

# Vodní nádrž řízená číslicovým PID regulátorem UDC 3000

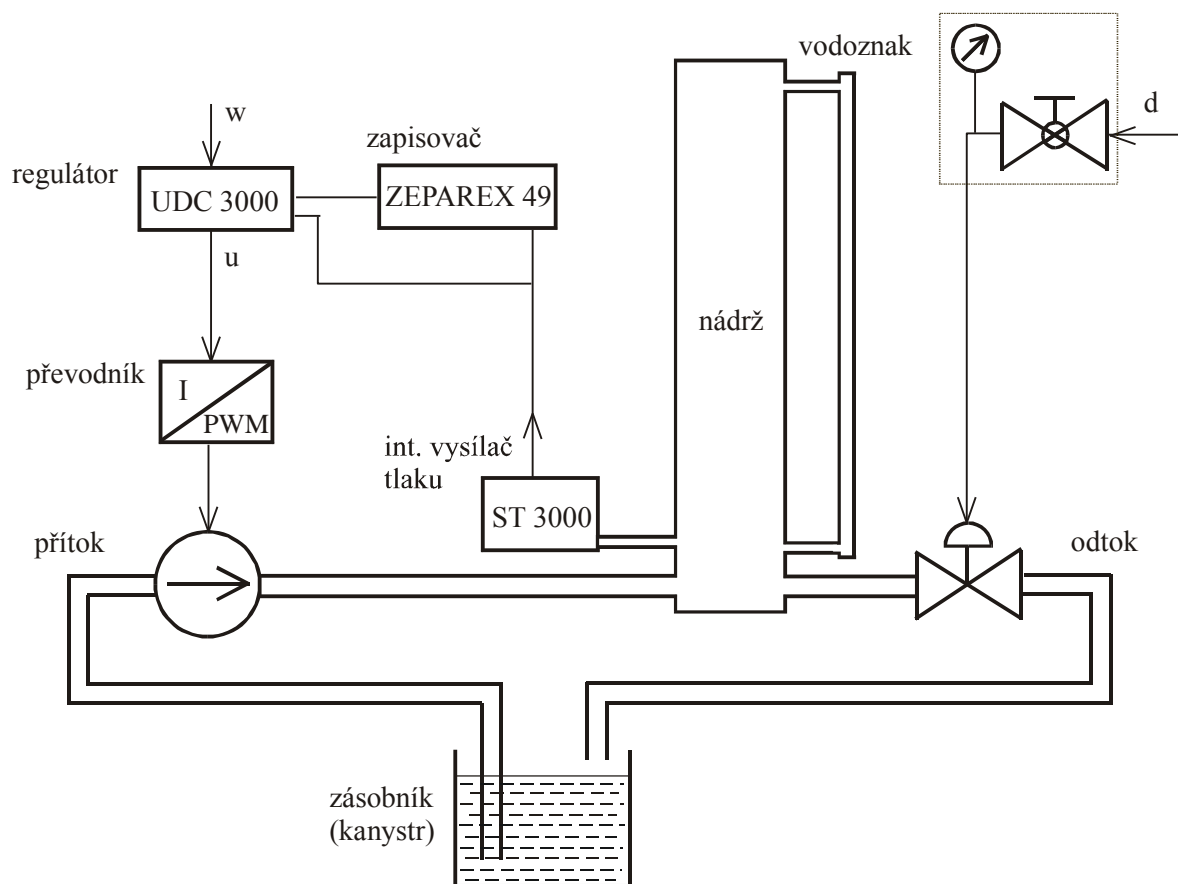
## Zadání:

*Návod je zpracován tak, aby poskytl možnost různých alternativ úlohy (1 až 8).*

1. Nastavení PID regulátoru s využitím metody Ziegler-Nichols
2. Nastavení PI regulátoru využitím metody Åströma a Hagglunda
3. Nastavení PI regulátoru využitím metody kompenzace
4. Použití rampové funkce regulátoru
5. Nastavení průběhu žádané veličiny
6. Možnost dvoupolohové regulace obvodu
7. Použití funkce AUTOTUNE regulátoru
8. Antiwind-Up (tzv. omezení integrace)

## Popis zapojení úlohy:

Regulovanou soustavou je válcová nádrž ( $d = 0,061$  m) plněná vodou, s přepadem ve výšce  $h = 0,93$  m nade dnem. Pro regulaci je použit číslicový PID regulátor Honeywell UDC 3000. Výšku hladiny v nádrži měří inteligentní snímač tlaku ST 3000, snímající



Obr. 1 Schéma úlohy

hydrostatický tlak v dolní části nádrže a komunikující s regulátorem proudovou smyčkou 4 ÷ 20 mA. Regulátor ovládá svým proudovým výstupem přes převodník proud/PWM (pulzněšířková modulace) akční orgán - čerpadlo. Poruchovou veličinou  $d$  ovlivňující chování regulačního obvodu je zdvih výstupního ventilu nádrže. Míru otevření tohoto ventilu a tím odtoku vody z nádrže lze ovládat ručně, viz. obr.1. Je realizována možnost regulace pomocí připojeného PC (pak je nutné přepnout tlačítko na převodníku).

Průběh regulované veličiny (výška hladiny v nádrži)  $y(t)$  a akční veličiny (výstup z UDC 3000)  $u(t)$  je zaznamenáván lineárním zapisovačem (modrá čára -  $y(t)$ , červená -  $u(t)$ ).

**Matematický popis úlohy:** (zpracován pro návrh komponent celého regulačního obvodu)

Pro soustavu platí, že akumulované množství vody v nádrži je dáno rozdílem množství vody přitéklé a odtoké. Tuto relaci lze popsat nelineárním vztahem

$$S \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{IN} - Q_{OUT} \quad (1)$$

omezuje-li odtok  $Q_{OUT}$  ventil:

$$S \cdot \frac{dh}{dt} = Q_{IN} - \frac{1}{36 \cdot 10^3} \cdot K_{V_{max}} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

kde  $\Delta p = \rho \cdot g \cdot h$  (3)  
je hydrostatický tlak

Tento předpis lze v okolí pracovního bodu linearizovat takto

$$\frac{1}{36 \cdot 10^3} \cdot K_{V_{max}} \cdot z \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \xrightarrow{\text{linearizace}} \frac{K_{V_{max}}}{36 \cdot 10^3} \cdot \left( z_0 \cdot \sqrt{g \cdot h_0} + \frac{1}{2} \cdot z_0 \cdot \left( \frac{g \cdot h_0}{z_0} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot g \cdot \Delta h + \sqrt{g \cdot h_0} \cdot \Delta z \right) \quad (4)$$

následně po dosazení a úpravě:

$$\frac{72 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}}{K_{V_{max}} \cdot g \cdot z_0} \cdot S \cdot \Delta h' \left( \right) \Delta h \left( \right) = \frac{72 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{g \cdot h_0}}{K_{V_{max}} \cdot g \cdot z_0} \cdot Q_{IN} - 2 \cdot h_0 - 2 \cdot h_0 \cdot \frac{\Delta z}{z_0} \quad (5)$$

Linearizace zde ovšem vede k značně nepřesnému popisu reálného chování.

Množství vody přitéklé  $Q_{IN}$  je dáno výkonem čerpadla a otevření výstupního ventilu závisí na ovládacím tlaku jeho servopohonu – s přihlédnutím k těmto skutečnostem má výsledná rovnice (nelinearizovaná) tedy tvar

$$S \cdot \frac{dh}{dt} = 15,2 \cdot 10^{-6} \cdot U - 6,17 \cdot 10^{-10} \cdot p - a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6)$$

kde  $S$ ...plocha dna nádrže [ $m^2$ ]

$h$ ...výška hladiny [m]  
 $U$ ...napětí na čerpadle [V]  
 $p$ ... protitlak na čerpadle [Pa]  
 $\alpha$ ...koeficient zahrnující plochu výtokového otvoru i příslušné výtokové součinitele,  $p$  je ovládací tlak výstupního ventilu v kPa

$$\alpha = (3,9 - 0,45 \cdot p) \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

## Regulátor UDC 3000:

### Ovládání:

SET UP – jejím prvním stisknutím uvedete regulátor do režimu editace a dalším postupně vybíráte skupiny voleb

FUNC – v rámci zvolené skupiny klávesou SET UP vybíráte postupně jednotlivé této parametry skupiny

LOWR DISP – pro opuštění režimu editace, za provozu touto klávesou volíte veličinu zobrazovanou na dolním řádku displaye:

OUT – akční (výstupní) veličina v procentech (0 ÷ 100%)

SP – velikost žádané veličiny (výška hladiny v nádrži) [cm]

DEV – regulační odchylka

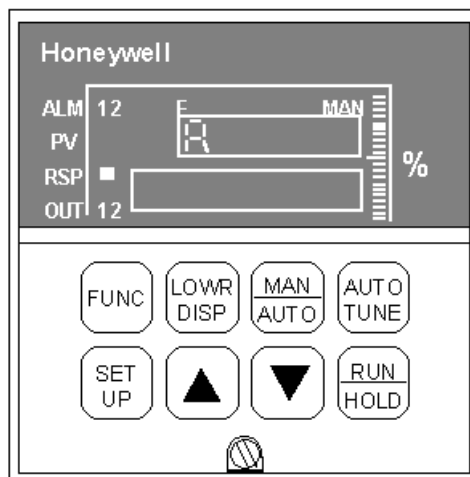
RA – čas v minutách do skončení průběhu rampy (případě volby RAMP)

MAN/AUTO – beznárazové přepínání ruční/automatický režim regulátoru

AUTOTUNE – spouští samonastavovací proceduru, je-li povolena

RUN/HOLD – za provozu spouští rampu nebo jiný program definující žádaný průběh veličiny (opětovným stisknutím lze program pozastavit), v režimu editace parametrů skupin se lze tímto vrátit k původní hodnotě aktuálně nastavovaného parametru byl-li změněn pomocí šipek

ŠIPKY – umožňují změnu hodnot parametrů zvolené skupiny; v provozním režimu při AUTO takto měníte hodnotu žádané veličiny (SP), při MAN hodnotu žádané a akční veličiny. Při stálém držení šipky a chvilkovém stisknutí šipky druhé dosáhnete zrychlení změny hodnoty parametru o řád, pokud toto opakujete docílíte zvýšení rychlosti o dva řády.



Obr. 2 Panel regulátoru UDC 3000

### Nastavování:

Nastavování regulátoru zahájíte stiskem klávesy SET UP. Opakovaným stiskem dojdete až ke skupině ALGORITHM. Použitím tlačítka FUNC zjistíte, zda je nastaven regulátor typu PID. Následně můžete nastavit jeho parametry. Vráťte se na tlačítko SET UP.

#### 1. Nastavení parametrů regulátoru:

Na dolním řádku displaye se objeví nápis TUNING, na horním nápis SET UP. Opět tlačítkem FUNC pak volíte postupně mezi těmito parametry skupiny TUNING (a jejich hodnoty měníte šipkami):

GAIN – proporcionální zesílení P ( $r_0 \dots 0.1 \div 999.9$ )

RATE MIN – derivační složka  $T_d$  (0.08 ÷ 10.00 min). Hodnota 0.08 a nižší znamená vyřazení derivační složky

RSET MIN – integrační konstanta  $T_i$  regulátoru (0.02 ÷ 50.00 min). Nejvyšší hodnota znamená eliminaci vlivu integrační složky (nelze ji však zcela vyřadit).

LOCKOUT – zde prosím nic neměňte

## 2. Nastavení průběhu žádané veličiny:

Klávesou SET UP zvolte skupinu parametrů SP RAMP. Potom pomocí FUNC volíte mezi těmito parametry (a jejich hodnoty/volby opět měníte šipkami):

SP RAMP – volby ENABLE/DISABL – povolení/zakázání rampy (tj. žádaným průběhem regulované veličiny je průběh lineární). Je-li rampa povolena je nutno zadat dobu jejího trvání TIME MIN (0 ÷ 255 min; pro hodnotu 0 je výsledkem skoková změna) a konečnou hodnotu regulované veličiny FINAL SP.

Je-li rampa zakázána, můžete zvolit další parametr, SP PROG ENABLE/DISABLE – pak lze regulátor programovat i na složitější průběhy žádané veličiny.

## 3. Volba řídicího algoritmu regulátoru:

Zvolte pomocí SET UP skupinu parametrů ALGORITHM (horní display zobrazuje SETUP). Zvolte pomocí FUNC parametr CONT ALG a šipkami volte mezi typy regulátorů:

PID A – standardní PID algoritmus

PID B – pouze I složka je buzena regulační odchylkou, ostatní změnami regulované veličiny

PD+MR – pouze PD regulátor, ale není beznárazové přepínání MAN/AUTO

ON-OFF – dvoupolohová regulace

3PSTEP – třípolohový krok; vhodné pro elektromotoricky ovládané ventily  
ostatních parametrů si prosím nevšímejte

## 4. Povolení samonastavovací procedury AUTOTUNE:

Pomocí SET UP zvolte skupinu AUTOTUNE. Klávesou FUNC vyberte parametr AT ENABL, ve kterém šipkami lze zvolit

DISABL - zakázání

A STEP – regulátor si sám generuje skok potřebný pro samonastavení, zvolte toto

M STEP – vyžaduje ruční zadání velikosti skoku v dalším parametru OUT STEP

**Při měření vycházejte z tohoto rovnovážného pracovního bodu:**

**OUT = 47, tlak na výstupním ventilu = 0 ,  $r_0 = 1$ ,  $T_i = 0,87$  min,  $T_d = 0$  min**

### **Důležitá poznámka:**

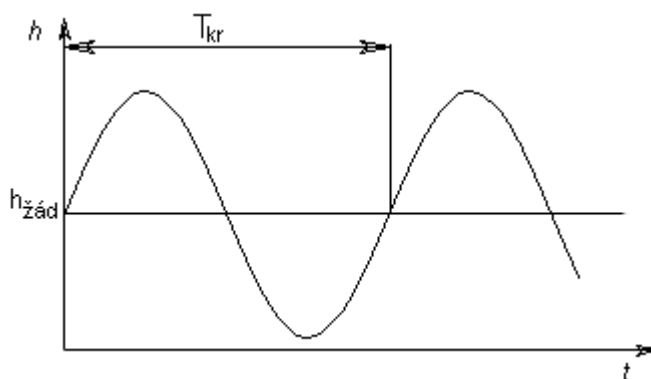
Při spouštění úlohy zasuňte zástrčku prodlužovací šňůry do zdířky ve zdi, totéž proveďte se zástrčkou od zapisovače. Zapněte zdroj STATRON (na úloze vzadu nahoře uprostřed) kolébkovým přepínačem (svítí červená LED). Tím je úloha připravena k použití. Zkontrolujte a případně přestavte nastavení vstupního signálu PWM převodníku (černá krabička z boku). Papír zapisovače se pohybuje rychlostí ... mm/min.

## Úlohy:

### 1. Nastavení parametrů PID regulátoru s využitím metody Zieglera-Nicholse:

Metoda podle Zieglera-Nicholse vychází z určení kritického zesílení  $r_{0kr}$  a kritické periody konstatních netlumených kmitů obvodu  $T_{kr}$ , v němž je zapojen proporcionální regulátor. Patří mezi *odezvové metody seřizování* regulátoru.

- a) Nastavte tlak na výstupním ventilu na hodnotu 0 kPa. V režimu MAN nastavte žádanou hodnotu SP = 42 a hodnoty regulátoru GAIN = 0.1, RATE MIN = 0.07 a RSET MIN = 50. Nastavením hodnoty  $T_i$  na maximum, ji vyřadíte z činnosti a hodnota  $T_d$  je tak malá, že se regulátor chová jako pouze **P** regulátor. Přepněte regulátor do režimu AUTO a zvyšujte hodnotu parametru GAIN dokud nedosáhnete ustálených kmitů soustavy (viz obr.3).



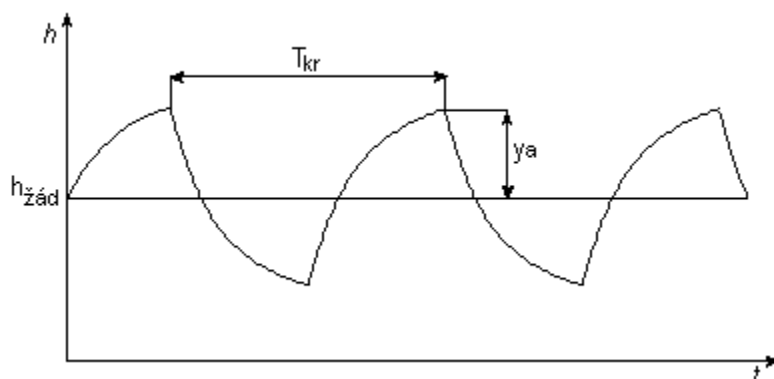
Obr. 3 Netlumené kmity regulované veličiny obvodu s **P** regulátorem

Tato hodnota GAIN je kritické zesílení  $r_{0kr}$ . Ze záznamu průběhu hladiny  $y(t)$  (modrá čára) určete kritickou periodu soustavy  $T_{kr}$  [s] (viz. obr. 3). Na základě takto zjištěných parametrů a pomocí níže uvedené tabulky (Tab.1) vypočítejte optimální parametry ( $r_0, T_i, T_d$ ) nastavení regulátoru (nezapomeňte dosadit do vztahu pro RSET velikost  $T_{kr}$  v minutách):

Tab. 1

typ regulátoru	$r_0$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 r_{0kr}$	-	-
PI	$0,45 r_{0kr}$	$0,85 T_{kr}$	-
PID	$0,6 r_{0kr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,12 T_{kr}$

- b) Vyhodnoťte vliv nastavení Vámi vypočítaných parametrů na kvalitu regulace nastavením několika různých žádaných hodnot, resp. různými hodnotami změn poruchové veličiny (tj. zdvihu ventilu na výtok z nádrže), záznam  $y(t)$  přiložte k referátu.



Obr. 4 Odezva  $h=y(t)$  obvodu při použití dvoupolohového regulátoru

## 2. Nastavení parametrů PID regulátoru s využitím metody Astroma-Haggelunda

Seřízení regulátoru metodou Astroma-Haggelunda spočívá v použití dvoupolohového regulátoru. Důsledkem jeho použití k řízení soustavy je její rozkmitání na konstantní netlumené kmitů v okolí žádané hodnoty  $h_{\text{žad}}$ . Z velikosti amplitudy těchto kmitů  $y_a$  a velikosti amplitudy akčního zásahu  $u_a$  lze pak spočítat kritické zesílení  $r_{0kr}$ . Ze znalosti kritické periody kmitů  $T_{kr}$  (obr.4) je možno konečně určit hodnoty vhodných parametrů PID regulátoru.

- a) Použijte dvoupolohový regulátor (viz.bod 3 - volba algoritmu regulátoru) kolem pracovního bodu. Počkejte na ustálení kmitů (obr.4) a z výsledné křivky odečtěte potřebné parametry. Vypočtete koeficient  $k_u$  ( $u_a$  je amplituda akčního zásahu), který pak použijete pro získání hodnot parametrů **PI** regulátoru dle vztahů (8)

$$k_u = \frac{4u_a}{\pi y_a} \quad r_0 = 0.25k_u \quad T_i = \frac{1.6t_u}{2\pi} \quad (8)$$

- b) Vyhodnořte vliv nastavení Vámi vypočítaných parametrů na kvalitu regulace nastavením několika různých žádaných hodnot výšky hladiny, resp. různými hodnotami změn poruchové veličiny (tj. zdvihu ventilu na výtoku z nádrže), záznam  $y(t)$  přiložte k referátu.

## 3. Nastavení PI regulátoru využitím metody kompenzace:

Pro statické nekmitavé soustavy s dominující jednou či dvěma časovými konstantami lze nastavení regulátorů typu PD, PI a PID provést tzv. kompenzačním nastavením. Toto nastavení využívá alespoň částečné shody čitatele přenosu vyjádřeného pomocí kořenových činitelů s kořenovými činiteli ve jmenovateli rozloženého přenosu obvodu. Tyto pak lze vykrátit. Pro kombinaci PI regulátor + statická soustava 1. řádu (což je případ této úlohy) vypadá přenos obvodu takto

$$G_{wy}(s) = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S} = \frac{\frac{r_i(\tau s + 1)}{s} \frac{1}{(\tau s + 1)}}{1 + \frac{r_i(\tau s + 1)}{s} \frac{1}{(\tau s + 1)}} = \frac{1}{\frac{1}{r_i} s + 1} \quad (9)$$

kde  $r_i = r_0/T_i$  a  $T_i = \tau$  (časová konstanta soustavy).

- a) Proved'te tedy skokovou změnu akční veličiny a z výsledné přechodové charakteristiky na tuto změnu určete časovou konstantu soustavy  $T = \tau_1$ , která je zároveň integrační konstantou pro PI regulátor. Pro nastavení proporcionální konstanty  $r_0$  použijte metodu optimálního modulu, která je metodou založenou na *optimalizaci frekvenčních přenosových vlastností obvodu*.

Pro výpočet  $r_0$  použijte vztah

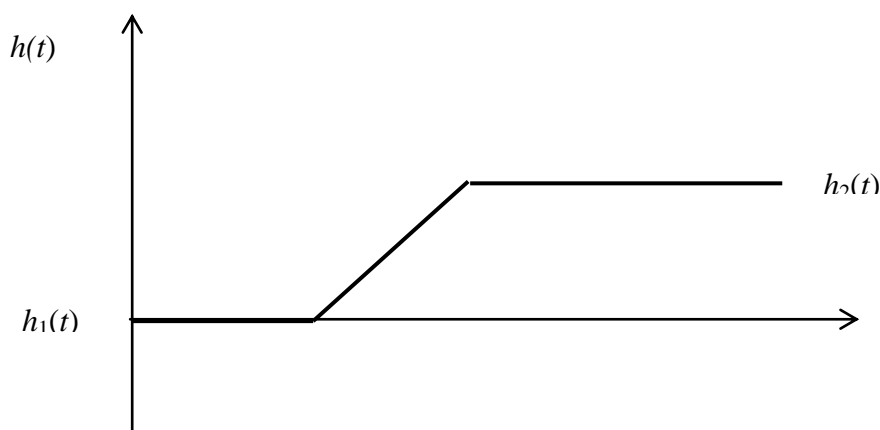
$$r_0 = \frac{\tau_1}{2S\tau_2} \quad (10)$$

kde  $\tau_1$  a  $\tau_2$  jsou zjištěné dominantní časové konstanty soustavy.

- b) Nakonec nastavte regulátor podle těchto konstant (nezapomeňte eliminovat derivační složku nastavením RATE MIN na 0.08) a zhodnoťte kvalitu regulace výšky hladiny změnami nastavení jejích různých žádaných hodnot, resp. změnami poruchové veličiny (tj. tlaku na výstupním ventilu z nádrže). Záznam přiložte k referátu.

#### 4. Použití rampové funkce regulátoru:

Regulátor UDC 3000 umožňuje nastavením rampové funkce (resp. určením dolní hodnoty a horní hodnoty plynulého přechodu žádané veličiny z jedné do druhé) regulovat výšku hladiny viz obr. 5



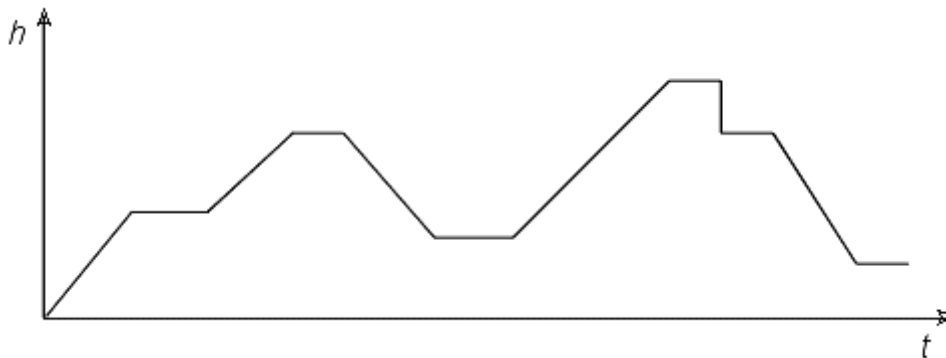
Obr.5 Rampový průběh výšky hladiny v nádrži

- a) Využitím rampové funkce (viz Regulátor UDC 3000 – nastavování) naprogramujte regulátor. Vyjděte z počátečního rovnovážného pracovního bodu a nastavte rampu tak, aby za 3 minuty byla výška hladiny v nádrži na hodnotě z 60 cm na 90 cm.

## 5. Nastavení průběhu žádané veličiny programem

Regulátor umožňuje zadávat průběh žádané veličiny, zde hladiny, na čase, a to ve dvanácti po sobě jdoucích segmentech. Šest segmentů má daný průběh typu „Rampa“, RAMP, dalších šest typu „výdrž na konstantní hodnotě“, SOAK. Segmenty RAMP a SOAK se vzájemně střídají. Pro každý segment typu rampa je nutno zadat délku trvání v hodinách a minutách (alternativně lze zadávat také její změny ve stupních za minutu), pro segment SOAK hodnotu žádané veličiny (a tím i koncovou hodnotu předchozího segmentu rampa) a délku trvání. Lze určit kterým segmentem bude program začínat a končit, a počet opakování programu.

a) Vaším úkolem je naprogramovat průběh dle obr. 6. následujícím postupem:



Obr. 6 Průběh hladiny dle zadaného programu

- i) Klávesou SET UP zvolte skupinu SP RAMP, klávesou FUNC pak volte jednotlivé parametry této skupiny:
- ii) SP RAMP – zvolte (šipkami) DISABL
- iii) SP PROG – zvolte ENABL
- iv) další parametry nastavte podle tabulky 3:
- v) Nyní pro spuštění programu stiskněte RUN/HOLD; na displeji se objeví „R“ indikující, že program je vykonáván. Program můžete přerušit klávesou RUN/HOLD.



Tab. 3 *Parametry nastavení průběhu žádané veličiny*

Parametr	Funkce	Segment	Hodnota
STRT SEG	počáteční segment		1
END SEG	koncový segment		12
RECYCLES	počet opakování		0
SOAK DEV	možná odchylka		0
SEG1RAMP	čas rampy 1	1	0005
SEG2 SP	žád. hodnota s. 2	2	40
SEG2TIME	délka segmentu 2	2	0003
SEG3RAMP	čas rampy 3	3	0004
SEG4 SP	žád. hodnota s. 4	4	70
SEG4TIME	délka segmentu 4	4	0002
SEG5RAMP	čas rampy 5	5	0005
SEG6 SP	žád. hodnota s. 6	6	30
SEG6TIME	délka segmentu 6	6	0002
SEG7RAMP	čas rampy 7	7	0006
SEG8 SP	žád. hodnota s. 8	8	90
SEG8TIME	délka segmentu 8	8	0002
SEG9RAMP	čas rampy 9	9	0
SEG10 SP	žád. hodnota s. 10	10	70
SEG10TIME	délka segmentu 10	10	0002
SEG11RAMP	čas rampy 11	11	0005
SEG12 SP	žád. hodnota s. 12	12	20
SEG12TIME	délka segmentu 12	12	0002
STATE	stav regulátoru po		
	proběhnutí programu		LAST SP
PROG END	stav programu		
	po proběhnutí		HOLD
RAMPUNIT			TIME

## 6. Dvupolohová regulace výšky hladiny v nádrži:

- Zvolte na regulátoru algoritmus dvupolohové regulace (viz výše Regulátor UDC 3000 – nastavování 2). Nastavujte různé velikosti žádané hodnoty SP v intervalu asi 30 - 80 cm a taktéž různé poruchy pomocí přivírání výstupního ventilu nádrže. Sledujte chování regulátoru a hladiny.
- Zaznamenaný průběh je součástí referátu!

## 7. Použití funkce AUTOTUNE regulátoru:

Regulátor je vybaven samonastavovací funkcí, která mu umožňuje automaticky si nastavit vhodné hodnoty svých parametrů. Vyšle na svůj výstup takovou skokovou změnu akční veličiny, aby způsobila asi 4% změnu veličiny regulované. Pak sleduje časový průběh odezvy a po jejím ustálení stanoví na základě tohoto průběhu vhodné nastavení parametrů, aby výsledná přechodová charakteristika obvodu byla bez překmitu. Tato funkce je neadaptivní, regulátor při ní tedy nereguluje a získané konstanty v dalším průběhu již nemění.

- Vyzkoušejte vhodnost takto získaného nastavení pro regulaci: pomocí tlačítka SET UP vyvolejte menu AUTOTUNE. Použijte FUNC k vyvolání nabídky AT ENABL a pak

vyberte šipkami volbu A STEP. Při této volbě je velikost změny akční veličiny (skok) určena automaticky. Nyní v režimu AUTO nastavte žádanou hodnotu na 50 cm, zcela otevřete výstupní ventil (tlak 0 kPa), mějte regulátor rozumně nastavený, např. jako v doporučení pro prac. bod a nakonec stiskněte klávesu AUTOTUNE. Na displayi se objeví písmeno A. Sledujte chování regulátoru resp. hladiny. Opakovaným stiskem můžete přejít na kratší variantu („A“ bliká) – tato dává použitelné  $T_i$  a  $T_d$ ,  $r_0$  je obvykle třeba doladit. Samonastavování lze ukončit tlačítkem MAN/AUTO. Po ukončení samonastavování (A zmizí) porovnejte regulátorem Vámi získané hodnoty.

## 8. Antiwind-Up:

Regulátor UDC 3000 je vybaven funkcí, která reaguje na tzv. *antiwind-up*. Tento termín označuje opatření, která mají zabránit pokračující integraci při generování akční veličiny poté, co akční veličina dosáhla mezní realizovatelné hodnoty (např. krajní mez akčního členu). Tím se pro náš případ myslí, že když výstup regulátoru dosáhne hodnoty 100, pak přestane integrační složka regulátoru dále vnitřně zvyšovat svou velikost, neboť je zřejmé, že její další růst by se neměl projevit navenek, protože akční člen (zde čerpadlo) již nemůže zvyšovat svůj výkon.

Pokud by regulátor nebyl vybaven vlastností antiwind-up, integrační složka by tedy dále vnitřně zvyšovala svou velikost, dokud by se nezměnilo znaménko regulační odchylky. Pak by se sice její velikost zmenšovala (zpětné odečítání), ale akční veličině by to trvalo nějakou dobu, než by se skutečně odpoutala od dorazu. To by způsobilo dopravní zpoždění, zhoršující kvalitu regulace.

### Důležité upozornění:

**Nejprve si podrobně přečtete pokyny a postupujte zásadně podle tohoto návodu. Jiné volby nastavení skupin ani jejich parametrů neprovádějte!! Pokud Vám není návod na ovládání regulátoru není zcela jasný, požádejte o pomoc asistenta.**