

1. ÚVOD DO RIADENIA STRIEDAVÝCH ELEKTRICKÝCH POHONOV S VNÚTENOU DYNAMIKOU BEZ SNÍMAČA NA HRIADELI

1.1. Základné princípy

1.1.1 Režimy s vnútenou dynamikou

Nové riadenie s vnútenou dynamikou pre elektrické pohony so striedavými motormi umožňuje dosiahnuť rozličné predpísané dynamické ozvy na žiadanú rýchlosť, ktoré budú ďalej uvádzané ako dynamické režimy. Tu sa uvažujú nasledovné z nich:

- a) režim *priameho riadenia zrýchlenia*, v ktorom zrýchlenie rotora sleduje časovo premenlivú požiadavku rýchlosti so zdanlivo nulovým dynamickým oneskorením,
- b) režim *konštantného zrýchlenia*, pri ktorom je rýchlosť rotora automaticky riadená tak, aby zodpovedala po častiach konštantným zmenám referenčnej rýchlosti s predpísaným konštantným zrýchlením (alebo spomalením),
- c) režim *konštantnej derivácie zrýchlenia* (pomernej zmeny zrýchlenia), pri ktorom sa zrýchlenie počas rozbehu riadi s lineárnym nárastom do polovice žiadanej rýchlosti a potom s lineárnym poklesom do nuly, kde sa dosiahne žiadaná rýchlosť (*pozn. S krivka*),
- d) režim *lineárnej dynamiky prvého rádu*, pri ktorom rýchlosť rotora sleduje časovo premenlivú referenčnú rýchlosť s lineárnou dynamikou prvého rádu s predpísanou časovou konštantou a
- e) režim *lineárnej dynamiky druhého rádu*, pri ktorom rýchlosť rotora sleduje časovo premenlivú referenčnú rýchlosť s lineárnou dynamikou druhého rádu s predpísanou dobou regulácie a koeficientom tlmenia.

Režim (a) sa podobá (vo svojom koncovom účinku, ale nie v prostriedkoch jeho dosiahnutia) dobre známej metóde *priameho riadenia momentu*. Tu sa uhlové zrýchlenie rotora riadi tak, aby sledovalo žiadané uhlové zrýchlenie so zanedbateľným dynamickým oneskorením. Tento režim sa môže jednoducho zmeniť na priame riadenie momentu tým, že sa žiadaný moment podelí momentom

zotrvačnosti rotora, aby sa získalo zodpovedajúce uhlové zrýchlenie. Do úvah nie je potrebné zahrnúť ekvivalentný moment zotrvačnosti hnanej mechanickej záťaže alebo iné dynamické vplyvy ako trenie, pretože celá dynamika záťaže sa môže uvážiť ako časovo premenlivý moment záťaže, ktorý je odhadovaný a kompenzovaný vo všetkých ďalej uvedených schémach riadenia.

Režimy (b), (c), (d) a (e) sú všetky špeciálnym prípadom režimu (a), v ktorom je zrýchlenie rotora riadené tak, aby sa dosiahla požadovaná dynamika. To je pravdivé v tom zmysle, že okamžité žiadané uhlové zrýchlenie hriadeľa rotora sa automaticky mení použitím žiadanej diferenciálnej rovnice vzťahujúcej sa na uhlové zrýchlenie pre dosiahnuté a žiadané uhlové rýchlosti.

Treba poznamenať, že metóda RVD je formou *linearizácie spätnej väzby* pre dynamické režimy (d) a (e), pretože požadovaný spätnoväzobný systém vyhovuje *lineárnej* diferenciálnej rovnici. Avšak pre také dynamické režimy, ako sú (b) a (c) požadovaný spätnoväzobný systém vyhovuje *nelineárnej* diferenciálnej rovnici a preto sa na opísanie tejto všeobecnej metódy viac používa výraz *riadenie s vnútenou dynamikou*.

Režim (b) je formou riadenia s hladkým rozbehom, ktorý je zovšeobecnený tak, aby poskytoval zmeny rýchlosti medzi jej dvomi ľubovoľnými žiadanými hodnotami s konštantným zrýchlením alebo spomalením.

Režimy (c) a (e) sú zamýšľané pre aplikácie, ktoré vyžadujú ozvy na zmeny rýchlosti bez otrasov (*ryvu trhnutia*) riadeného mechanizmu. Príkladmi využitia sú:

- a) diaľkovo riadený elektrický rušeň, kde pri náhlej zmene žiadanej rýchlosti riadičom sa ohraničí trhnutie (t. j. pomernú zmenu zrýchlenia) a
- b) riadenie žeriavu, kedy sa ohraničí nárast sily na zdvíhanie bremena v záujme *jemnejšieho* zaobchádzania so záťažou.

Režim (d) je zvlášť užitočný pre aplikácie, pri ktorých jeden alebo viac pohonov je prvkom celkového riadeného systému, ako napr. čerpadlá s premenlivou rýchlosťou pre riadenie výšky hladiny pri priemyslových procesoch zahrňujúcich spojené nádoby. Predpísaná časová konštanta rýchlosti pohonu sa potom stáva nastaviteľným parametrom pri návrhu celého riadeného systému.

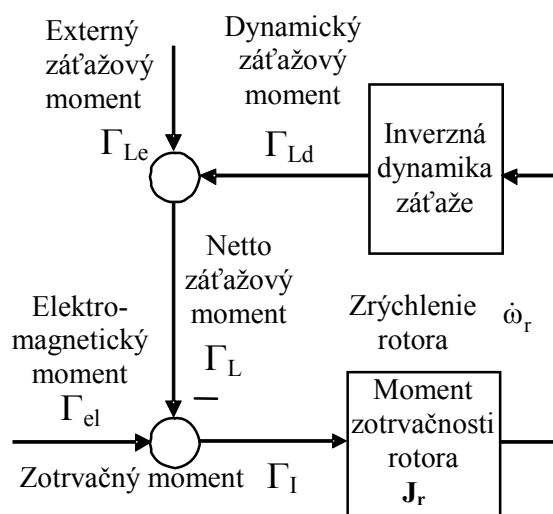
Vo všetkých týchto režimoch môžu sa moment vytvárajúce vektory prúdu a magnetického toku udržiavať navzájom kolmé tak, ako pri konvenčných metódach vektorového riadenia.

1.1.2 Základný dynamický model elektrického pohonu

Východiskom pre tvorbu riadiaceho systému pohonu je diferenciálna rovnica modelujúca motor a ním poháňanú záťaž. V jej základnej forme, ktorú možno aplikovať na všetky typy elektrických motorov, dáva táto rovnica do vzťahu elektrický moment $\Gamma_{el}(t)$ vyvíjaný motorom a záťažový moment $\Gamma_L(t)$ pôsobiaci na zotrvačnosť rotora s uhlovým zrýchlením rotora $\dot{\omega}_r$:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r} [\Gamma_{el}(t) - \Gamma_L(t)]. \quad (1.1.1)$$

Pre striedavé motory je $\Gamma_{el}(t)$ funkciou dvoch zložiek prúdu a dvoch zložiek magnetického toku, či už je vyjadrený v α, β systéme vzťahnutom na stator alebo v d, q systéme vzťahnutom na rotor a s prípadmi asynchrónneho motora (AM) a synchronného motora s permanentnými magnetmi (PMSM) sa budú osobitne zaoberať nasledujúce odseky tejto knihy. Ako bude neskôr uvedené, napätia statora možno riadiť tak, že skutočný elektrický moment sleduje žiadanú hodnotu so zanedbateľnými chybami a preto pre jednoduché úvodné vysvetlenie bude $\Gamma_{el}(t)$ v tejto časti uvádzané ako riadiaca veličina. Obr. 1.1.1 uvádza všeobecnú blokovú schému motora a jeho mechanickej záťaže.



Obr. 1.1.1 Bloková schéma motora a jeho záťaže spolu s definíciami momentov

Táto schéma je veľmi významná pre pochopenie, prečo riadiace systémy vyvíjané v rámci tohto výskumného programu vykazujú žiaducu vlastnosť – *robastnosť*, t. j. ich schopnosť poskytovať predpísané dynamické ozvy rýchlosti k ich referenčnému vstupu napriek neurčitostiam v znalosti poháňanej mechanickej záťaže a prítomnosti externých záťažových momentov. Ďalej bude vysvetlený tento model.

S odvolaním sa na obr. 1.1.1 možno záťažový moment Γ_L považovať za zložený z dvoch zložiek, *externého záťažového momentu* Γ_{Le} a *dynamického záťažového momentu* Γ_{Ld} . Najdôležitejšie je, že poháňaná mechanickej záťaž je v spätnej väzbe modelu reprezentovaná v *inverznej dynamickej forme*, takže Γ_{Ld} je zložka momentu potrebná na tvorbu daného pohybu. Napríklad, ak je na hriadeľ elektrického motora pripojená vyvážená hmota s momentom zotrvačnosti J_L , potom $\Gamma_{Ld} = J_L \dot{\omega}_r$. Toto nech je definované ako *inverzná dynamická rovnica*, pretože poskytuje Γ_{Ld} pre dané uhlové zrýchlenie rotora $\dot{\omega}_r$. Naopak, dynamická rovnica hmoty záťaže vzatá izolovane od motora je $\dot{\omega}_r = \Gamma_{Ld} / J_L$, pretože určuje uhlové zrýchlenie pre daný aplikovaný moment. *Zotrvačný moment* je tiež dôležitý. Je to moment, ktorý treba aplikovať na zotrvačnú hmotu rotora, aby sa dosiahlo dané uhlové zrýchlenie. Niekedy sa nazýva *dynamickým momentom*, ale tu sa použije alternatívny výraz, *zotrvačný moment* Γ_I , aby sa vyhlo možnostiam

zámeny s *dynamickým záťažným momentom* definovaným predtým. Platnosť modelu ukazuje vzťah zrejmy z obr. 1.1.1, že:

$$\Gamma_I = \Gamma_{el} - \Gamma_{Le} - \Gamma_{Ld}, \quad (1.1.2)$$

pričom ale $\Gamma_{Ld} = J_L \dot{\omega}_r$ a $\Gamma_I = J_r \dot{\omega}_r$. Odtiaľ:

$$J_r \dot{\omega}_r = \Gamma_{el} - \Gamma_{Le} - J_L \dot{\omega}_r, \quad (1.1.3)$$

z čoho vyplýva:

$$\dot{\omega}_r = (\Gamma_{el} - \Gamma_L) / (J_r + J_L). \quad (1.1.4)$$

Toto je očakávaný výsledok.

1.1.3 Všeobecná rovnica pre riadenie elektrického pohonu s vnútenou dynamikou

Všetko, čo sa tu vyžaduje, je napísanie diferenciálnej rovnice pre *žiadané dynamické chovanie v uzavretej slučke*, ktoré dáva do vzájomného vzťahu uhlové zrýchlenie rotora, uhlovú rýchlosť rotora a žiadanú uhlovú rýchlosť rotora ω_d . Táto bude obyčajne toho istého rádu ako mechanická rovnica motora (1.1.1), t. j. prvého rádu. Všeobecne to možno zapísať:

$$\dot{\omega}_r = a_d(\omega_r, \omega_d), \quad (1.1.5)$$

kde voľba *žadanej funkcie zrýchlenia rotora* $a_d(\omega_r, \omega_d)$ určí *dynamický režim* opísaný v ods. 1.1.1. Motor, tak ako je modelovaný s (1.1.1), je potom *nútený sledovať žiadanú dynamiku* podľa (1.1.5), ako vyplýva z porovnania pravých strán rovníc:

$$\frac{1}{J_r} [\Gamma_{el} - \Gamma_L] = a_d(\omega_r, \omega_d). \quad (1.1.6)$$

Toto sa bude nazývať *rovnica vnútenej dynamiky*. Treba poznamenať, že v prípadoch, keď $a_d(\omega_r, \omega_d)$ je lineárnou funkciou jej argumentov, uzavretý systém je lineárny a rovnica (1.1.6) sa bude nazývať *linearizačnou rovnicou*. Elektrický moment vyžadovaný od motora na dosiahnutie požadovaného dynamického režimu sa potom získa určením Γ_{el} z rovnice (1.1.6), čo dáva $\Gamma_{el} = \Gamma_L + J_r a_d(\omega_r, \omega_d)$. V praktických riadiacich systémoch sa musí použiť pomerne presný odhad \tilde{J}_r z J_r .

Našťastie, ako ukážeme v ďalších odsekoch, možno urobiť odhad $\hat{\Gamma}_L$ z Γ_L použitím pozorovateľa, ktorého použitie je nevyhnutné. Ako bolo prv uvedené, Γ_{el} sa považuje za riadiacu veličinu, pretože statorové napätia motora sa môžu riadiť tak, aby sa sledoval žiadaný elektrický moment Γ_{el} so zanedbateľnými chybami. Praktický tvar riadiaceho algoritmu s vnútenou dynamikou je potom:

$$\Gamma_{el\ d} = \hat{\Gamma}_L + J_r \cdot a_d(\omega_r, \omega_d). \quad (1.1.7)$$

Dôležité je všimnúť si, že zložka $\hat{\Gamma}_L$ elektrického momentu motora v (1.1.7) účinne vyrovnáva celý záťažový moment Γ_L v obr. 1.1.1, ak ide o dobrý odhad a tým robí riadiaci systém pohonu takmer nezávislým od dynamiky poháňanej záťaže a na externom záťažovom momente, pokrývajúc nielen dynamický záťažový moment Γ_{Ld} , ale aj Γ_{Le} . Úspešná činnosť riadiaceho systému preto kriticky závisí od pozorovateľa záťažného momentu.

Pohon je možné prinútiť pracovať aj v dynamickom režime vyššom ako prvého rádu, čo sa dá urobiť pomocou digitálne integrovaného modelu žiadanej dynamiky. Spojitý tvar tohto modelu možno zapísať ako:

$$\omega_m^{(n)} = f(\omega_m^{(n-1)}, \omega_m^{(n-2)}, \dots, \omega_m, \omega_d), \quad (1.1.8)$$

kde ω_m je uhlová modelová rýchlosť rotora a $\omega_m^{(q)} = \frac{d^q \omega_m}{dt^q}$ pre $q=1, 2, \dots, n$.

Potom žiadané zrýchlenie použité v rovnici (1.1.7) je:

$$a_d = \dot{\omega}_m. \quad (1.1.9)$$

Na dôvažok k tomu však musí byť uzavretá slučka využívajúca odhadovanú uhlovú rýchlosť rotora z pozorovateľa, ktorá bude označená ako $\hat{\omega}_r$. To sa dosiahne využitím $\hat{\omega}_r$ na riadenie modelu, takže žiadaná spojitá verzia modelu je:

$$\begin{aligned} \omega_m^{(n)} &= f(\omega_m^{(n-1)}, \omega_m^{(n-2)}, \dots, \ddot{\omega}_m, \dot{\omega}_m, \hat{\omega}_r, \omega_d) \\ a_d &= \dot{\omega}_m \end{aligned} \quad (1.1.10a)$$

Nakoniec tento dynamický model musí byť numericky integrovaný digitálnym procesorom riadiacim pohon, čo sa môže urobiť priamo použijúc opis v stavovom priestore v kanonickom tvare riaditeľnosti a explicitnú Eulerovu integráciu.

Spojitély model v stavovom priestore má stavové premenné $x_1 = \omega_m$, $x_2 = \dot{\omega}_m$, ...
 $x_n = \omega_m^{(n-1)}$ a je nasledovný:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= x_3 \\
 &\vdots \\
 \dot{x}_{n-1} &= x_n \\
 \dot{x}_n &= f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_3, x_2, \hat{\omega}_r, \omega_d) \\
 a_d &= x_2
 \end{aligned}
 \tag{1.1.10b}$$

Zodpovedajúci diskretný model pre digitálnu implementáciu je potom:

$$\begin{aligned}
 x_1(k+1) &= x_1(k) + x_2(k) \cdot h \\
 x_2(k+1) &= x_2(k) + x_3(k) \cdot h \\
 &\vdots \\
 x_{n-1}(k+1) &= x_{n-1}(k) + x_n(k) \cdot h \\
 x_n(k+1) &= x_n(k) + [f(x_{n-1}(k), x_{n-2}(k), \dots, x_3(k), x_2(k), \hat{\omega}_r(k), \omega_d)] \cdot h \\
 a_d &= x_2(k+1),
 \end{aligned}
 \tag{1.1.11}$$

kde h je dĺžka kroku numerickej integrácie. Jeden z *lineárnych dynamických režimov druhého rádu* aplikovaných v tejto knihe využíva práve túto metódu.

V niektorých prípadoch je možné pracovať v dynamických režimoch vyšších rádoov bez takéhoto modelu, ak sú už dostupné derivácie z (1.1.10a) ako odhady z vhodného algoritmu. Potom sa modelová premenná ω_m z (1.1.10a) nahradí odhadom rýchlosti rotora $\hat{\omega}_r$ a $\dot{\hat{\omega}}_r$, čo je vlastne a_d , ktoré sa určí z rovnice:

$$a_d = g(\hat{\omega}_r^{(n-1)}, \hat{\omega}_r^{(n-2)}, \dots, \dot{\hat{\omega}}_r, \hat{\omega}_r, \omega_d).
 \tag{1.1.12}$$

1.2. Žiadané funkcie zrýchlenia pre dynamické režimy

Teraz uvedieme funkcie $a_d(\omega_r, \omega_d)$ dávajúce dynamické režimy prvého rádu, ako aj iné funkcie poskytujúce ďalšie dynamické režimy uvedené a opísané v časti 1.1.1.

1.2.1 Režim priameho riadenia zrýchlenia

V tomto prípade a_d nie je funkciou ω_r a ani ω_d , ale je externým signálom, ktorý zadáva užívateľ pohonu. Pohon bude prirodzene realizovať len také žiadané zrýchlenie rotora a_d , ktoré je v hraniciach určených maximálnym elektrickým momentom, externým záťažovým momentom a dynamikou poháňanej mechanickej záťaže.

1.2.2 Režim riadenia s konštantným zrýchlením

V tomto prípade je žiadané zrýchlenie určené konštantnou žiadanou hodnotou uhlovej rýchlosti ω_d a žiadanou dobou zrýchľovania T_s a dynamický moment je potom určený znamienkom chyby uhlovej rýchlosti:

$$a_d = \frac{\omega_d}{T_s} \operatorname{sgn}(\omega_d - \hat{\omega}_r), \quad (1.2.1)$$

kde $\hat{\omega}_r$ je filtrovaný odhad rýchlosti rotora z už zmieneného pozorovateľa

$$a \quad \operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{for } x > 0 \\ 0 & \text{for } x = 0 \\ -1 & \text{for } x < 0 \end{cases}. \text{ Tento tvar rozbehovej ozvy sa bežne nachádza v}$$

priemyslových elektrických pohonoch navrhnutých dosiahnuť konštantnú žiadanú rýchlosť.

1.2.3 Režim riadenia s konštantnou deriváciou zrýchlenia

V tomto režime zrýchlenie počas rozbehu narastá z nuly lineárne až po dosiahnutie polovice žiadanej rýchlosti a potom lineárne klesá do nuly s tým istým sklonom, až pokiaľ sa nedosiahne žiadaná rýchlosť. Takto je počas rozbehu hodnota derivácie zrýchlenia, ε (*t. j. ryv - trhnutie*) konštantná a maximálne zrýchlenie sa dosiahne v prostriedku rozbehového intervalu. Žiadané zrýchlenie, ktoré dosiahne parabolický pohyb, sa môže generovať nasledovne:

$$a_d = \begin{cases} \varepsilon t \cdot \operatorname{sgn}(\omega_d - \hat{\omega}_r) & \text{pre } t \in (0, T_s / 2) \\ \varepsilon(T_s - t) \cdot \operatorname{sgn}(\omega_d - \hat{\omega}_r) & \text{pre } t \in (T_s / 2, T_s) \end{cases}, \quad (1.2.2)$$

kde konštantná derivácia zrýchlenia je $\varepsilon = 4\omega_d / T_s^2$. Dôležité je vypočítať maximum amplitúdy zrýchlenia počas tohto dynamického režimu, pretože táto určuje maximum žiadaného momentu motora. Je daná ako $a_{\max} = 2\omega_d / T_s$.

Žiadané zrýchlenie podľa (1.2.2) platí len pre aplikácie rozbehu pohonu, ale môže sa zovšeobecniť pre nelineárny dynamický režim druhého rádu, ktorý bude spojiť riadiť rýchlosť pohonu z jednej konštantnej hodnoty na druhú v dvoch intervaloch s rovnakou a opačnou hodnotou derivácie zrýchlenia. Tieto intervaly vo všeobecnosti nemajú rovnaké trvanie. Matematicky je to podobné spätnoväzobnému tvaru časovo-optimálneho riadenia polohy hmoty pohybujúcej sa bez trenia. Rovnicu pre potrebné žiadané zrýchlenie možno odvodiť použitím všeobecnej metódy uvedenej na konci ods. 1.1.3 (pozri rovnicu (1.1.9)):

$$a_d = -a_{\max} \cdot \operatorname{sgn}\left(\hat{\omega}_r - \omega_d + \frac{1}{2a_{\max}} \dot{\hat{\omega}}_r \left| \dot{\hat{\omega}}_r \right| \right). \quad (1.2.3)$$

Ako bude ukázané, $\dot{\hat{\omega}}_r$ sa pomerne ľahko získa z pozorovateľa.

1.2.4 Lineárny režim riadenia prvého rádu

V tomto prípade uzavretý systém sa stáva lineárnym prvého rádu s časovou konštantou T_ω a rovnica potrebná pre zaistenie žiadaného zrýchlenia je:

$$a_d = \frac{1}{T_\omega} (\omega_d - \hat{\omega}_r). \quad (1.2.4)$$

Prenosová funkcia uzavretej slučky rýchlostne riadeného systému je potom $\frac{\omega_r(s)}{\omega_d(s)} = \frac{1}{1 + sT_\omega}$. Približná doba ustálenia tohto systému, za ktorú sa dosiahne zhruba

95 % ustáleného stavu ozvy rýchlosti, je dobre známa a daná ako:

$$T_s = 3T_\omega. \quad (1.2.5)$$

Toto je dynamický režim použitý pri prvých experimentoch s RVD so striedavými pohonmi.

1.2.5 Lineárny režim riadenia druhého rádu

V tomto prípade je žiadaná diferenciálna rovnica uzavretého obvodu pre ideálnu rýchlosť rotora daná ako:

$$\ddot{\omega}_r = \omega_n^2(\omega_d - \omega_r) - 2\xi\omega_n\dot{\omega}_r, \quad (1.2.6)$$

kde ω_n je netlmená prirodzená frekvencia a ξ je koeficient tlmenia. Obidva tieto parametre možno zvoliť ľubovoľne. Výsledná prenosová funkcia pre spätnoväzobné riadenie rýchlosti pohonu je $\frac{\omega_r(s)}{\omega_d(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$ a približná doba ustálenia tohto systému, za ktorú sa dosiahne zhruba 95 % ustáleného stavu ozvy rýchlosti, je daná ako:

$$T_s = \frac{4.5}{\xi\omega_n}. \quad (1.2.7)$$

Sledujúc metódu uvedenú v časti 1.1.3 (pozri rovnice (1.1.5) až (1.1.8) vrátane), vytvorí sa model v reálnom čase druhého rádu, ktorý je riadený použitím odhadu rýchlosti $\hat{\omega}_r$ z pozorovateľa. Spojitá verzia tohto modelu sa vytvorí z (1.2.6) a spolu s rovnicou žiadaného zrýchlenia je daná nasledovne:

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_m &= \omega_n^2(\omega_d - \omega_m) - 2\xi\omega_n\dot{\omega}_m, \\ a_d &= \dot{\omega}_m \end{aligned} \quad (1.2.8)$$

Aby sa priamo uľahčila numerická integrácia, je zodpovedajúci model v stavovom priestore so stavovými premennými $x_1 = \omega_m$ a $x_2 = \dot{\omega}_m$ nasledujúci:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \omega_n^2(\omega_d - x_1) - 2\xi\omega_n x_2, \\ a_d &= x_2 \end{aligned} \quad (1.2.9)$$

Zodpovedajúci diskretný model pre číslicovú implementáciu je potom:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) + x_2(k) \cdot h \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + \left[\omega_n^2(\omega_d - x_1(k)) - 2\xi\omega_n x_2(k) \right] \cdot h, \\ a_d &= x_2(k+1) \end{aligned} \quad (1.2.10)$$

V tomto zvláštnom prípade, možno urobiť pohodlnú *skratku*, aby sa vyšlo modelu v stavovom priestore. Pri vrátení sa do (1.2.6) ω_r sa nahradí pomocou $\hat{\omega}_r$ a $\hat{\omega}_r$ pomocou a_d , čo dáva:

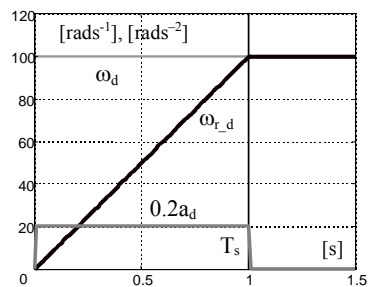
$$\dot{a}_d = \omega_n^2 (\omega_d - \hat{\omega}_r) - 2\xi\omega_n a_d, \quad (1.2.11)$$

ktorý už možno numericky integrovať, čím sa získa nasledujúci iteračný algoritmus:

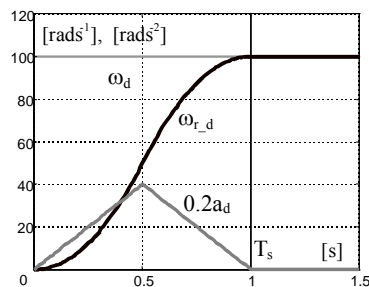
$$a_d(k+1) = a_d(k) + [\omega_n^2 (\omega_d - \hat{\omega}_r) - 2\xi\omega_n a_d(k)] \cdot h. \quad (1.2.12)$$

Táto metóda bola experimentálne úspešne overená rovnako ako podľa (1.2.10).

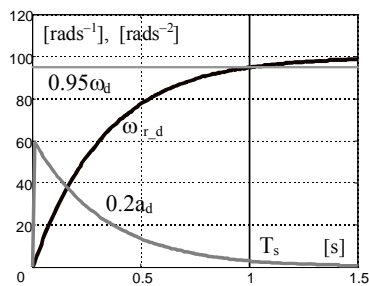
Priebehy rýchlosti a zrýchlenia pre vyššie opísané štyri dynamické režimy (1.2.2 – 1.2.5) ukazuje obr. 1.2.1.



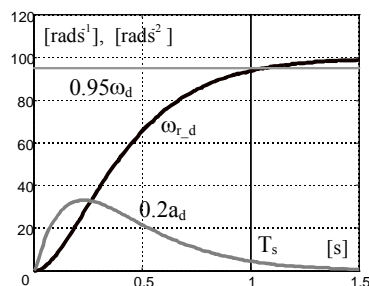
a) konštantné zrýchlenie



b) konštantná derivácia zrýchlenia



c) lineárna dynamika prvého rádu



d) lineárna dynamika druhého rádu

Obr. 1.2.1 Priebehy rýchlosti a zrýchlenia pre jednotlivé dynamické režimy