

Milan Jelšina

O možnosti získania adaptivity v regulačnom obvode s nespojite premenlivou štruktúrou

*Kybernetika*, Vol. 5 (1969), No. 4, (335)--351

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/124610>

## Terms of use:

© Institute of Information Theory and Automation AS CR, 1969

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library*  
<http://project.dml.cz>

# O možnosti získania adaptivity v regulačnom obvode s nespojite premenlivou štruktúrou

MILAN JELŠINA

V článku je riešený problém získania adaptívnych vlastností v systéme automatickej regulácie s premenlivou štruktúrou. Adaptívne vlastnosti sú dosiahnuté prispôbovaním prepínacej podmienky zmenám parametrov sústavy tak, aby po jej splnení regulačná odchýlka vykazovala nulovú regulačnú plochu.

## 1. FORMULÁCIA PROBLÉMU

V súčasnosti existuje široká skupina adaptívnych systémov, v ktorých sa tým alebo iným spôsobom korigujú zmeny parametrov regulačného obvodu. V obecnom prípade, keď uvažujeme  $n$  nekonštantných parametrov regulovanej sústavy, pri návrhu adaptujúceho obvodu sa stretáme s takými problémami, ako je identifikácia zmien týchto parametrov a spôsob korigovania ich vlivu na regulačný pochod. Aby sa s uvedeným adaptujúci obvod vysporiadal, v dôsledku skutočnosti, že daný systém má  $n$  stupňov voľnosti, musí mať k dispozícii  $n$  vhodne pôsobiacich členov. Riešenie týchto problémov v plnom rozsahu vedie k systému, ktorého zložitost' vo väčšine prípadov nemusí byť úmerná dosiahnutým výsledkom. Sú však známe riešenia, ktoré sa uvedených problémov a tedy i zložitosti systému vyhýbajú tým, že uvažujú spomedzi  $n$  nekonštantných parametrov sústavy iba jeden — dominantný, prípadne, že diferenciálnu rovnicu  $n$ -tého rádu, vyjadrujúcu dynamiku daného regulačného obvodu, aproximujú diferenciálnou rovnicou rádu nižšieho.

V danej práci je predložené riešenie, ktoré spočíva v redukcii  $n$ -nekonštantných parametrov regulovanej sústavy na jednu vhodne volenú veličinu, ktorá sa pri návrhu adaptujúceho obvodu považuje za jediný nekonštantný parameter regulačného systému. Úloha adaptujúceho obvodu potom už nespočíva v korigovaní dôsledkov jednotlivých zmien parametrov sústavy zvlášť, ale iba v korigovaní jediného nekonštantného parametra v celom, čo vedie ku adaptujúce-mu obvodu pomerne jednoduchej štruktúry.

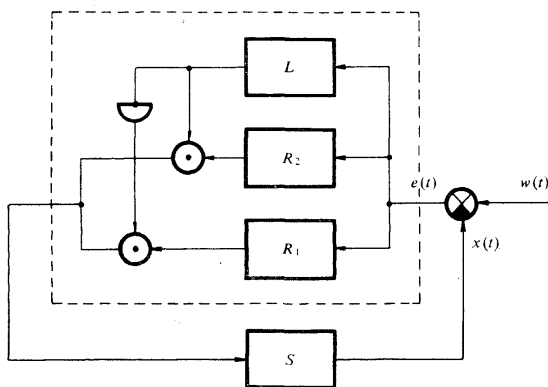
Vhodné podmienky pre redukcii nekonštantných parametrov sústavy poskytujú systémy automatickej regulácie s premenlivou štruktúrou. Spomedzi známych systémov s premenlivou štruktúrou sa daná práca orientuje na tie, u ktorých sa zmena štruktúry v priebehu regulačného pochodu, vyvolaného skokom polohy riadenia, uskutoční iba jeden krát.

Na základe takto stručne naznačenej problematiky je formulovaná úloha, riešením ktorej sa získajú v regulačnom obvode s premenlivou štruktúrou adaptívne vlastnosti: 1. v rámci redukcie  $n$  nekonštantných parametrov regulovanej sústavy na jedinú nekonštantnú podmienku voliť

v systéme automatickej regulácie s premenlivou štruktúrou vhodné kritérium, podľa ktorého bude možné pre danú oblasť zmien parametrov sústavy prispôbovať regulačný pochod; 2. vyšetříť spôsob a dynamiku adaptácie podľa zvoleného kritéria a 3. navrhnuť štruktúru príslušného adaptujúceho obvodu.

## 2. TVAR PREPÍNAČEJ PODMIENKY VZHLADOM NA PRÍTOMNOSŤ ADAPTUJÚCEHO OBVODU V REGULAČNOM SYSTÉME S PREMENLIVOU ŠTRUKTÚROU

Regulačný obvod s premenlivou štruktúrou (obr. 1) poskytuje možnosť redukovať  $n$  nekonštantných parametrov regulovanej sústavy do jednej nekonštantnej veličiny



**Obr. 1.** Bloková schéma regulačného obvodu s premenlivou štruktúrou ( $S$  — regulovaná sústava;  $R_1, R_2$  — regulátory prvej a druhej štruktúry;  $L$  — logika regulátora s premenlivou štruktúrou;  $x(t)$  — regulovaná veličina;  $w(t)$  — riadiaca veličina;  $e(t)$  — regulačná odchýlka).

ve forme ľubovoľného z integrálnych kritérií pre kvalitu regulačného pochodu po splnení tzv. prepínacej podmienky, v závislosti na splnení ktorej sa uskutočňuje zmena štruktúry regulačného obvodu. Vhodné kritérium poskytuje tiež podmienka aperiodického priebehu regulačnej odchýlky po splnení prepínacej podmienky [1]. Pre ďalšie úvahy volíme za jedinou nekonštantnú veličinu lineárnu regulačnú plochu regulačnej odchýlky  $e(t)$ , vyvolanej skokom polohy riadenia  $w(t)$  po splnení prepínacej podmienky. Mierou ukončenia adaptačného pochodu, ktorým sa v regulačnom obvode prevedie korigovanie vlivu zmien nekonštantných parametrov sústavy, bude slúžiť nulová hodnota zvolenej regulačnej plochy. V ďalšom sa budeme zaoberať určením vhodného tvaru prepínacej podmienky vzhľadom na prítomnosť adaptačného pochodu v regulačnom obvode.

Ako vyplýva z teórie systémov automatickej regulácie s premenlivou štruktúrou [2], [3] je možné v regulačnom obvode navrhnuť také prenosi jednotlivých štruktúr, aby regulačná odchýlka  $e(t)$  vyvolaná skokom polohy riadenia bola v ustálenom stave nulová. Prítom koeficienty v prenose prvej štruktúry sú prostredníctvom príslušného regulátora volené tak, aby regulačná odchýlka vykazovala málo tlmené, prípadne netlmené kmity. Naproti tomu, koeficienty v prenose druhej štruktúry sú volené prostredníctvom jej regulátora tak, aby regulačná odchýlka vykazovala aperiodický priebeh. K tomuto účelu je možné s výhodou použiť kritéria aperiodickej stability [4].

Označme

$$(2.1) \quad \bar{t} = t - t_p,$$

kde  $t_p$  – okamih splnenia prepínacej podmienky.

Aby pre lineárnu regulačnú plochu  $P$  platilo

$$(2.2) \quad P = \int_0^{\infty} \bar{e}(\bar{t}) d\bar{t} = 0,$$

kde  $\bar{e}(\bar{t})$  – regulačná odchýlka po splnení prepínacej podmienky, je nutné uvažovať prepínanie podmienku v tvare [2]

$$(2.3) \quad p(t) = \text{sign } e'(t) \sum_{i=1}^n a_i e^{(t-t_p)}(t),$$

kde  $a_i$  – koeficienty diferenciálnej rovnice  $\sum_{i=0}^n a_i \bar{e}^{(i)}(\bar{t}) = 0$ , ktorá vyjadruje dynamiku druhej štruktúry regulačného obvodu.

Pre  $p(t) < 0$  má uvažovaný regulačný obvod prvú (kmitavú) a pre  $p(t) > 0$  – druhú (aperiodickú) štruktúru. Prepínanie realizuje logický člen  $L$  v regulátore s premenlivou štruktúrou (obr. 1).

Nech pre  $p(t) > 0$  sú zmeny parametrov sústavy vyjadrené novými koeficientmi  $a_i^*$ , pre ktoré platí

$$(2.4) \quad a_i^* \neq a_i.$$

Vzhľadom na prepínanie podmienku (2.3) a nové koeficienty  $a_i^*$ , nebude lineárna regulačná plocha (2.2) nulová.

Úlohou adaptujúceho obvodu bude previesť korektúru koeficientov funkcie  $p(t)$  podľa vzťahu

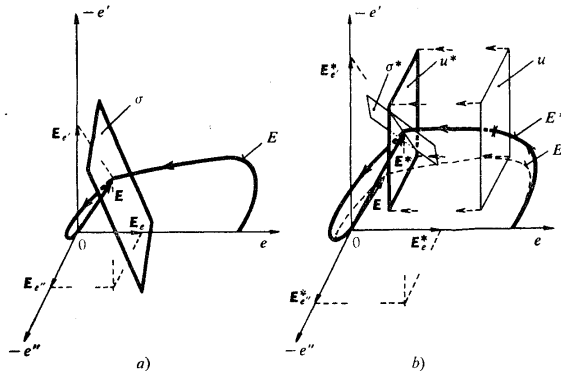
$$(2.5) \quad a_i + \Delta a_i = a_i^*,$$

v dôsledku čoho sa táto transformuje do tvaru

$$(2.6) \quad p(t) = \text{sign } e'(t) \sum_{i=1}^n a_i^* e^{(t-t_p)}(t).$$

Takto volená prepínacia podmienka a jej prispôsobovanie zmenám parametrov sústavy vedie ku štruktúre adaptujúceho obvodu, ktorého zložitost by nebola úmerná dosiahnutým výsledkom. Tento nedostatok adaptujúceho obvodu odstránime, ak nájdeme prepínaciu funkciu, ktorá nebude explicitne závislá na deriváciách regulačnej odchýlky.

Za účelom odvodenia novej prepínacej funkcie prevedme nasledujúcu úvahu. V  $n$ -rozmernom priestore stavových súradnic  $e, e', \dots, e^{(n-1)}$  body fázových tra-



Obr. 2. Príesečník trajektórie regulačnej odchýlky  $E, E^*$  a prepínacia podmienka v priestore stavových súradnic  $e, e', e''$  (a — vektor  $E$  príesečníka, určený plochou  $\sigma$ , b — vektor  $E^*$  príesečníka po zmenách parametrov sústavy, určený plochou  $\sigma$  (na obr. 2b)).

jektórií  $E$  regulačných odchýliek  $e(t)$ , pri ktorých je splnená prepínacia podmienka, vytvárajú prepínaciu plochu  $\sigma$ . Vektor príesečníka  $E$  fázovej trajektórie s prepínacou plochou  $\sigma$  rozložíme do tvaru

$$(2.7) \quad E = \sum_{i=0}^n E_{e^{(i)}} ,$$

kde  $E_{e^{(i)}}$  — zložky vektoru  $E$  pozdĺž stavových súradnic. Aby vektor  $E$  vyhovoval zvolenému kritériu adaptácie, musí v súhlase s podmienkou (2.3) platiť

$$(2.8) \quad \sum_{i=1}^n a_i E_{e^{(i-1)}} = 0 .$$

Na obr. 2a je príesečník fázovej trajektórie s prepínacou plochou znázornený pre trojrozmerný priestor. Po zmene parametrov sústavy adaptujúci obvod zabezpečí zvolené kritérium adaptácie tým, že vyhľadá novú plochu  $\sigma^*$  (obr. 2b), v ktorej

pre vektor priesečníka  $\mathbf{E}^*$  novej fázovej trajektórie  $E^*$  platí

$$(2.9) \quad \sum_{i=1}^n a_i^* \mathbf{E}_e^*(t-1) = 0.$$

Adaptujúci obvod potreboval k tomu sledovať  $n - 1$  derivácii regulačnej odchýlky  $e(t)$  a korigovať koeficienty  $a_i$  v prepínacej podmienke. Vektor  $\mathbf{E}^*$  môže však byť vyhľadaný i iným spôsobom. Za týmto účelom nech adaptujúci obvod sleduje iba zložku  $\mathbf{E}_e^*$  vektoru  $\mathbf{E}^*$  pomocou plochy  $\bar{\sigma} \perp \mathbf{E}_e^*$ , ktorú paralelne posúva, až  $\bar{\sigma} \equiv \bar{\sigma}^*$ , kedy vektor  $\mathbf{E}^*$  nadobudne hľadané vlastnosti. Tým odpadá sledovanie  $n - 1$  derivácii regulačnej odchýlky  $e(t)$  a zložité korigovanie koeficientov  $a_i$  v prepínacej podmienke.

Na základe uvedeného, budeme uvažovať prepínanie podmienku v tvare

$$(2.10) \quad p(t) = \text{sign } e'(t) [e(t) - u],$$

kde  $u$  – vzdialenosť prepínacej plochy kolmej na  $\mathbf{E}_e^*$  od počiatku (parameter, nastavovaný adaptujúcim obvodom).

Úlohou adaptujúceho obvodu bude teda prispôbovať veľičinu  $u$  v prepínacej podmienke zmenám parametrov sústavy tak, aby pre  $p(t) > 0$  priebeh regulačnej odchýlky  $\bar{e}(t)$  dával nulovú lineárnu regulačnú plochu.

Doposiaľ sme uvažovali regulačnú odchýlku, vyvolanú skokom polohy riadenia (resp. impulzom, v priebehu trvania ktorého môžeme regulačný pochod považovať za prakticky ukončený). Spresnenie prepínacej podmienky (2.10) pre riadiacu veľičinu v tvare ľubovolnej stupňovitej funkcie je uvedené v odst. 4.

### 3. PRISPÔBOVANIE PREPÍNACEJ PODMIENKY

Nech pre  $u = u_0$  v prepínacej podmienke (2.10) je lineárna regulačná plocha  $P \neq 0$  a pre  $u = u_k$  je  $P = 0$ . Predpokladajme, že veľičina  $u_k$  sa adaptujúcim obvodom nastaví z veľičiny  $u_0$  v priebehu  $k$  regulačných pochodov, vyvolaných skokom polohy riadenia podľa vzťahu

$$(3.1) \quad u_k = u_0 + \sum_{s=1}^k \Delta u_s,$$

kde  $u_s$  –  $s$ -tý prírastok veľičiny  $u_0$ .

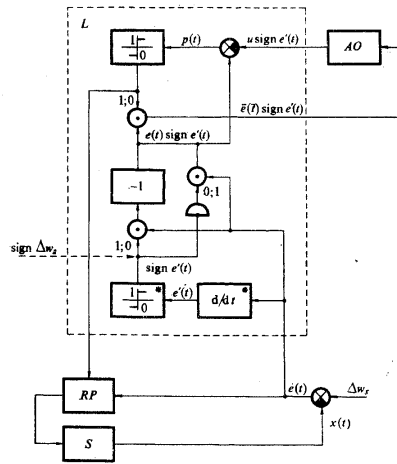
Nech pre  $s$ -tý regulačný pochod platí rekurentný vzťah

$$(3.2) \quad u_{s+1} = u_s + \beta P_s$$

kde  $P_s$  – plocha regulačnej odchýlky  $\bar{e}(t)$  v priebehu  $s$ -tého kroku prispôbovania,  $\beta$  – váhový koeficient.

Usporiadanie logiky a adaptujúceho odvodu v regulačnom systéme s premenlivou štruktúrou, ktorého prepínacia podmienka (2.10) sa prispôsobuje uvedeným spôsobom, je schematicky znázornené na obr. 3.

Vyšetríme dynamiku prispôbovania podľa rekurentného vzťahu (3.2). V dôsledku skutočnosti, že regulačná odchýlka nadobúda nulovú hodnotu reálne v konečnom



Obr. 3. Bloková schéma usporiadania logiky a adaptujúceho odvodu v regulačnom systéme s premenlivou štruktúrou ( $S$  — regulovaná sústava;  $RP$  — regulátor s premenlivou štruktúrou;  $L$  — logika;  $AO$  — adaptujúci obvod, v danom prípade integrátor).

čase, nie je nutné pri určení  $s$ -tej lineárnej regulačnej plochy  $P_s$  podľa vzťahu (2.2) uvažovať hornú medzu integrálu  $t = \infty$  ale  $t = t_s$ , kedy je už regulačný pochod prakticky ukončený. Nech

$$(3.3) \quad t_{s+1} - t_s > t_{\max}; \quad t_0 = 0,$$

kde  $t_{\max}$  — maximálna doba uvažovaných regulačných pochodov. Potom  $s$ -tá lineárna regulačná plocha bude vyjadrená v tvare

$$(3.4) \quad P_s = \frac{1}{2} \int_{t_s}^{t_{s+1}} \bar{e}(t) [1 + \text{sign } p(t)] dt.$$

Po dosadení vzťahu (3.4) do (3.2) vidíme, že váhový koeficient  $\beta$  je integračná konštanta, od veličiny ktorej bude závisieť stabilita adaptujúceho odvodu. Veličinu koeficientu  $\beta$  určíme pomocou funkcie

$$(3.5) \quad u_s = g(P_s).$$

Pre malé zmeny lineárnej regulačnej plochy  $\Delta P_s$  je možné vzťah (3.5) linearizovať

$$(3.6) \quad \Delta u_s = m \Delta P_s,$$

kde

$$m = \left. \frac{du_s}{dP_s} \right|_{P_s=0} > 0.$$

Po dosadení vzťahu (3.6) do (3.2) a úprave obdržíme

$$(3.7) \quad \Delta P_{s+1} - \left(1 + \frac{\beta}{m}\right) \Delta P_s = 0.$$

Zo vzťahu (3.7) vyplýva podmienka stability adaptujúceho obvodu

$$(3.8) \quad \left|1 + \frac{\beta}{m}\right| < 1,$$

z ktorej pre váhový koeficient  $\beta$  platí

$$(3.9) \quad 0 > \beta > -2m.$$

Pre každú kombináciu zmien parametrov sústavy z ohraničenej oblasti  $a_{i\min}^* < a_i < a_{i\max}^*$  má funkcia (3.5) vždy iný tvar, v dôsledku čoho koeficient linearizácie pre daný adaptujúci obvod môže byť rôzny. Aby sme zohľadnili najnepriaznivejší prípad, budeme uvažovať funkciu (3.5) s minimálnou smernicou tyčince v bode  $P_s = 0$ . V obecnom prípade zmien parametrov regulovanej sústavy je možné minimálnu hodnotu veličiny  $m$  určiť modelovaním funkcie (3.5) na analógovom počítači.

V ďalšom sa budeme zaoberať kvalitou adaptačného pochodu a súčasne naznačíme i iný prístup k určeniu podmienky stability. Kvalitu adaptačného pochodu budeme posudzovať podľa počtu krokov, v priebehu ktorých bude ukončený.

Metódu pre odhad počtu krokov adaptácie ukážeme na regulačnom obvode, ktorého sústava má prenos

$$(3.10) \quad S(p) = \frac{K}{N(p)},$$

kde  $K$  – nekonštantné zosilnenie sústavy.

Nekonštantné zosilnenie sústavy sa mení „pomaly“ čo znamená, že v procese adaptácie považujeme  $K(t) = K = \text{konšt.}$  Rozsah „pomalých“ zmien parametra  $K(t)$  je daný nerovnosťou

$$(3.11) \quad K_{\min} < K(t) < K_{\max}.$$



342 Lineárna regulačná plocha (2.2) regulačnej odchýlky  $\bar{e}(t)$  môže byť vypočítaná ako [2]

$$(3.12) \quad P = \frac{1}{a_0} [a_1 \bar{e}_0 + a_2 \bar{e}'_0 + \dots + a_n \bar{e}_0^{(n-1)}],$$

kde  $\bar{e}_0^{(i-1)}$  – počiatočné podmienky regulačnej odchýlky po splnení prepínacej podmienky ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

Pretože

$$(3.13) \quad \bar{e}_0^{(i-1)} = \bar{e}^{(i-1)}(0) = e^{(i-1)}(t_p)$$

a  $t_p$  je ten okamih  $t$ , v ktorom nastáva zmena štruktúry, môžeme získať veľkosť lineárnej regulačnej plochy  $P$  závislú na čase  $t$  v tvare

$$(3.14) \quad P(t) = \frac{1}{a_0} [a_1 e(t) + a_2 e'(t) + \dots + a_n e^{(n-1)}(t)].$$

Ak zobrazíme trajektóriu regulačnej odchýlky  $e(t)$  v rovine stavových súradníc  $e(t) = e$ ,  $P(t) = P$ , obdržíme tak funkciu (3.5) v tvare

$$(3.15) \quad e(t) = g(P)$$

vzhľadom na skutočnosť, že veličina  $P$  je odvodená vždy v okamihu, kedy  $u = e(t)$ . Pre stručnosť zápisu budeme v ďalšom označovať funkciu (3.15)  $u = g(P)$ , čo bude vyjadrovať jej spojité priebeh a  $u_s = g(P_s)$  – jej priebeh stupňovitý. Posledný tvar je potrebný ku vyjadreniu krokov adaptácie podľa rekurentného vzťahu (3.2). Štruktúra uvažovaného regulačného obvodu dáva regulačnú odchýlku  $e(t)$  v tvare tlmených kmitov. Je možné dokázať, že v dôsledku uvedeného i funkcia  $P(t)$  predstavuje tlmené kmity, takže funkcia (3.15) je zobrazená špirálou, stočenou do počiatku stavových súradníc  $e$ ,  $P$ . Pre ďalšie úvahy je dostatočné orientovať sa na riešenie  $e(t)$  vyvolané kladným skokom polohy riadenia. V tomto prípade nás bude zaujímať iba prvý úsek špirály (3.15) pre  $e(t) > 0$ . Na obr. 4a,b sú zobrazené riešenia  $e(t)$  v rovine stavových súradníc  $e$ ,  $P$  pre  $K_{\min}$  a  $K_{\max}$ .

Aby sme vypočítali počet krokov adaptácie v obidvoch krajných prípadoch, uvažujeme miesto kriviek  $u = g(P)$  priamky, ktoré vzhľadom na prispôsobovanie v zmysle rekurentného vzťahu (3.2) predstavujú nepriaznivejšie podmienky. Tak pre  $K_{\min}$  budeme uvažovať priamku

$$(3.16) \quad u = \bar{m}_{\min} P + u_{k\min},$$

kde

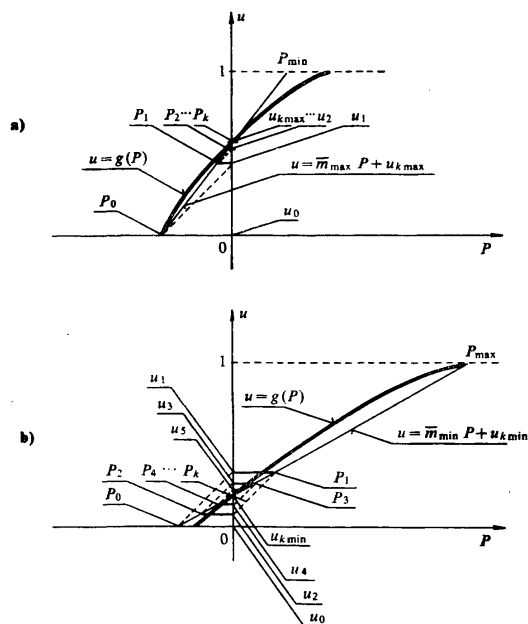
$$(3.17) \quad \bar{m}_{\min} = \frac{1 - u_{k\min}}{P_{\max}}.$$

Vzťah (3.17) vyplýva z obr. 4, v ktorom skok polohy riadenia  $\Delta w = 1$ .

Veličinu  $u_{k\min}$  určíme modelovaním funkcie  $u = g(P)$  na analógovom počítači. Podobne určíme veličinu  $P_{\max}$ .

Uvažujme rovnicu (3.16) v stupňovitom tvare, dosadíme do rekurentného vzťahu (3.2) a upravíme. Obdržíme tak

$$(3.18) \quad P_{s+1} - \left[ 1 + \frac{P_{\max}}{(1 - u_{k\min})} \beta \right] P_s = 0,$$



Obr. 4. Odvodenie počtu krokov pomocou aproximácie funkcie  $u = g(P)$  (a — pre  $K = K_{\max}$ ; b — pre  $K = K_{\min}$ ).

z čoho vyplýva podmienka stability adaptačného pochodu v tvare

$$(3.19) \quad 0 > \beta > -2 \frac{(1 - u_{k\min})}{P_{\max}}.$$

344 Podobne pre  $K_{\max}$

$$(3.20) \quad 0 > \beta > -2 \frac{(1 - u_{k\max})}{P_{\min}}.$$

Vyjadrieme rovnicu (3.16) v stupňovitom tvare

$$(3.21) \quad P_s = h_{\max}(u_s - u_{k\min}),$$

kde

$$h_{\max} = \frac{1}{\bar{m}_{\min}}.$$

Podľa rekurentného vzťahu (3.2) a rovnice (3.21) určíme postupnosť, ktorej členy vyjadrujú veľičiny lineárnych regulačných plôch  $P_s$  v procese prispôsobovania

$$(3.22) \quad \begin{aligned} u_0 &= 0, \\ P_0 &= -h_{\max}u_{k\min}, \\ u_1 &= u_0 + \beta P_0 = -\beta h_{\max}u_{k\min}, \\ P_1 &= h_{\max}(u_1 - u_{k\min}) = -h_{\max}u_{k\min}(\beta h_{\max} + 1), \\ u_2 &= -\beta h_{\max}u_{k\min}(\beta h_{\max} + 2), \\ P_2 &= -h_{\max}u_{k\min}[(\beta h_{\max})^2 + 2\beta h_{\max} + 1], \\ &\dots\dots\dots \\ u_s &= -\beta h_{\max}u_{k\min} \left[ \binom{s}{1} + \binom{s}{2} \beta h_{\max} + \binom{s}{3} (\beta h_{\max})^2 + \dots + \binom{s}{s} (\beta h_{\max})^{s-1} \right], \\ P_s &= -h_{\max}u_{k\min} \left[ \binom{s}{0} + \binom{s}{1} \beta h_{\max} + \dots + \binom{s}{s} (\beta h_{\max})^s \right]. \end{aligned}$$

Pre  $s$ -tú lineárnu regulačnú plochu teda platí

$$(3.23) \quad P_s = -h_{\max}u_{k\min}(1 + \beta h_{\max})^s.$$

Ak označíme

$$(3.24) \quad h_{\min} = \frac{1}{\bar{m}_{\max}},$$

môžeme pre  $K_{\max}$  (druhý hraničný prípad zmien parametrov) odvodiť

$$(3.25) \quad P_s = -h_{\min}u_{k\max}(1 + \beta h_{\min})^s.$$

Aby postupnosti, dané svojimi  $s$ -tými členmi konvergovali, musí platiť

$$(3.26) \quad |1 + \beta h_{\max}| < 1$$

a

$$(3.27) \quad |1 + \beta h_{\min}| < 1,$$

odkiaľ, vzhľadom na skutočnosť, že  $h_{\max} > h_{\min}$ , je

$$(3.28) \quad 0 > \beta > -2 \frac{1}{h_{\max}}.$$

Ak volíme  $\beta = -1/h_{\max}$ , tak prispôsobovanie pre  $K_{\min}$  sa vzhľadom na (3.23) uskutoční v priebehu jedného kroku. Podobný výsledok obdržíme pre  $K_{\max}$ , ak volíme  $\beta = -1/h_{\min}$ . V prvom prípade voľby  $\beta$  môže však prispôsobovanie pre  $K_{\max}$  prebiehať so zbytočne veľkým počtom krokov. Podobne v druhom prípade voľby  $\beta$ , pre  $K_{\min}$ . Vzhľadom na skutočnosť, že

$$(3.29) \quad -\frac{1}{h_{\max}} > -\frac{1}{h_{\min}},$$

volíme

$$(3.30) \quad -\frac{1}{h_{\max}} > \beta > -\frac{1}{h_{\min}},$$

čím zvážšime počet krokov adaptačného pochodu pre jeden hraničný prípad a zmenšíme pre druhý, takže prispôsobovanie pre ľubovoľné  $K$  z daného intervalu bude prebiehať pomerne rovnomerne. Pri voľbe  $\beta$  podľa nerovnosti (3.30) je nutné súčasne dodržať podmienku stability (3.28).

Na základe voľby  $\beta$  podľa nerovnosti (3.30) adaptačný pochod pre  $K_{\min}$  prebieha so striedaním znamienka postupnosti danej  $s$ -tým členom (3.23) a pre  $K_{\max}$  – monotónne, vzhľadom na  $s$ -tý člen postupnosti (3.25). Určíme také  $s$  a jemu zodpovedajúce  $\beta$ , pre ktoré  $s$ -té členy (3.23), (3.25) hraničných postupností neprekročia danú veličinu  $\varepsilon_p > 0$ . Uvažujme teda nerovnosť

$$(3.31) \quad |P_n| < \varepsilon_p$$

a dosadíme do nej  $s$ -tý člen (3.23) postupnosti

$$(3.32) \quad |-h_{\max} u_{k\min} (1 + \beta h_{\max})^s| < \varepsilon_p,$$

takže

$$(3.33) \quad |1 + \beta h_{\max}|^s < \frac{\varepsilon_p}{h_{\max} u_{k\min}},$$

346 odkiaľ

$$(3.34) \quad s = s_1 > \frac{\ln \frac{\varepsilon_p}{h_{\max} u_{k\min}}}{\ln |1 + \beta h_{\min}|}$$

pre  $K_{\min}$ . Podobne

$$(3.35) \quad s = s_2 > \frac{\ln \frac{\varepsilon_p}{h_{\min} u_{k\max}}}{\ln |1 + \beta h_{\min}|}$$

pre  $K_{\max}$ .

Rovnomernosť počtu krokov prispôsobovania zaistíme, ak najdeme také  $\beta$ , aby platilo

$$(3.36) \quad s_1 = s_2.$$

Dosaďme do rovnosti (3.36) vzťahy (3.34) a (3.35), odkiaľ po úprave

$$(3.37) \quad |1 + \beta h_{\max}|^v = |1 + \beta h_{\min}|,$$

kde

$$(3.38) \quad v = \frac{\ln \frac{\varepsilon_p}{h_{\min} u_{k\max}}}{\ln \frac{\varepsilon_p}{h_{\max} u_{k\min}}}.$$

V prípade, keď  $h_{\max} u_{k\min} \ll 1$ , môžeme  $\varepsilon_p$  uvažovať v tvare

$$(3.39) \quad \varepsilon_p = \frac{h_{\max} u_{k\min}}{h_{\min} u_{k\max}} h_{\max} u_{k\min}$$

v dôsledku požiadavky, aby  $\varepsilon_p$  bolo dostatočne malé. Pretože po voľbe  $\varepsilon_p$  v tvar (3.39)  $v = 2$ , je

$$(3.40) \quad |1 + \beta h_{\max}|^2 = |1 + \beta h_{\min}|$$

a vzhľadom na ohraničenia (3.30)

$$(3.41) \quad (1 + \beta h_{\max})^2 = 1 + \beta h_{\min},$$

odkiaľ pre  $\beta$  platí

$$(3.42) \quad \beta = \frac{h_{\min} - 2h_{\max}}{h_{\max}^2}.$$

Veličina  $\beta$ , určená podľa vzťahu (3.42) zabezpečuje rovnomerný počet krokov adaptačného pochodu pre daný rozsah zmien nekonštantného parametra sústavy  $K(t)$ . V prípade, keď  $v \neq 2$ , určí sa  $\beta$  z rovnice (3.37) graficky.

#### 4. ŠTRUKTÚRA ADAPTAČNÉHO OBVODU V SYSTÉME AUTOMATICKÉJ REGULÁCIE S PREMENLIVOU ŠTRUKTÚROU

Pri analýze dynamiky procesu prispôsobovania v predchádzajúcom odstavci sme vychádzali z predstavy riadiacej veličiny v tvare skokov polohy riadenia (impulzy, ktorých doba trvania presahovala regulačný pochod). Aby adaptačný obvod platil pre obecnější prípad riadenia v systéme s premenlivou štruktúrou, volíme riadiacu veličinu v tvare stupňovitej funkcie. Prítom závery odvodené pre dynamiku procesu prispôsobovania principiálne ostávajú v platnosti.

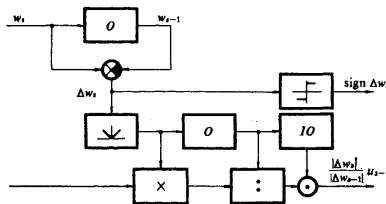
Uvažujme teda riadiacu veličinu  $w(s)$ , ktorej hodnotu v  $s$ -tom regulačnom pochode označíme  $w_s$ .  $s$ -tý regulačný pochod je potom vyvolaný skokom

$$(4.1) \quad \Delta w_s = w_s - w_{s-1}$$

v dôsledku ktorého sa uskutoční i  $s$ -tý krok adaptácie. Pre tento je veličina  $u_s$  v prepínacej podmienke nastavovaná v priebehu predchádzajúceho regulačného pochodu, vyvolaného skokom polohy riadenia

$$(4.2) \quad \Delta w_{s-1} = w_{s-1} - w_{s-2}.$$

Aby adaptujúci obvod správne nastavil veličinu  $u_s$  vzhľadom na  $s$ -tý a  $(s-1)$ -ý skok polohy riadenia, je nutné ju vynásobiť váhovým koeficientom  $\Delta w_s / \Delta w_{s-1}$ . Vzhľadom na skutočnosť, že adaptujúci obvod môže pomerne jednoducho vy-

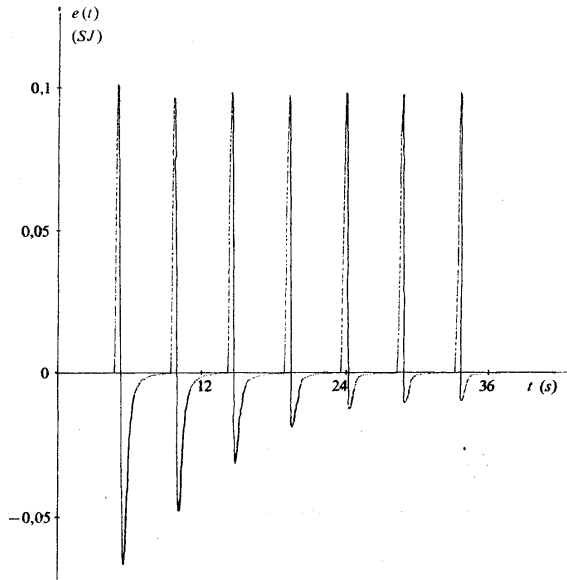
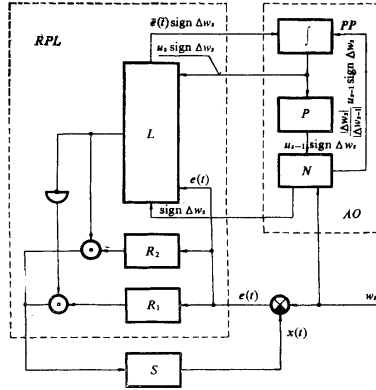


Obr. 5. Bloková schéma obvodu pre realizáciu rekurentného vzťahu adaptácie pri riadiacej veličine  $w_s$  v tvare stupňovitej funkcie ( $O$  — oneskorovací člen so vstupom  $|\Delta w_s|$ ;  $IO$  — identifikátor nuly so vstupom  $|\Delta w_{s-1}|$ ; vstup bloku  $\times$  je  $u_{s-1}$ ).

hodnotiť polaritu skokov polohy riadenia, nahradíme  $\text{sign } e'(t)$  v prepínacej podmienke výrazom  $\text{sign } \Delta w_s$ . Na základe uvedených spresnení, vyplývajúcich z predpokladu riadiacej veličiny v tvare stupňovitej funkcie, budeme uvažovať prepínaciu podmienku

$$(4.3) \quad p(t) = \text{sign } \Delta w_s [e(t) - u_s],$$

**Obr. 6.** Regulačný obvod s premenlivou štruktúrou adaptívnych vlastností (*RPL* — regulátor s premenlivou štruktúrou a logikou; *AO* — adaptačný obvod; *P* — pamäť; *N* — člen pre realizáciu rekurentného vzťahu adaptácie; *PP* — vstup počiatočných podmienok integrátora; ostatné označenie podľa obr. 1).

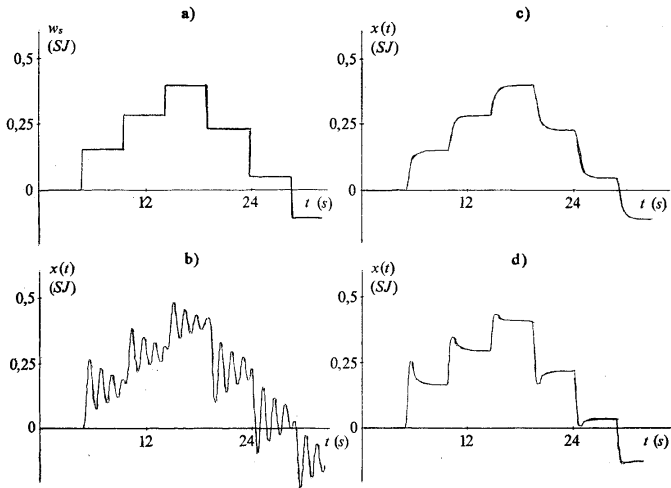


**Obr. 7.** Prispôsobenie prepínacej podmienky v priebehu regulačných pochodov vyvolaných riadiacou veličinou v tvare  $w(s) = \xi_s$ .

kde

$$(4.4) \quad u_s = \frac{|\Delta w_s|}{|\Delta w_{s-1}|} \cdot u_{s-1} .$$

Obvod, ktorý realizuje rekurentný vzťah (4.4) je uvedený na obr. 5. Jeho činnosť vyplýva z funkčného označenia blokov. Blok pre identifikáciu nuly (IO) blokuje disfunkciu obvodu pri vzniku neurčitého, prípadne nekonečne veľkého podielu



**Obr. 8.** Záznam regulačného pochodu, vyvolaného riadiacou veličinou v tvare stupňovitej funkcie (a — riadiaca veličina; b — regulovaná veličina pre kmitavú štruktúru obvodu; c — regulovaná veličina pre aperiodickú štruktúru obvodu; d — regulovaná veličina v priebehu prispôsobovania prepínacej podmienky).

$\Delta w_s / \Delta w_{s-1}$  pri  $\Delta w_{s-1} \rightarrow 0$ . Konečné usporiadanie regulačného obvodu, v ktorom sa adaptívne vlastnosti získajú prispôbovaním prepínacej podmienky regulátora s premenlivou štruktúrou, je uvedený na obr. 6. Štruktúra logiky je tá istá ako v prípade uvedenom na obr. 3 bez blokov označených hviezdíčkou a potrebných pre vytvorenie sign  $e'(t)$ . Miesto uvedeného sa v obvode pre realizáciu rekurentného vzťahu (N), obr. 5, formuje funkcia  $\text{sign } \Delta w_s$ , ktorá sa do logiky L privedie miesto funkcie  $\text{sign } e'(t)$  (na obr. 3 je tento spoj vyznačený čiarkovane).

Podľa blokovej schémy na obr. 6 bol pre vyšetrenie pochodu adaptácie vyhotovený model na analógovom počítači. Nastavenie veličiny  $u$  v prepínacej podmienke z hodnoty  $u = u_0 = 0$  na  $u = u_k$  je zaznamenané na obr. 7, pri pôsobení stupňovitej



350 funkcie  $w(s) = \xi s$ , kde  $\xi > 0$ . V procese prispôsobovania (nastavenia veličiny  $u$ ) je koeficient  $K = \text{konšt.}$  Na obr. 8 sú zaznamenané priebehy modelovania a) – riadiacej veličiny v tvare obecnej stupňovitej funkcie, b) – regulovanej veličiny pre kmitavú štruktúru obvodu, c) – regulovanej veličiny pre aperiodickú štruktúru obvodu a d) – regulovanej veličiny pre premenlivú štruktúru.

Ako vidieť z priebehu regulovanej veličiny vyobrazenej na obr. 8d, kvalita regulačného pochodu vzhľadom na prítomnosť premenlivej štruktúry a zvlášť ukončeného procesu prispôsobovania prepínacej podmienky, sa podstatne zlepšila oproti kvalite dvoch predchádzajúcich priebehov. Zaznamenaný proces prispôsobovania spočíval opäť v nastavení veličiny  $u_s$  z jej nulovej hodnoty v prepínacej podmienke tak, aby po jej splnení lineárna regulačná plocha regulačnej odchýlky bola nulová. Prepínacia podmienka zotrúva v prispôsobenom tvare po dobu, v ktorej môžeme ešte pomalé zmeny zosilnenia regulovanej sústavy  $K(t)$  považovať za zanedbateľné.

(Došlo dňa 13. novembra 1968.)

#### LITERATÚRA

- [1] M. Jelšina: Prispôsobovanie prepínacej podmienky v regulátore s premenlivou štruktúrou zmenám parametrov sústavy. Sborník vedeckých prác VŠT Košice, 1969 (v tlači).
- [2] J. Šindelář: Použití integrálních kritérií pro stanovení konstant regulačního obvodu s proměnnou strukturou. Správa ÚTIA ČSAV č. 163 (1966).
- [3] С. В. Емельянов: Системы автоматического регулирования с переменной структурой. Наука, Москва 1967.
- [4] A. Halousková: Aperiodická stabilita lineárnych regulačných obvodov. Automatizace 7 (1968), 197–200.

---

#### SUMMARY

### On a Possibility of the Obtainment of the Adaptability in the Automatic Control Circuit with the Discretely Variable Structure

MILAN JELŠINA

This paper deals with the possibility to obtain the adaptive property of the control circuit by means of the discretely variable structure. The variable structure is installed into the control circuit with the system having  $n$  non-constant parameters by means of the controller. This paper supposes to consider the linear regulation area of the error of the controlled variable after the performance of switching condition as the single non-constant parameter. During the  $k$  regulating processes forced by means of the unit steps of the position of the control the adaptation of the dynamic pro-

perties to the changes of parameters of the system will be realized by means of the setting of the switching condition in such a way in order that the linear regulation area has the zero value after performance of the switching condition. In the paper it is proposed the structure of the circuit realizing it. The function of the proposed circuit was checked by means of the analog computer. In the conclusion the records of the process of the adaptation realized during the action of the control variable to the circuit in the form of the step function are presented.

*Ing. Milan Jelšina, katedra základov automatizácie Strojnickej fakulty VŠT, Park Komenského 2, Košice.*