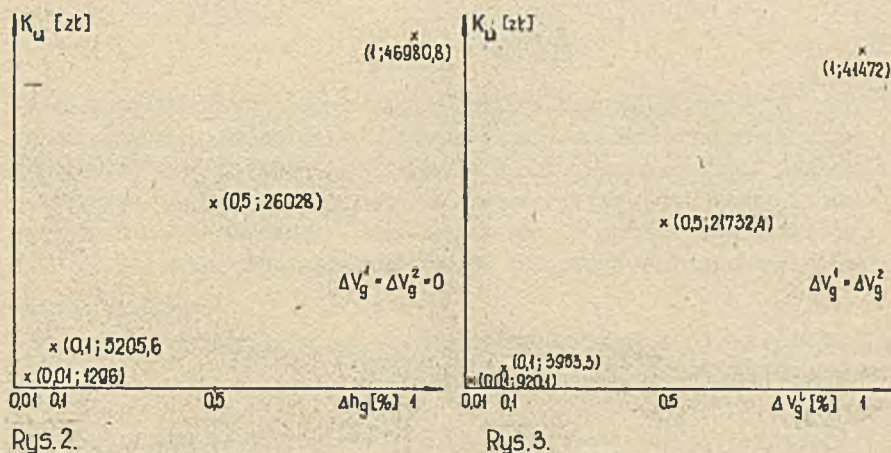
- zmienne losowe V_1^{ol} oraz V_1^{oz} mają rozkład normalny o wariancjach G_i^{ol} i G_i^{oz} ,
- maksymalna pojemność zbiornika wynosi 72000 m^3 ,
- horyzont sterowania wynosi 24 h, czas eksploatacji przyrządu 1 rok
- $\alpha = 0,97$; $\beta = \gamma = 0,99$,
- $G_i^{ol} = 1 \cdot \overline{V_i^{ol}}$, $G_i^{oz} = 0,1 \cdot \overline{V_i^{oz}}$,
- mamy do dyspozycji 4 przepływomierze o błędzie $\Delta V_g = 1\%$, $0,5\%$, $0,1\%$ i $0,01\%$ i 4 poziomomierze o błędzie $\Delta h_g = 1\%$, $0,5\%$, $0,1\%$ i $0,01\%$,
- zastosowano algorytm sterowania przedstawiony w [1].

Wyznaczone zakresy pomiarowe wynoszą:

$$h_{\max} = 8[\text{m}], \quad h_{\min} = 2[\text{m}]$$

$$\begin{array}{l} \text{wydajność pompowni Paprocany} - 8900 - 14400 \text{ [m}^3/\text{h]} \\ \text{" " Urbanowice} - 16420 - 18920 \text{ [m}^3/\text{h]}. \end{array}$$

Na rys. 2 i 3 przedstawiono zmianę kosztu kompensacji w zależności od wartości granicznych błędów.



Rys. 2, 3. Zależność kosztu kompensacji od wartości granicznych błędów.

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że udział kosztu kompensacji błędów pomiaru w koszcie sterowania w omawianym przykładzie jest dość znaczny.

Wyznaczenie zakresu pomiarowego na podstawie zależności wynikających z algorytmu sterowania umożliwia określenie faktycznych granic zmian wielkości mierzonej, co stwarza warunki dla wyeliminowania niektórych błędów, np. błędu nieliniowości dla przepływomierzy.

Przedstawiona metody łączy ze sobą cel pomiaru, jakim jest dostarczenie informacji dla układu sterowania z własnościami metrologicznymi przyrządu oraz jego kosztem. Jest to szczególnie istotne dla złożonych układów. Ze wzrostem złożoności układu wzrasta na ogół liczba przyrządów, a tym samym jej koszt, oraz wpływ błędów pomiaru na wartość wskaźnika jakości sterowania.

LITERATURA

- [1] A. BARGIEŁA, U. POCIASK - Algorytm dobowego sterowania pompowniami dla nieliniowej funkcji kosztów. Prace Instytutu Automatyki Pol. Sl. - NB-170/RAU1/76, Gliwice 1980

- [2] K. ZARYCHTA, W. OGRY CZAK - Programowanie liniowe i całkowito liczbowe. WNT, Warszawa 1981
- [3] A. BARGIEŁA, U. PO CIASK - Model matematyczny i algorytm optymalnego sterowania układem pompownia - rurociąg - zbiornik. Prace Instytutu Automatyki Pol Sl. - NB-170/RAu1/76, Gliwice 1979.

ПОДБОР МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

/ Резюме /

В работе представлен метод оценки метрологических свойств измерительных приборов, использующий связь между значением показателя качества управления и ошибками измерения. Дало это возможность определить такую точность измерения, которая гарантирует соответственно малую потерю информации, и одновременно не требует слишком точных приборов. Метод иллюстрирован примером.

THE CHOICE OF METROLOGICAL PROPERTIES OF MEASURING INSTRUMENTS FOR CONTROL PURPOSES IN A WATER SUPPLY SYSTEM

Summary. In the paper a method for evaluation of metrological properties of measuring instruments is proposed. The method is based upon a connection between a return function and measuring errors. It makes possible to define a measuring accuracy which ensures respectively small uncertainty of informations and from the other side is obtained without over accurate instruments. The method is illustrated by the example taken from an except of a water supply system.