

III. DOŚWIADCZALNE OKREŚLANIE WŁAŚCIWOŚCI UKŁADÓW POMIAROWYCH I REGULACYJNYCH

Tak zwana identyfikacja charakteru i właściwości obiektu regulacji, a zwykle i całego układu pomiarowo-regulacyjnego, jest podstawowym warunkiem prawidłowego zaprojektowania układu regulacji oraz dobrania warunków jego pracy. Właściwości obiektu mogą być w większości przypadków określone z wyprowadzonego wzoru (modelu) matematycznego, często jednak łatwiejsze jest doświadczalne wyznaczenie charakterystyk badanego układu.

Właściwości przetworników i obiektów powinny być w zasadzie określone przez technologa, który najlepiej rozumie fizyczną i chemiczną stronę procesu zachodzącego w danym urządzeniu. Dopiero w trudniejszych przypadkach jest tu konieczna pomoc automatyka. Niżej podano ogólne zasady badania charakterystyki układu pomiarowo-regulacyjnego. Bardziej szczegółowe informacje na ten temat zawiera literatura [1,3].

1. WŁAŚCIWOŚCI STATYCZNE – WZMOCNIENIE STATYCZNE

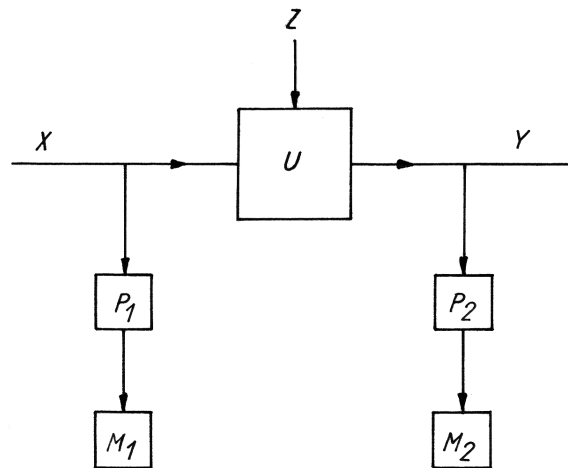
Właściwości statyczne układów pomiarowych, pomiarowo-regulacyjnych, a także samych regulatorów i obiektów regulacji są określone przez zależność między wielkością wyjściową Y , a wielkością wejściową X , w ustalonym stanie działania układu, tzn. wtedy, kiedy nie występują żadne zmiany wartości zarówno X , jak i Y :

$$Y = f(X) \tag{1}$$

Wyznaczenie właściwości statycznych badanego układu U (rys. 1) wymaga zainstalowania dwóch przetworników pomiarowych: przetwornika sygnału wejściowego P_1 i przetwornika sygnału wyjściowego P_2 . Przetworniki te uruchamiają mierniki wyjściowe M_1 i M_2 , dwukanałowy rejestrator, charakterograf lub są połączone z systemem komputerowym. Zmieniając skokowo wartości sygnału wejściowego X , rejestruje się odpowiadające im wartości sygnału wyjściowego Y **po ich ustaleniu się**. Należy przy tym zwrócić uwagę na to, czy zmienne wielkości zakłócające Z nie zniekształcają przebiegu charakterystyki.

Pomiary powinny być przeprowadzone w całym mogącym wchodzić w grę zakresie zmian sygnałów X i Y , co jest możliwe tylko w układach wyłączonych z normalnej eksploatacji lub doświadczalnych. W warunkach ruchowych należy ograniczyć się do

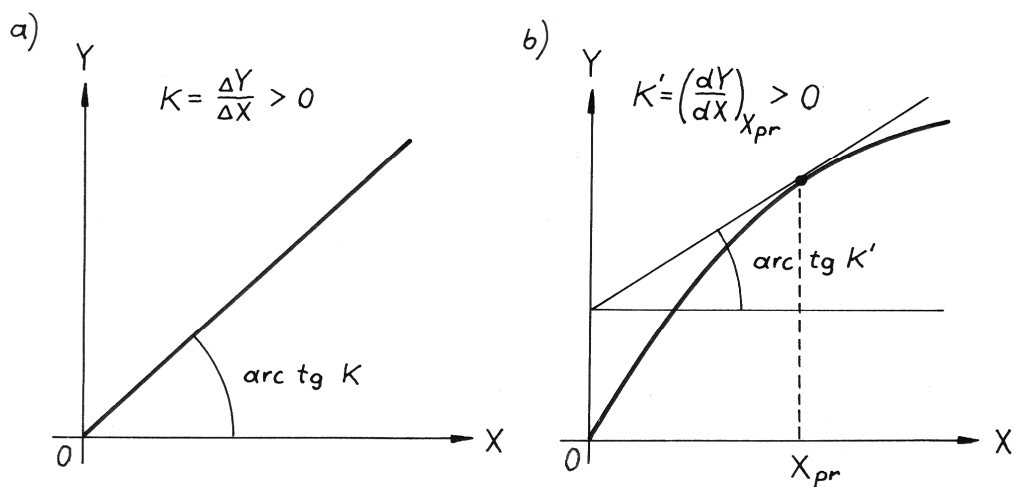
wyznaczenia niewielkiego odcinka charakterystyki w pobliżu punktu normalnej pracy układu (punktu X_{pr}).



Rys. 1. Wyznaczanie charakterystyki statycznej

Wynikiem pomiaru jest charakterystyka $Y = f(X)$ określona w warunkach statycznych. Metodą analityczną lub graficzną można wyznaczyć nachylenie całej charakterystyki $\frac{\Delta Y}{\Delta X}$ (wzmocnienie statyczne układu K) lub w przypadku jej nieliniowego przebiegu, nachylenie w punkcie normalnej pracy $\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right)_{X_{pr}}$ (wzmocnienie różniczkowe układu K').

Wykres równania opisującego statyczne właściwości układu liniowego przedstawia rysunek 2.a.



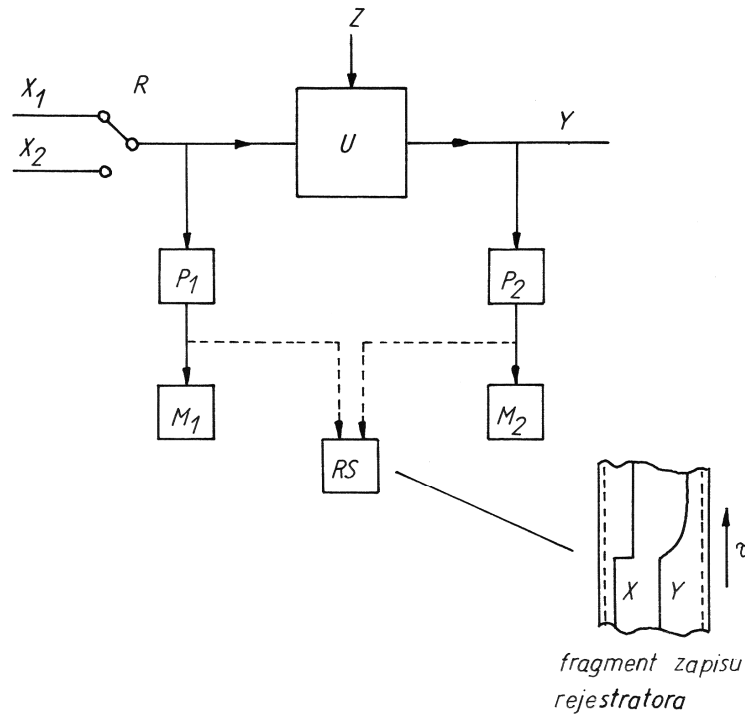
Rys. 2. Charakterystyka statyczna układu liniowego (a) i nieliniowego linearyzowanego (b)

Wzmocnienie statyczne K jest podstawowym wyróżnikiem statycznych właściwości układu lub obiektu. W układach liniowych, przy prostoliniowym przebiegu charakterystyki statycznej, wzmocnienie statyczne ma wartość stałą (rys. 2.a) i może być wyznaczone np. ze stosunku przyrostów $\Delta Y/\Delta X$. W układach nieliniowych równanie charakterystyki statycznej nie jest równaniem prostej, jednakże w wielu przypadkach można wybrać liniowy odcinek tej charakterystyki lub dokonać jej linearyzacji w otoczeniu wybranego punktu, nazywanego punktem normalnej pracy układu (X_{pr} na rys. 2.b). Wzmocnienie układu jest wtedy wyznaczone z nachylenia stycznej w punkcie X_{pr} i nosi nazwę **wzmocnienia różniczkowego** K' .

2. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE – ODPOWIEDŹ NA WYMUSZENIE SKOKOWE

Wyznaczenie właściwości dynamicznych badanego układu lub obiektu wymaga wykonania skoku jego wielkości wejściowej (wymuszenia skokowego X_{st}) i zbadania przebiegu odpowiedzi sygnału wyjściowego Y w funkcji czasu τ . Pomiaru charakterystyki dokonuje się najczęściej w niewielkim obszarze wokół wybranego punktu pracy układu, przy skoku wartości X wynoszącym 5 do 15% całego normalnego zakresu zmian tej wielkości. Jest to bardzo istotne zwłaszcza w przypadku członów nieliniowych z linearyzowaną charakterystyką statyczną, w których wzmocnienie jest zależne od położenia punktu pracy na krzywej (rys. 2.b). Wykonanie większych wymuszeń jest zresztą możliwe tylko, jak już wspomniano, w układach wyłączonych z normalnej eksploatacji lub doświadczalnych.

Wyznaczenie odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe wymaga zainstalowania przyrządów przedstawionych na rysunku 3. Na wejściu badanego układu U znajduje się przełącznik R sygnału wejściowego, umożliwiający skokową zmianę tego sygnału z wartości X_1 na wartość X_2 lub odwrotnie. Wielkość wymuszenia skokowego jest mierzona zespołem pomiarowym P_1M_1 i może być rejestrowana jednym z kanałów rejestratora RS , charakterografu lub pomiarowego systemu komputerowego. Po wykonaniu wymuszenia (skoku wartości X), bada się odpowiedź układu (zmianę wartości sygnału Y w funkcji czasu) przy pomocy zespołu pomiarowego P_2M_2 i czasomierza lub korzystając z drugiego kanału rejestratora RS , charakterografu lub pomiarowego systemu komputerowego.



Rys. 3. Wyznaczenie odpowiedzi na wymuszenie skokowe

Podstawowym warunkiem dokładnego wyznaczenia charakterystyki dynamicznej jest mała, w porównaniu z badanym członem, inercja zespołów pomiarowych P_1M_1 i P_2M_2 , a także stałość w czasie wielkości zakłócających Z . W celu dokładnego określenia charakterystyki dynamicznej bez korzystania z rejestratora, charakterografu czy komputera, należy uzyskać odpowiednio dużą liczbę punktów doświadczalnych do późniejszego sporządzenia wykresu.

Z wykresu odpowiedzi na wymuszenie skokowe wyznacza się podstawowe wskaźniki dynamicznych właściwości badanego układu – **stałą czasową** T w przypadku członu inercyjnego I rzędu lub w przypadku statycznych inercyjnych układów złożonych, ich parametry zastępcze – **zastępczą stałą czasową** T_z i **zastępczy czas opóźnienia** τ_{oz} . Sposoby wyznaczania tych parametrów podano niżej.

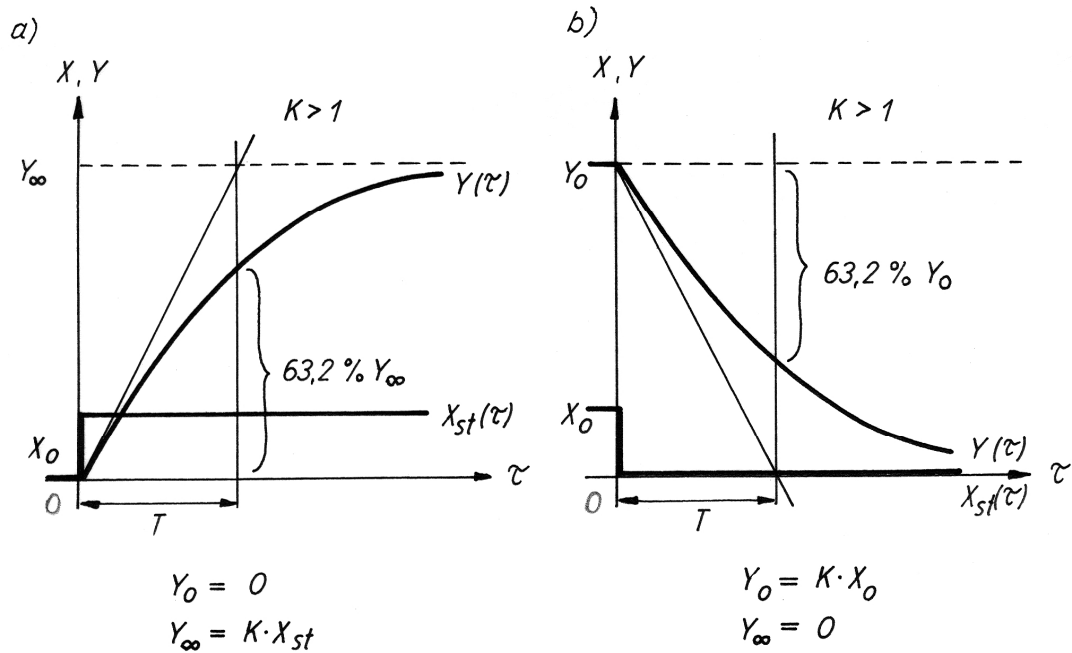
2.1. METODY WYZNACZANIA STAŁEJ CZASOWEJ CZŁONÓW INERCYJNYCH I RZĘDU

2.1.1. SPOSOBEM GRAFICZNYM

Wyznaczenie stałej czasowej członu inercyjnego I rzędu sposobem graficznym wykorzystuje jej definicję: stała czasowa jest to czas, po którym w członie inercyjnym I rzędu, po wymuszeniu skokowym na wejściu, osiągnięto by na wyjściu stan równowagi, gdyby nie

malą początkową szybkość osiągnięcia tego stanu. Definicję tę ilustruje na rys. 4.a styczna do początku przebiegu funkcji $Y(\tau)$.

Po wykonaniu wykresu odpowiedzi na wymuszenie skokowe, kreślimy styczną do przebiegu $Y(\tau)$ w jego początkowym punkcie $\tau = 0$. Przy wykresie $Y(\tau)$ rosnącym, dążącym do wartości różnej od zera (rys. 4.a), kreśli się następnie asymptotę funkcji na poziomie $K \cdot X_{st} = Y_{\infty}$. Rzutuując punkt przecięcia stycznej z asymptotą na oś odciętych, otrzymujemy punkt $\tau = T$ i określamy tym samym wartość stałej czasowej analizowanego członu.



Rys. 4. Wyznaczanie stałej czasowej sposobem graficznym i z wartości charakterystyki skokowej w punkcie $\tau = T$ dla przebiegu $Y(\tau)$ dążącego do $Y_{\infty} \neq 0$ (a) i do $Y_{\infty} = 0$ (b)

Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ malejącym, dążącym do zera (rys. 4.b) postępuje się podobnie, z tym, że asymptotą funkcji jest wtedy oś odciętych ($Y_{\infty} = 0$). Wartość stałej czasowej członu określa wtedy punkt przecięcia stycznej z osią odciętych. **Jeżeli malejący przebieg funkcji $Y(\tau)$ dąży do asymptoty nie pokrywającej się z osią odciętych, wartość stałej czasowej układu określa wtedy punkt przecięcia stycznej z tą asymptotą!**

Ze względu na trudność precyzyjnego wykreślenia stycznej do przebiegu odpowiedzi na wymuszenie skokowe w punkcie $\tau = 0$, graficzne wyznaczenie stałej czasowej elementu inercyjnego I rzędu daje wynik przybliżony.

2.1.2. Z NACHYLENIA CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W DANYM PUNKCIE

Przekształcając równanie charakterystyki dynamicznej członu inercyjnego I rzędu:

$$T \cdot \frac{dY}{d\tau} + Y = K \cdot X \quad (2)$$

otrzymamy zależność:

$$T = \frac{K \cdot X - Y}{\frac{dY}{d\tau}} \quad (3)$$

w której X jest wartością X_{st} po wykonaniu wymuszenia skokowego.

Jeżeli przyjmąc, że $\frac{dY}{d\tau}$ jest nachyleniem przebiegu charakterystyki skokowej w punkcie n , $K \cdot X_{st}$ jest wartością Y w czasie $\tau = \infty$ (asymptotą charakterystyki Y_{∞}), a Y wartością rzędnej w punkcie n , otrzymamy wzór na obliczenie stałej czasowej T :

$$T = \frac{Y_{\infty} - Y_n}{\left(\frac{dY}{d\tau}\right)_n} \quad (4)$$

Przy rosnącym, dążącym do asymptoty $Y_{\infty} \neq 0$ przebiegu funkcji $Y(\tau)$ (rys. 4.a), jest konieczna znajomość wartości wszystkich składników prawej strony równania (4). Przy malejącym, dążącym do zera przebiegu funkcji $Y(\tau)$ (rys. 4.b), równanie (4) upraszcza się, ponieważ $Y_{\infty} = 0$.

W praktyce punkt n wybiera się na mało zakrzywionym, stromym odcinku wykresu charakterystyki skokowej, a nachylenie tej charakterystyki określa się dla bezpośredniego otoczenia wybranego punktu. W celu zwiększenia dokładności obliczeń, należy wyznaczyć stałą czasową dla kilku różnych punktów charakterystyki i obliczyć ich średnią.

2.1.3. Z WARTOŚCI CHARAKTERYSTYKI SKOKOWEJ W PUNKCIE $\tau = T$

Całkując równanie charakterystyki dynamicznej członu inercyjnego I rzędu (2), otrzymamy dla przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącego do wartości różnej od zera (rosnącego) zależność:

$$Y(\tau) = K \cdot X \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}\right) \quad (5)$$

w której X jest wartością X_{st} po wykonaniu wymuszenia skokowego, a e jest podstawą logarytmów naturalnych (liczbą Eulera $e \approx 2,718281828459\dots$).

W czasie $\tau = T$ otrzymamy $1 - e^{-1} = 0,632$, czyli $Y(\tau) = 0,632 K \cdot X_{st}$. Oznacza to, że w członie inercyjnym I rzędu, po czasie równym stałej czasowej od wykonania wymuszenia skokowego, wartość Y osiąga 63,2% swojej wartości maksymalnej $K \cdot X_{st} = Y_{\infty}$ (rys. 4.a). Znając więc poziom asymptoty Y_{∞} można łatwo obliczyć wartość stałej czasowej T badanego członu.

Dla przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącego do zera (malejącego), po scałkowaniu równania (2) otrzymamy zależność:

$$Y(\tau) = K \cdot X \cdot e^{-\frac{\tau}{T}} \quad (6)$$

gdzie X jest początkową wartością X_0 przed wykonaniem wymuszenia skokowego.

W czasie $\tau = T$ otrzymamy $e^{-1} = 0,368$, czyli $Y(\tau) = 0,368 K \cdot X_0$. Wynika z tego, że po czasie T od wymuszenia skokowego, wartość Y osiąga 36,8% swojej wartości początkowej $K \cdot X_0 = Y_0$, czyli spada o 63,2% (rys. 4.b). Znając więc poziom Y_0 , można łatwo obliczyć wartość stałej czasowej badanego członu.

3. WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE UKŁADÓW ZŁOŻONYCH

Linowe układy złożone, zbudowane z dwóch lub większej liczby połączonych ze sobą (najczęściej szeregowo) członów elementarnych, klasyfikuje się w zależności od cechy samodzielnego osiągnięcia lub nieosiągnięcia stanu równowagi trwałej po wprowadzeniu wymuszenia skokowego na dwie grupy:

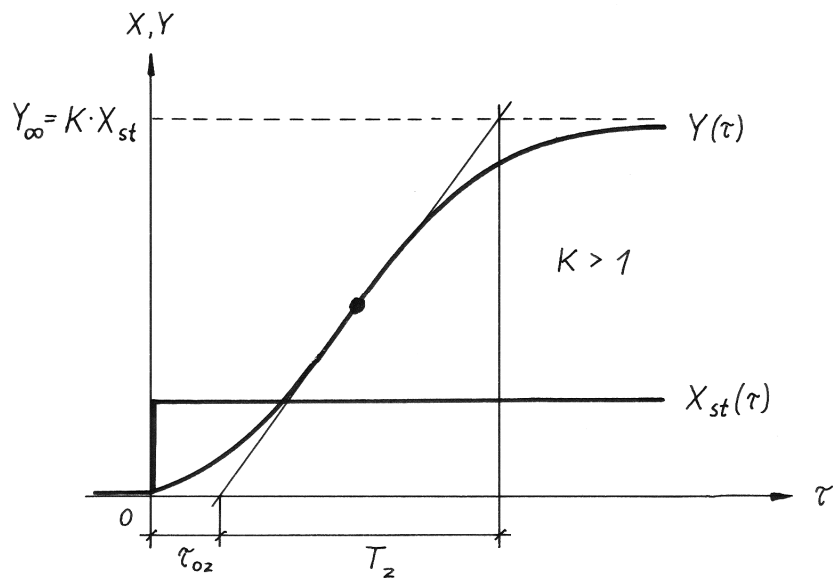
- a) układy statyczne,
- b) układy astatyczne.

Układy astatyczne zawierają przynajmniej jeden element całkujący. Układy statyczne nie zawierają elementów o właściwościach całkujących (patrz [1], rozdz. 16.3.2).

Najczęściej spotykany w praktyce statyczny układ inercyjny wyższego rzędu składa się z połączonych szeregowo elementów inercyjnych I rzędu (przykładem może być szeregowy, przepływowy reaktor wielozbiornikowy). Rząd układu wyznacza liczba połączonych elementów.

Często równania opisujące właściwości spotykanych w praktyce złożonych obiektów pomiarowo-regulacyjnych i technologicznych nie są dostatecznie znane lub wyznaczenie transmitancji tych obiektów jest niemożliwe. Ponadto niektóre rodzaje obiektów, np. procesy cieplne lub dyfuzyjne, charakteryzują się inercyjnością tak wysokiego rzędu, że analityczne wyznaczanie ich transmitancji ma małe znaczenie praktyczne, gdyż prowadzi często do wyników nieścisłych lub trudnych do wykorzystania ze względu na złożoną formę matematyczną. W takich przypadkach, często lepiej jest opierać się na doświadczalnie wyznaczonych odpowiedziach na wymuszenia skokowe, które można aproksymować w umowny sposób.

W przypadku układów statycznych, których odpowiedzi na wymuszenia skokowe nie mają charakteru oscylacyjnego, wyznaczoną doświadczalnie krzywą odpowiedzi na wymuszenie skokowe aproksymuje się graficznie za pomocą opóźnienia i inercyjności pierwszego rzędu, zgodnie z rysunkiem 5. Kreśli się styczną do charakterystyki w punkcie przegięcia. Przy przebiegu funkcji $Y(\tau)$ dążącym do wartości różnej od zera (rosnącym), styczna ta odcina na osi czasu i prostej na poziomie $K \cdot X_{st} = Y_{\infty}$ zastępcze parametry układu: zastępczy czas opóźnienia τ_{oz} oraz zastępczą stałą czasową T_z .

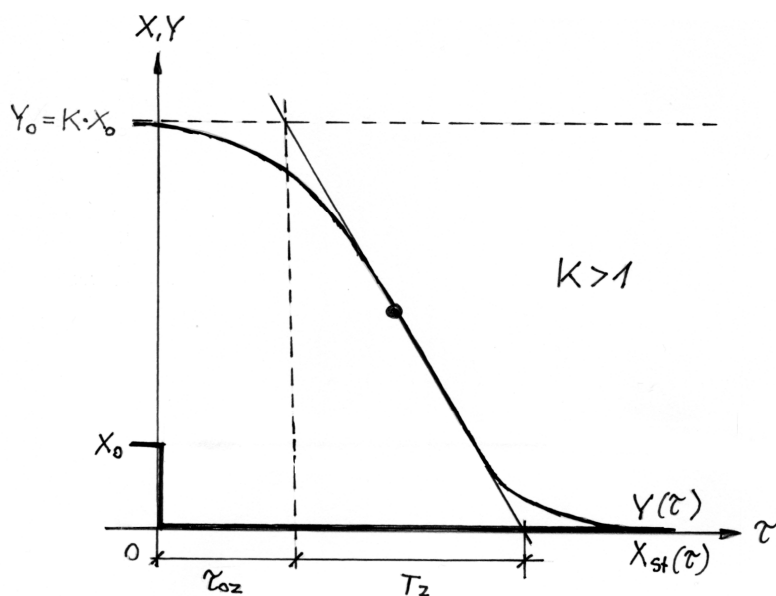


Rys. 5. Aproksymowanie odpowiedzi na wymuszenie skokowe układu inercyjnego wyższego (np. II) rzędu dla przebiegu $Y(\tau)$ dążącego do $Y_{\infty} \neq 0$

Z położenia asymptoty przebiegu $Y(\tau)$ można określić wzmocnienie statyczne układu:

$$K = \frac{Y_{\infty}}{X_{st}} \quad (7)$$

W podobny sposób wyznacza się zastępcze parametry dynamiczne układu przy dążącym do zera (malejącym) przebiegu funkcji $Y(\tau)$, z tym, że styczna odcina je na prostej na poziomie $K \cdot X_0 = Y_0$ i na osi czasu (rys. 6). **Jeżeli malejący przebieg funkcji $Y(\tau)$ dąży do asymptoty nie pokrywającej się z osią odciętych, wartość T_z układu określa wtedy punkt przecięcia stycznej z tą asymptotą!**



Rys. 6. Aproksymowanie odpowiedzi na wymuszenie skokowe układu inercyjnego wyższego (np. II) rzędu dla przebiegu $Y(\tau)$ dążącego $Y_\infty = 0$

Wzmocnienie statyczne oblicza się z wzoru:

$$K = \frac{Y_0}{X_0} \quad (8)$$

W obu przypadkach, występowanie w przebiegu charakterystyki skokowej układu punktu przegięcia, znacznie ułatwia wykreślenie stycznej i pozwala osiągnąć dość dużą dokładność metody graficznej.

4. LITERATURA

- [1] **Ludwicki M.: Sterowanie procesami w przemyśle spożywczym, PTTŻ, Łódź 2002.**
- [2] Romer E.: Miernictwo przemysłowe, PWN, W-wa 1978.
- [3] Żelazny M.: Podstawy automatyki, PWN, W-wa 1976.

Opracował: dr inż. Marek Ludwicki, Politechnika Łódzka, I-30,
<http://snack.p.lodz.pl/ludwicki>
marek.ludwicki@p.lodz.pl

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część tej pracy nie może być powielana, czy rozpowszechniana w jakiegokolwiek formie, w jakikolwiek sposób, bądź elektroniczny, bądź mechaniczny, włącznie z fotokopiowaniem, nagrywaniem na taśmy lub przy użyciu innych nośników informacji, bez zgody autora.

Copyright © 2014-03-02
All rights reserved