

# SIMULACE NEGATIVNÍCH ÚČINKŮ ČÍSLICOVÉHO VYHODNOCOVÁNÍ OTÁČEK PRO REGULACI

*Ing. Zdeněk Němec, CSc.*

VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky

## 1. Úvod

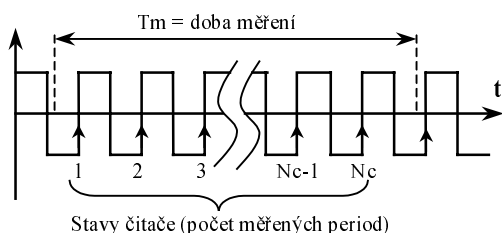
Jednou z nejrozšířenějších regulací je regulace otáček. V současné době již velká část pracuje číslicově, tj. původní analogová hodnota otáček (spojitá v čase i ve velikosti) je převedena na číslicový signál a ten je pak v časově diskretních okamžicích zpracováván v číslicově pracujícím regulátoru. Přes jednoznačnou výhodnost číslicové regulace vůči analogovým technikám je nutné řešit i nové problémy, které sebou tato technika přináší.

Důležitou a někdy i kritickou podmínkou dobré činnosti regulace je správné vyhodnocování „okamžité“ hodnoty otáček. Jde o převod rychlosti otáčení hřídele na číselný údaj, který musí věrně zastupovat otáčky v čase - požadavek dynamiky vyhodnocování, ale i v hodnotě - požadavek přesnosti vyhodnocování.

V článku je ukázáno, že eventuální nedostatky převodu otáček na číselný údaj mohou způsobit nežádoucí chování regulačního obvodu. Zejména u regulované soustavy s rezonančními převýšeními ve své charakteristice a při výskytu určitých interferenčních vlivů může dojít i k nestabilitě regulace.

## 2. Číslicové vyhodnocování otáček

Snímání otáček je většinou uspořádáno tak, že na hřídeli regulovaného rotujícího zařízení je umístěn ozubený věnec nebo značky a čidlo na stojící části generuje impulzní signál, jehož okamžitá frekvence vyjadřuje rychlost otáčení. Ze dvou možných principů vyhodnocování zde uvažujeme klasický způsob vyhodnocování kmitočtu. Je založen na čítání impulzů otáčkového signálu po přesně definovanou konstantní dobu měření  $T_m$ , viz obr 1.



Obr 1.

Vyhodnocování impulzního signálu z čidla otáček.

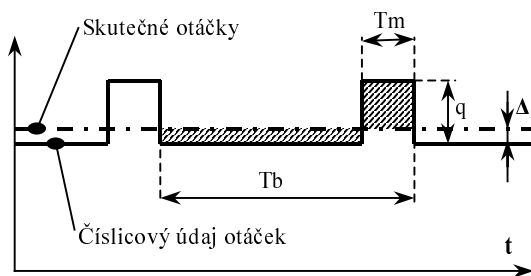
Vyhodnocované otáčky (správněji rychlost otáčení) jsou zastoupeny kmitočtem, který je dán poměrem načtených impulzů  $N_c$  a doby měření  $T_m$ :  $f = N_c / T_m$  [Hz; -, s].

Dynamika regulace by neměla být měřením negativně ovlivněna, proto se interval  $T_m$  volí co nejkratší, běžně se volí v rozmezí 0.02 až 0.2 s. V protikladu s tímto je ale požadavek na přesnost a rozlišovací schopnost vyhodnocování. Jde o problém diskretizace velikosti údaje o otáčkách, protože údaj je dán jen celočíselnými hodnotami stavu čítače  $N_c$ . Proto se velikost takto získaného měřícího kmitočtu mění schodovitě a poměrné přírůstky změn o velikosti  $q = 1/N_c$  nazýváme kvantováním. Údaj otáček je tedy zatížen relativní chybou s pásmem nejistoty  $\pm q$ . Pro dosažení co největší přesnosti je tedy nutné volit co největší počet zubů nebo značek na obvodu hřídele. Potřebný počet zubů  $Z$  stanovíme s ohledem na otáčky  $n$  a měřící dobu  $T_m$  takto:  $Z = 60/(n \cdot q \cdot T_m)$  [-; ot/min, -, s]. V praxi nutno volit kompromis mezi chybou kvantováním  $q$  a počtem zubů  $Z$ .

### 3. Podstata nežádoucích jevů

V běžném režimu regulace otáček jsou regulované otáčky po většinu provozní doby dostatečně proměnlivé a střední hodnota číslicového údaje otáček odpovídá střední hodnotě skutečných otáček. Diskretizační (kvantovací) chyba číslicového vyhodnocování má pak náhodný charakter a do regulačního obvodu vstupuje jako poruchová veličina se širokospektrálním šumem. U tohoto šumu je vhodné filtrovat jen vysokofrekvenční spektrum, protože středofrekvenční a nízkofrekvenční oblast je nepostradatelná pro vlastní regulaci.

Velmi nepříznivý stav nastane, pokud otáčky mají konstantní velikost a doba měření  $T_m$  se jen velmi málo liší od celočíselného násobku period otáčkového signálu. Pak dojde k období interference, kdy kumulované odchylky měření v jednotlivých periodách překročí kvantum  $q$  až za poměrně dlouhou dobu a údaj otáček pak obsahuje nežádoucí pomalé periodické změny – viz obr.2.



Obr.2

Vznik nežádoucích periodických změn v číslicovém údaji otáček

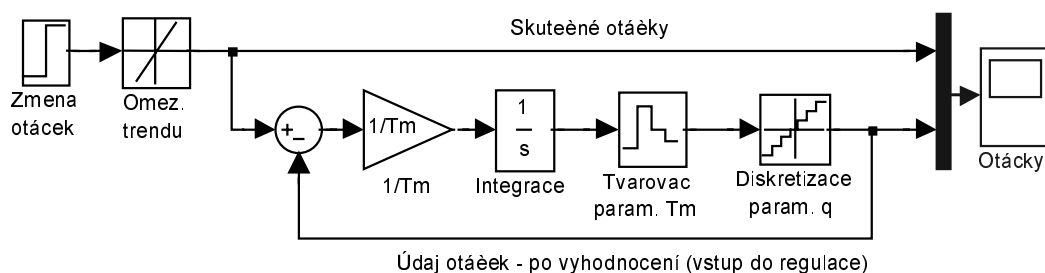
$\Delta$  = rozdíl údaje otáček od skutečných otáček (poměrná hodnota)

$T_b$  = perioda změn číslicového údaje (nežádoucích buzení v regulaci)

Perioda  $T_b$  nežádoucího buzení se mění v závislosti na rozdílu otáček takto:  $T_b = T_m \cdot q / \Delta$ . Při analýze popisovaných dějů naopak stanovíme kritickou periodu  $T_b$  z rezonanční frekvence regulované soustavy (v dále uvedeném příkladě  $T_b = 1/0.23 \text{ Hz} = 4.35 \text{ s}$ ) a hledáme hladiny odchylek  $\Delta$ , při nichž mohou vznikat nebezpečné oscilace:  $\Delta = T_m \cdot q / T_b$ .

### 4. Model číslicového vyhodnocování otáček

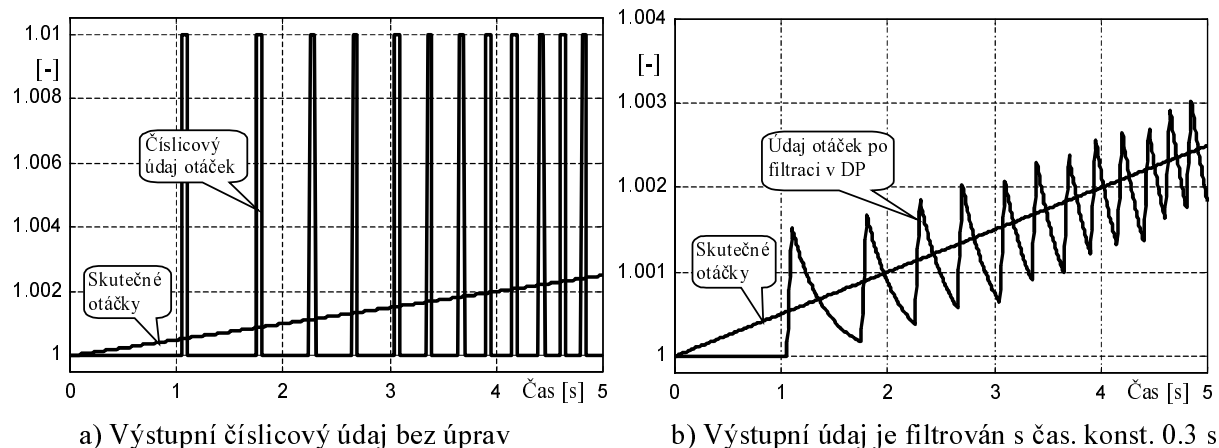
Pro simulační ověřování vlastností regulace bylo nutné navrhnout model vyhodnocování otáček, který odpovídá skutečnosti a tudíž má výše popsané vlastnosti. Pro daný úkol vyhovuje model v prostředí Simulink, uvedený ve střední části obr.3.



Obr.3. Model číslicového vyhodnocování otáček

Na obr.4 jsou příklady výsledků simulací vyhodnocovacího obvodu otáček s dobou měření  $T_m = 0.05 \text{ s}$  a pro takový počet zubů na hřídeli, že při jmenovitých otáčkách má impulzní signál kmitočet 2000 Hz, což určuje diskretizační (kvantovací) interval  $q = 0.01 [-]$ . Chování samotného vyhodnocovacího obvodu je demonstrováno na obr.4a. Při přesně jmenovitých otáčkách ( $1=100 \%$ ) je i odpovídající číslicový údaj ustálený. Při otáčkách nepatrně větších dochází k občasnému „přeskoku“ hodnoty na sousední kvantizační úroveň (zde na 101 %) a to na dobu  $T_m$ . Četnost těchto změn se zvyšuje se stoupajícími otáčkami a

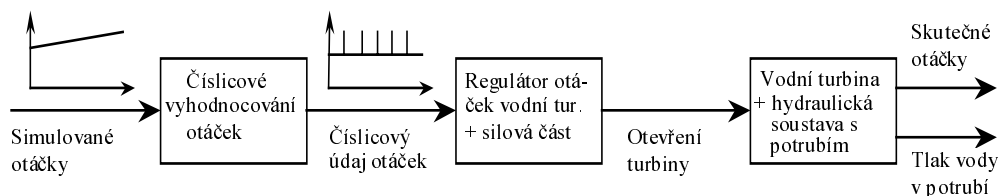
nové ustálení by nastalo až na sousední kvantizační úrovni 101 %. Je tedy zřejmé, že k určité periodě  $T_b$  nebezpečného buzení lze nalézt odpovídající úroveň otáček a při těchto otáčkách je pak možný vznik oscilací. Na obr.4b je ukázán efekt eventuálního použití filtru typu dolní propusti, zařazeného na výstup vyhodnocovacího obvodu. Filtr potlačí účinky nežádoucích rychlých změn vstupujících do regulačního obvodu a výrazně zlepši ustálenost navazující regulace, ale bohužel nepříznivě zhoršuje dynamiku regulace.



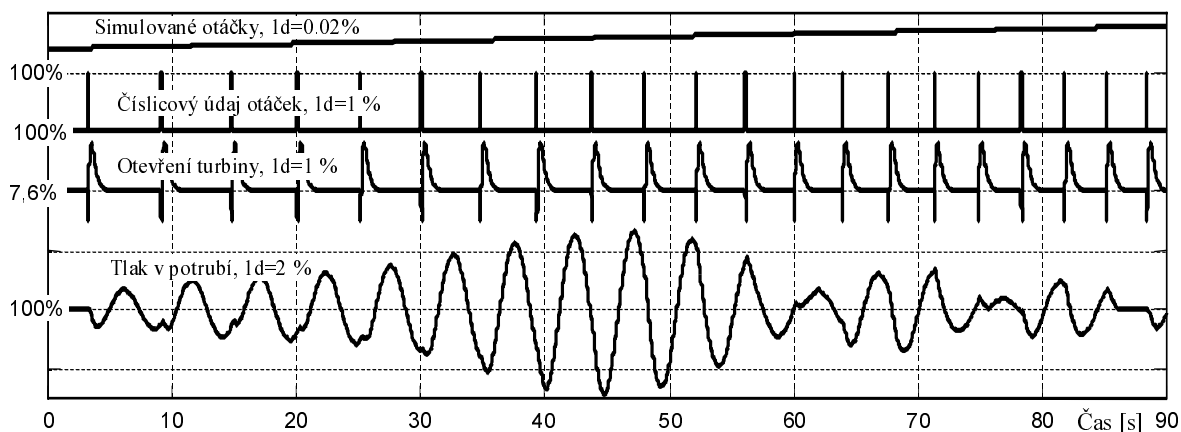
Obr.4. Příklad vstupů a výstupů při číslicovém vyhodnocování otáček

### 5. Příklad působení na regulovanou soustavu – rozpojená smyčka

Negativní účinky číslicového vyhodnocování otáček je možné ukázat na příkladu regulace otáček vodní turbíny s dlouhým přivaděčím potrubím. Vodní sloupec v potrubí je náchylný k rezonančnímu kmitání tlaku vody, zejména při malých otevřeních turbíny, což odpovídá volnoběžnému chodu turbosoustrojí. Z pramene [2] jsou použity parametry Přečerpávací vodní elektrárny Čierny Váh (rezonance na kmitočtech 0,23 Hz, 0,69 Hz, atd.). Modely technologie elektrárny byly zpracovány již dříve a jejich popis je mimo rámec tohoto příspěvku.



Obr.5. Schéma simulované regulační smyčky (bez zpětné vazby)



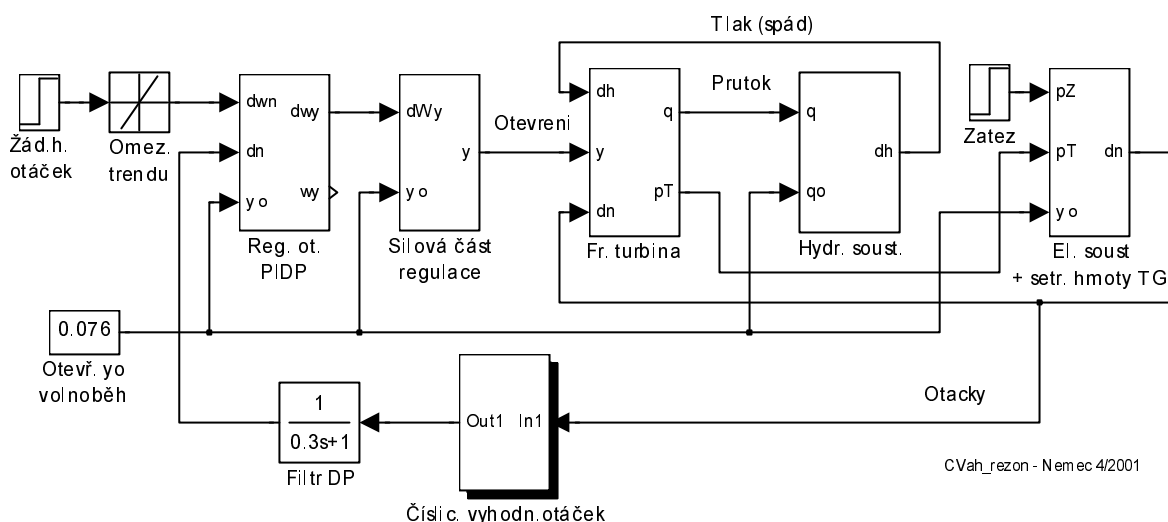
Obr.6. Vznik oscilací v regulované soustavě při pomalé změně otáček

Na obr.5 je uveden zkoumaný regulační obvod s vyznačením hlavních bloků. Na obr.6 jsou pak simulací získané časové průběhy hlavních veličin pro případ pomalu se měnících otáček vodní turbíny. V rozpojené regulační smyčce je dobře pozorovatelný nežádoucí efekt buzení proměnlivým kmitočtem z obvodu vyhodnocování otáček, přičemž kritická shoda s rezonancí soustavy nastala přibližně uprostřed záznamu.

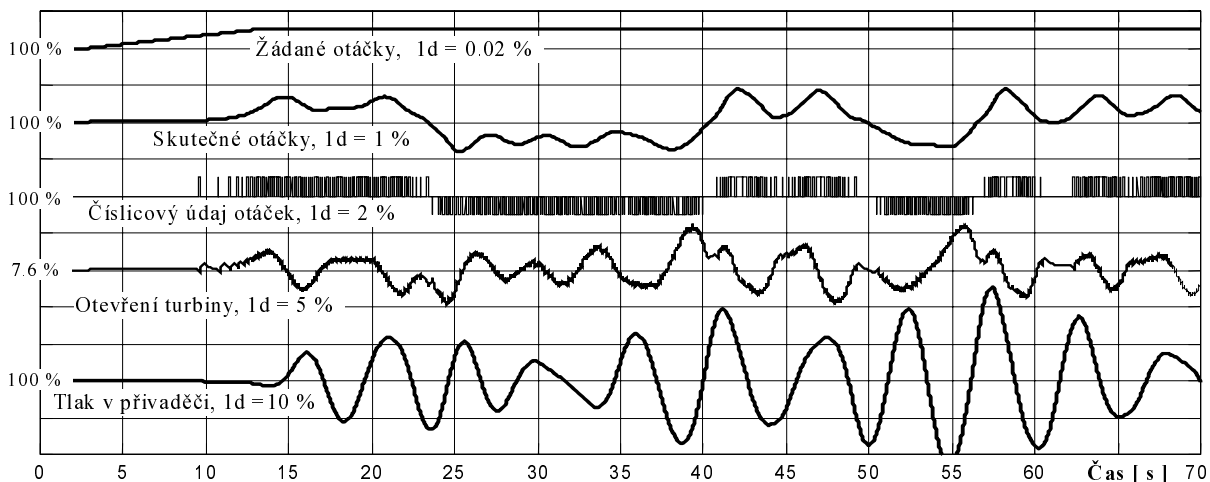
## 6. Simulace reálného provozního režimu

Důsledky zde popisovaného problematického vyhodnocování otáček je vhodné ukázat na příkladu regulace již uvedené soustavy s vodní turbínou. V reálných podmínkách jde o uzavřený regulační obvod otáček a o provoz na volnoběhu. Zde vynikne užitečnost simulace, protože analýza přímým měřením v provozu je téměř nemožná z důvodu malých změn otáček (většinou pod 1 %) a dále by bylo problematické udržet delší dobu konstantní otáčky na přesně kritické hodnotě (těsně nad nebo pod některou kvantovací úroveň).

K tomuto účelu byly upraveny a doplněny již dříve vyvinuté počítačové modely regulace otáček turbosoustrojí vodní elektrárny. Modely soustavy byly verifikovány s řadou měření na dané elektrárně, zejména s experimenty z [2]. Model regulátoru byl záměrně ponechán jako analogový, čímž lze snadněji analyzovat vliv samotného číslicového vyhodnocování otáček. Pro simulace bylo použito modelu dle obr. 7.

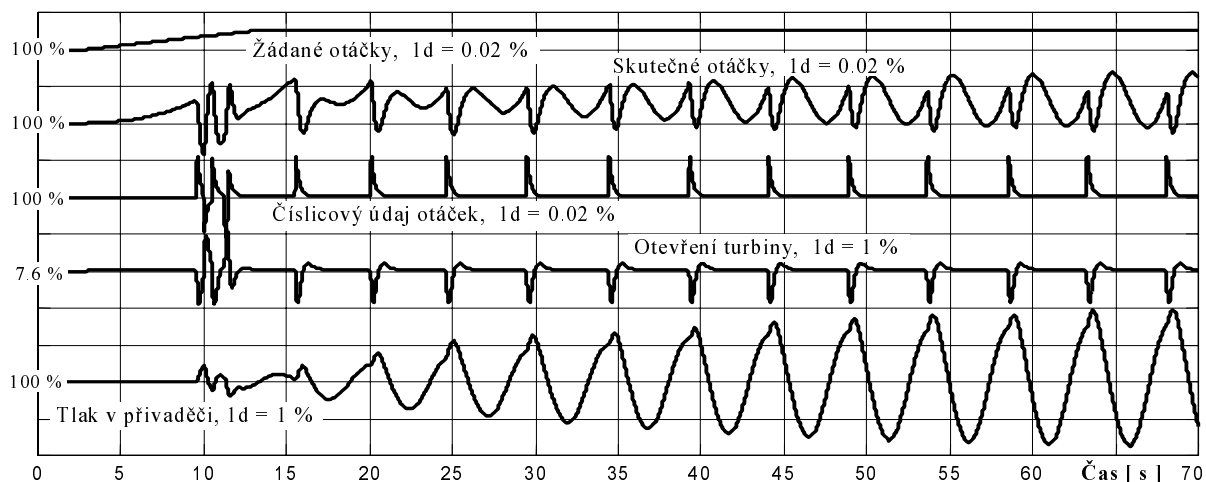


Obr.7. Celkové schéma modelu regulace otáček vodní turbíny, včetně vyhodnocování otáček.



Obr.8. Vznik velkých nežádoucích změn veličin při volnoběhu (bez filtrace otáček)

Sklony k oscilacím při použití zde předpokládaného principu vyhodnocování otáček se mohou vyskytnout hlavně při volnoběhu soustrojí. Na obr.8 a obr.9 jsou soustrojí zpočátku v ustáleném stavu s jmenovitými otáčkami. Po 3 s je zvýšena žádaná hodnota otáček o 0.01 %, což je běžná operace během fázování. Obr.8 ukazuje následné nepříjemné provozní stavy při absenci filtrace číslicového signálu otáček. Obr.9 demonstruje výrazné zlepšení poměrů použitím filtrace. Je tedy zřejmé, že oscilace nejsou podmíněny jen setrváváním na kritických hodnotách otáček, ale i proměnný režim generuje spektrum podnětů, které mohou způsobovat nežádoucí chování.



Obr.9. Vznik kmitů při volnoběhu (zmírnění filtrací, ale problém trvá)

## 7. Závěr

Aplikace číslicové techniky v regulaci otáček rotujících zařízení je jednoznačně výhodná, ale specifickým problémem je číslicové měření otáček a vyhodnocování jejich „okamžitých“ hodnot, potřebných pro účely regulace otáček.

V článku se vychází z klasického přístupu měření otáček a jsou analyzovány negativní dopady takového řešení. Nejhorší poměry nastávají při regulaci otáček soustav s rezonančním převýšením ve své charakteristice. Pak může při určitých hladinách otáček docházet až k nepříjemným kmitům provozních veličin, což je způsobeno rezonancí soustavy s periodicitou údaje ve vyhodnocování otáček. U běžných regulovaných soustav (bez sklonů k rezonancím) je vliv méně závažný, ale projevuje se jako působení poruchové veličiny s proměnnou periodou, přičemž provozu vadí hlavně střední a dlouhé doby periodicity údaje otáček.

Uvedené problémy jsou ale řešitelné. Zásadního zlepšení lze dosáhnout použitím jiného způsobu vyhodnocování otáček než se předpokládá v tomto příspěvku, např. dle doporučení v [1], což ale vyžaduje vyšší přístrojové nároky (nutnost přerušovacího režimu, atd.). Negativní dopady popsaných efektů lze též zmírnit použitím velkého počtu zubů na obvodu hřídeli (v analyzovaném příkladě bylo uvažováno 200 zubů) a použitím kvalifikovaně navržené filtrace údajů otáček.

### Literatura:

- [1] Němec, Z.: Rychlé vyhodnocování nízkých kmitočtů pro účely regulace. Příspěvek konference AEP, Zlín, 1995.
- [2] Němec, Z.: Experimentální výzkum dynamických vlastností Francisovy vodní turbíny s dlouhým přiváděčem – PVE Čierny Váh. Výzkumná zpráva, Orgrez Brno.