Simulační úloha ARI
Dvouválcová vodárna se zubovým čerpadlem

Josef Čech

23. března 2018

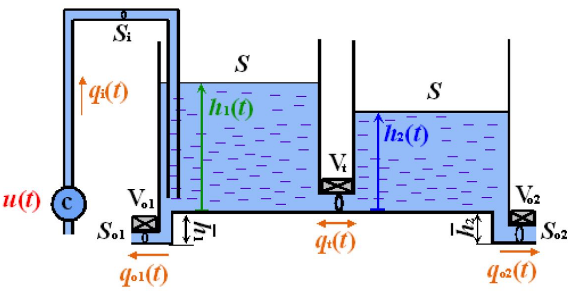
Úkol 1 Stavové rovnice

Na obrázku 1 máme principiální schéma dvouválcové vodárny se zubovým čerpadlem. Je to nelineární stabilní systém se čtyřmi vstupy

- napětí na zubovém čerpadle $u(t)$ [V],
- míra otevření v_{01} [-] ventilu V_{01},
- míra otevření v_t [-] ventilu V_t,
- míra otevření v_{02} [-] ventilu V_{02},

a třemi výstupy

- průtok kapaliny za čerpadlem q_i [$\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1}$],
- výška hladiny v první (levé) nádrži h_1 [m],
- výška hladiny v druhé (pravé) nádrži h_2 [m].



Obrázek 1: Principiální schéma dvouválcové vodárny se zubovým čerpadlem

Za předpokladu zanedbatelné dynamiky zubového čerpadla vůči dynamice celého systému a za předpokladu, že se hladina v nádrži pohybuje mnohem pomaleji, než je výtoková rychlost, lze tento systém popsat následujícími rovnicemi

$$S\dot{h}_1(t) = k_c u(t) - v_t S_t \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_2(t))\sqrt{2g|h_1(t) - h_2(t)|} \\ - v_{01} S_{01}\sqrt{2g(h_1(t) + \bar{h}_1(t))} \tag{1}$$

$$S\dot{h}_2(t) = v_t S_t \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_2(t))\sqrt{2g|h_1(t) - h_2(t)|} \\ - v_{02} S_{02}\sqrt{2g(h_2(t) + \bar{h}_2(t))}, \tag{2}$$

kde S, S_{01}, S_{02} a S_t [m^2] je po řadě průřez obou válců ventilu V_{01}, V_{02} a V_t. Konstanta g [$\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$] je gravitační zrychlení, k_c [$\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{V}^{-1}$] je konstanta čerpadla. Dvojice $\bar{h}_1$ a $\bar{h}_2$ [m] jsou výšky dna jednotlivých tanků oproti čerpadlu.

Pro nalezení stavových rovnic zavedeme nejprve pomocné značení vnitřních proměnných $x_1 = h_1$, $x_2 = h_2$ i vstupů $u_1 = u$, $u_2 = v_{01}$, $u_3 = v_t$, $u_4 = v_{02}$.

Upravíme stavové rovnice

$$\dot{x}_1(t) = \frac{k_c}{S}u_1(t) - \frac{S_t}{S}u_3 \operatorname{sgn}(x_1(t) - x_2(t))\sqrt{2g|x_1(t) - x_2(t)|} \\ - \frac{S_{01}}{S}u_2\sqrt{2gx_1(t)} \tag{3}$$

$$\dot{x}_2(t) = \frac{S_t}{S}u_3 \operatorname{sgn}(x_1(t) - x_2(t))\sqrt{2g|x_1(t) - x_2(t)|} \\ - \frac{S_{02}}{S}u_4\sqrt{2gx_2(t)}, \tag{4}$$

kde jsme využili závěru z Úkol 3.4 o zanedbání výšky dna $\bar{h}_1$, $\bar{h}_2$ oproti výpustím.

Dále se pokusíme sdružit konstanty u jednotlivých členů do jedné

$$\dot{x}_1(t) = \alpha u_1(t) - \beta u_3 \operatorname{sgn}(x_1(t) - x_2(t))\sqrt{|x_1(t) - x_2(t)|} \\ - \gamma u_2\sqrt{x_1(t)} \tag{5}$$

$$\dot{x}_2(t) = \beta u_3 \operatorname{sgn}(x_1(t) - x_2(t))\sqrt{|x_1(t) - x_2(t)|} - \delta u_4\sqrt{x_2(t)}, \tag{6}$$

kde $\alpha = \frac{k_c}{S}$, $\beta = \sqrt{2g}\frac{S_t}{S}$, $\gamma = \sqrt{2g}\frac{S_{01}}{S}$ a $\delta = \sqrt{2g}\frac{S_{02}}{S}$.

Nyní přidáme dvojici rovnic pro popis výstupů

$$y_1(t) = h_1(t) \tag{7}$$
$$y_2(t) = h_2(t), \tag{8}$$

které jsou přímo rovny výškám v jednotlivých nádržích.

Rovnicemi (5), (6) a (7), (8) jsme vyjádřili kompletní nelineární stavový popis systému.

Úkol 2 Lineární aproximace

Pro nalezení lineární aproximace modelu zavedeme pomocné značení nelineárních rovnic

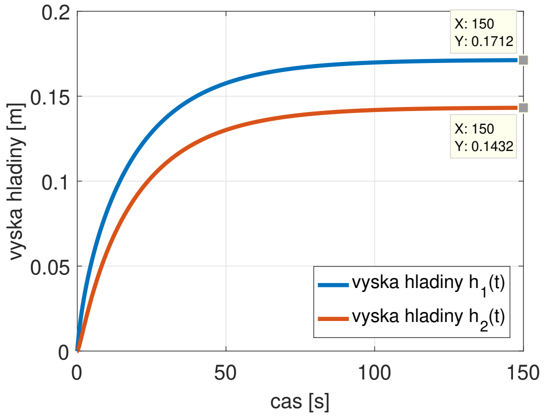
$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{x}^T(t)) \tag{9}$$
$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{g}(\boldsymbol{u}(t), \boldsymbol{x}^T(t)), \tag{10}$$

kde $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix}$ a $\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u_1, & u_2, & u_3, & u_4 \end{bmatrix}$.

Dále zvolím pracovní bod

$$\boldsymbol{P_0} = \begin{bmatrix} u_{1p}, & u_{2p}, & u_{3p}, & u_{4p}, & x_{1p}, & x_{2p} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} 4, & 0.1, & 0.4, & 0.1, & 0.1712, & 0.1432 \end{bmatrix}, \tag{11}$$

kde hodnoty x_{1p}, x_{2p} po řadě odpovídají ustáleným hodnotám prvního a druhého tanku na uvedené vstupy. Průběh napouštění a ustálení vidíme v grafu 2.



Obrázek 2: Určení složek x_{1p}, x_{2p} pracovního bodu $\boldsymbol{P_0}$

Nyní nalezneme matice řízení $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ a $\boldsymbol{D}$ pro pracovní bod $\boldsymbol{P_0}$. Pro větší přehlednost nejprve předpočítáme příslušné parciální derivace pro matici $\boldsymbol{A}$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left.\left[-\frac{\beta u_3}{2\sqrt{x_1-x_2}} - \frac{\gamma u_2}{2\sqrt{x_1}}\right]\right|_{\boldsymbol{P_0}} = -1.19\beta - 0.12\gamma \tag{12}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left.\left[\frac{\beta u_3}{2\sqrt{x_1-x_2}}\right]\right|_{\boldsymbol{P_0}} = 1.19\beta \tag{13}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left.\left[\frac{\beta u_3}{2\sqrt{x_1-x_2}}\right]\right|_{\boldsymbol{P_0}} = 1.19\beta \tag{14}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left.\left[-\frac{\beta u_3}{2\sqrt{x_1-x_2}} - \frac{\delta u_4}{2\sqrt{x_2}}\right]\right|_{\boldsymbol{P_0}} = -1.19\beta - 0.13\delta, \tag{15}$$

ze kterých snadno sestavíme

$$\boldsymbol{A} = \left.\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \begin{bmatrix} -1.19\beta - 0.12\gamma & 1.19\beta \\ 1.19\beta & -1.19\beta - 0.13\delta \end{bmatrix}. \tag{16}$$

Dále si předpočítáme netriviální prvky pro matici $\boldsymbol{B}$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial u_1}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \alpha \tag{17}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial u_2}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left[-\gamma\sqrt{x_1}\right]\big|_{\boldsymbol{P_0}} = -0.41\gamma \tag{18}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial u_3}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left[-\beta\sqrt{x_1-x_2}\right]\big|_{\boldsymbol{P_0}} = -0.17\beta \tag{19}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial u_3}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left[\beta\sqrt{x_1-x_2}\right]\big|_{\boldsymbol{P_0}} = 0.17\beta \tag{20}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial u_4}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \left[-\delta\sqrt{x_2}\right]\big|_{\boldsymbol{P_0}} = -0.38\delta, \tag{21}$$

jež použijeme v

$$\boldsymbol{B} = \left.\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \frac{\partial f_1}{\partial u_3} & \frac{\partial f_1}{\partial u_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u_1} & \frac{\partial f_2}{\partial u_2} & \frac{\partial f_2}{\partial u_3} & \frac{\partial f_2}{\partial u_4} \end{bmatrix}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \\ = \begin{bmatrix} \alpha & -0.41\gamma & -0.17\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0.17\beta & -0.38\delta \end{bmatrix}. \tag{22}$$

Zbylé dvě matice již lze snadno napsat rovnou

$$\boldsymbol{C} = \left.\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \frac{\partial g_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial g_2}{\partial x_1} & \frac{\partial g_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{23}$$

$$\boldsymbol{D} = \left.\begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \frac{\partial g_1}{\partial u_2} & \frac{\partial g_1}{\partial u_3} & \frac{\partial g_1}{\partial u_4} \\ \frac{\partial g_2}{\partial u_1} & \frac{\partial g_2}{\partial u_2} & \frac{\partial g_2}{\partial u_3} & \frac{\partial g_2}{\partial u_4} \end{bmatrix}\right|_{\boldsymbol{P_0}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

Uvažujeme-li přírůstky

$$\Delta\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x_p} \tag{25}$$

$$\Delta\boldsymbol{u^T}(t) = \boldsymbol{u^T}(t) - \boldsymbol{u_p^T} \tag{26}$$

$$\Delta\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{y}(t) - \boldsymbol{y_p}, \tag{27}$$

kde $\boldsymbol{x_p} = \boldsymbol{y_p} = \begin{bmatrix} x_{1p} \\ x_{2p} \end{bmatrix}$ a $\boldsymbol{u_p} = \begin{bmatrix} u_{1p}, & u_{2p}, & u_{3p}, & u_{4p} \end{bmatrix}$, pak pomocí matic řízení můžeme vyjádřit linearizovaný přírůstkový model

$$\Delta\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\Delta\boldsymbol{u}(t) \tag{28}$$

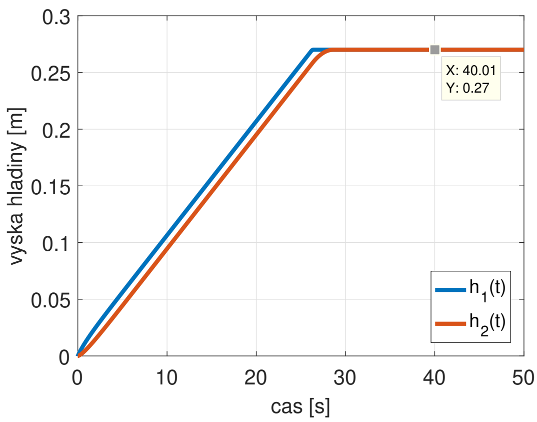
$$\Delta\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\Delta\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{D}\Delta\boldsymbol{u}(t). \tag{29}$$

Úkol 3 Statické nelinearity

V tomto úkolu se navrátíme k výchozímu značení vstupů $u(t)$, v_{01}, v_{02}, v_t i výstupů $h_1(t)$, $h_2(t)$. Všechny pokusy v tomto úkolu budeme volit pro nulové počáteční podmínky.

Úkol 3.1 Saturace stavů

Pro zjištění maximální možné výšky hladiny v obou tancích zvolíme experiment, ve kterém $u(t) = 4$ V, $v_t = 0.4$ a $v_{01} = v_{02} = 0$.



Obrázek 3: Experiment pro zjištění maximální hladiny tanků

Z grafu 3 odečteme hodnotu saturace hladiny shodnou pro oba tanky $h_{1_{sat}} = h_{2_{sat}} = 27$ cm.

Úkol 3.2 Saturace vstupů

Mezní hodnoty ventilů v_t, v_{01} a v_{02} nastávají pro úplné zavření, nebo úplné otevření. Tedy v_t, v_{01} a $v_{02} \in [0, 1]$.

Pro zjištění saturace vstupu $u(t)$ volíme sérii experimentů s konfigurací ventilů $v_t = v_{01} = v_{02} = 0$ a počátečním vstupním napětí $u = 0.05$ V. V každém kroku napětí u zdvojnásobíme a budeme pozorovat čas dosažení saturace prvního tanku $h_{1_{sat}}$.

Vzhledem k velkému rozsahu nastavovaného vstupního napětí u uvedeme místo grafu naměřené hodnoty v tabulce 1.

Nastavené napětí $u(t)$ [V]	Doba ustálení na $h_{1_{sat}}$ [s]
0.05	800
0.1	400
0.2	200
0.4	100
0.8	50
1.6	25
3.2	12.6
6.4	6.4
12.8	3.2
25.6	1.64
51.2	0.8

Tabulka 1: Doba naplnění prvního tanku v závislosti na velikosti napětí čerpadla $u(t)$

Pozorujeme, že po zdvojnásobení napětí došlo k ustálení vždy za poloviční čas. Vstup $u(t)$, napětí na čerpadle, tedy není shora omezen.

Ovšem doba ustálení 800 ms pro hodnoty napětí 51.2 V zcela jistě neodpovídá skutečnosti. Navíc jsme tímto porušili předpoklad modelu z Úkol 1, že se hladina v nádrži pohybuje mnohem pomaleji, než je výtoková rychlost.

Konečně spodní mez je úplné vypnutí čerpadla, tedy $u = 0$.

Úkol 3.3 Necitlivost vstupu

Po nahlednutí do tabulky (1) vidíme, že i pro malá napětí u je čerpadlo aktivní, dojde k napouštění prvního tanku a po určité době k dosažení $h_{1_{sat}}$. Systém tedy nemá pásmo necitlivosti vstupu $u(t)$.

Skutečný systém se bude lišit a bude obsahovat mezní napětí, které již nebude pro chod čerpadla dostatečné.

U míry otevření ventilů v_t, v_{01}, v_{02} není třeba pásmo necitlivosti uvažovat.

Úkol 3.4 Offset výšky dna tanku oproti výpusti

Pro stanovení výšky dna tanku oproti výpusti provedeme následující experiment. V prvním kroku volíme napětí $u_1 = 0.5$ V, ventil $v_{01} = 0.2$ a zbylé dva zavřeme, tj. $v_t = v_{02} = 0$. Spustíme simulaci, vyčkáme ustálení a odečteme hodnotu h_1. V druhém kroku zvýšíme napětí na dvojnásobek $u_2 = 1$ V a pokus zopakujeme.

Pokud by výška dna tanku oproti výpusti byla nulová, platilo by po ustálení mimo saturaci

$$h_1 \propto u^2. \tag{30}$$

Tedy například pro dvojnásobný přítok se hladina ustálí ve čtyřnásobné výšce.

Připustíme-li přítomnost offsetu, je nutné ho v závislosti uvážit

$$h_1 + \overline{h_1} \propto u^2. \tag{31}$$

Prováděný experiment podepřeme dvojicí rovnic

$$H_{1,u_1}(t) = h_{1,u_1}(t) + \overline{h_1}, \tag{32}$$

$$H_{1,u_2}(t) = h_{1,u_2}(t) + \overline{h_1}, \tag{33}$$

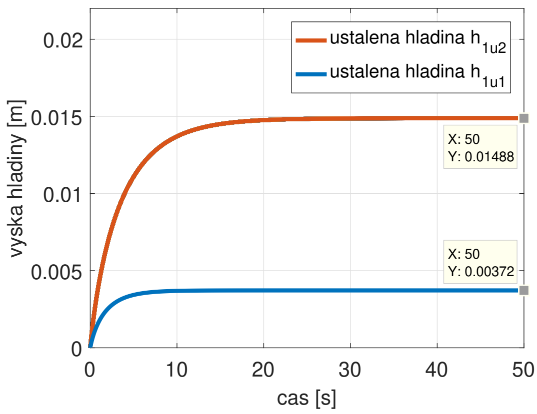
kde $h_{1,u_1}(t)$ a $h_{1,u_2}(t)$ jsou po řadě měřené hladiny ode dna prvního tanku pro napětí čerpadla u_1 a u_2. Dále víme, že pro zvolený poměr napětí pro ustálené hodnoty celkových výšek vodních sloupců platí

$$H_{1,u_2} = 4H_{1,u_1}, \tag{34}$$

což nám umožní řešit soustavu dvou rovnic o dvou neznámých a vyjádřit offset

$$\overline{h_1} = \frac{h_{1u_2} - 4h_{1u_1}}{3}. \tag{35}$$

Z grafu 4 odečteme hladinu ustálení pro první hodnotu napětí na čerpadle $u_1 = 0.5$ V $h_{1u_1} = 3.72 \cdot 10^{-3}$ m. Ustálení hladiny pro napětí $u_2 = 1$ V je $h_{1u_2} = 0.01488$ m.

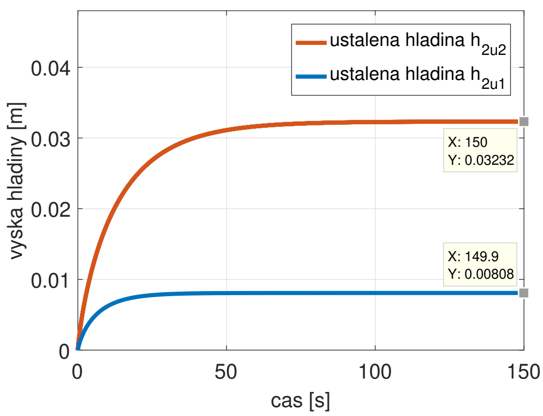


Obrázek 4: Identifikace offsetu prvního tanku

Po dosazení do rovnice (35) dostáváme

$$\overline{h_1} = 0 \text{ m}. \tag{36}$$

Nyní provedeme analogický pokus pro druhý tank, kde ventil $v_{02} = 0.1$ a zbylé dva zavřeme, tj. $v_t = v_{01} = 0$.



Obrázek 5: Identifikace offsetu druhého tanku

Z grafu 5 určíme hodnoty ustálení hladiny druhého tanku $h_{2u_1} = 8.08 \cdot 10^{-3}$ m, $h_{2u_2} = 0.03232$ m a dosadíme

$$\overline{h_2} = \frac{h_{2u_2} - 4h_{2u_1}}{3} = 0 \text{ m}. \tag{37}$$

Vidíme, že obě výšky dna tanku oproti výpusti $\overline{h}_1$ i $\overline{h}_2$ jsou nulové, nebo neměřitelně malé, pročež je můžeme ve výpočtech zanedbat.

ÚKOL 4 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ

V tomto úkolu se rovněž vrátíme k výchozímu značení vstupů $u(t)$, v_{01}, v_{02}, v_t i výstupů $h_1(t)$, $h_2(t)$.
Pokusy pro identifikaci parametrů budou vždy probíhat za nulových počátečních podmínek.

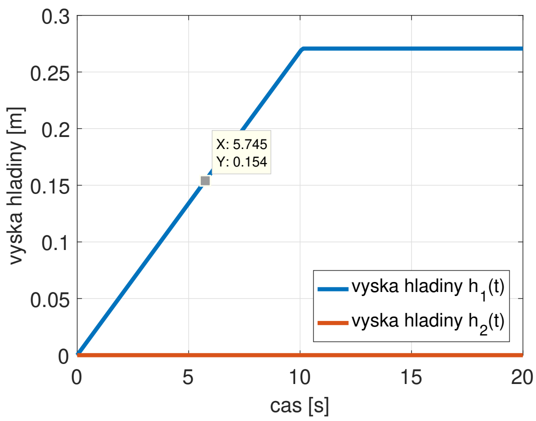
Úkol 4.1 Stanovení parametru α

Nejprve stanovíme hodnotu parametru α. Uzavřením ventilů v_t a v_{01} redukujeme rovnici (5) na

$$\dot{h}_1(t) = \alpha u(t), \tag{38}$$

ze které vyjádříme α, spustíme simulaci a se známým vstupem $u = 4$ V odečteme z grafu 6 rychlost plnění prvního tanku

$$\alpha = \frac{\dot{h}_1(t)}{u(t)} = \frac{\frac{0.154}{5.745}}{4} \doteq 0.006701. \tag{39}$$



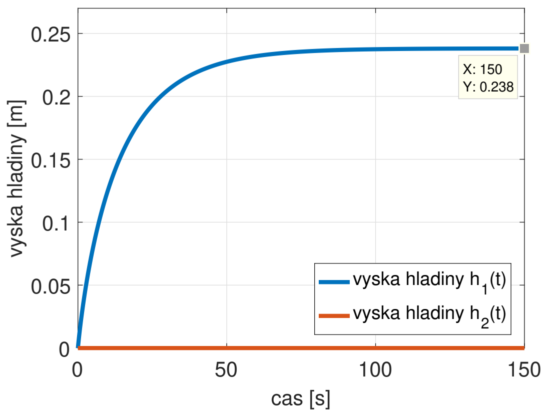
Obrázek 6: Experiment k identifikaci parametru α

Úkol 4.2 Stanovení parametru γ

Při hledání koeficientu γ můžeme použít výsledek pro α z Úkol 4.1 a ponechat pootevřený ventil $v_{01} = 0.2$. Volbou $v_t = 0$ získáme z rovnice (5) zkrácenou rovnici

$$\dot{h}_1(t) = \alpha u(t) - \gamma v_{01}\sqrt{h_1(t)}. \tag{40}$$

Po vyjádření γ z rovnice (40) spustíme simulaci s napětím na čerpadle $u = 4$ V a necháme ustálit hladinu prvního tanku, čímž anulujeme levou stranu rovnice.
V grafu 7 pozorujeme hodnotu ustálení $h_1 = 0.238$ m.



Obrázek 7: Experiment k identifikaci parametru γ

Máme tedy

$$\gamma = \frac{\alpha u(t)}{v_{01}\sqrt{h_1(t)}} = \frac{0.006701 \cdot 4}{0.2 \cdot \sqrt{0.238}} \doteq 0.2747. \tag{41}$$

Úkol 4.3 Stanovení parametru β

Pro stanovení součinitele β s výhodou využijeme výše identifikovaných α a γ a nastavíme při napětí $u = 4$ V ventilům hodnoty $v_{01} = v_{02} = 0.1$ a $v_t = 0.4$. Pro tuto volbu vstupů je nutně $h_1(t) \geq h_2(t)$, proto můžeme provést zjednodušení

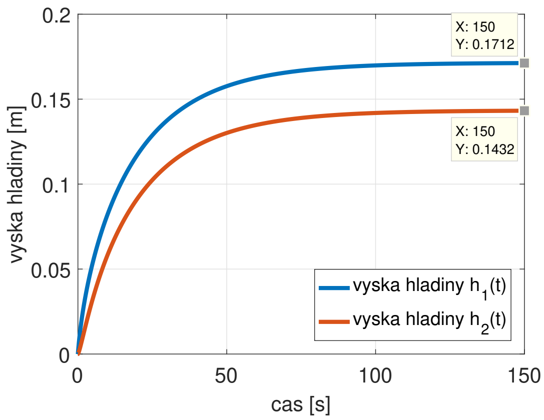
$$\operatorname{sgn}(h_1(t) - h_2(t)) = 1 \tag{42}$$

$$|h_1(t) - h_2(t)| = h_1(t) - h_2(t), \tag{43}$$

což nám dovolí upravit rovnici (5) na

$$\dot{h}_1(t) = \alpha u(t) - \beta v_t\sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - \gamma v_{01}\sqrt{h_1(t)}. \tag{44}$$

Derivaci na levé straně položíme rovnu nule, protože opět vyčkáme ustáleného stavu na vstup $u = 4$ V, který nalezneme v grafu 8.



Obrázek 8: Experiment k identifikaci parametru β

Vyjádříme hledaný koeficient β a dosadíme

$$\beta = \frac{\alpha u(t) - \gamma v_{01}\sqrt{h_1(t)}}{v_t\sqrt{h_1(t) - h_2(t)}} \doteq 0.07678. \tag{45}$$

Úkol 4.4 Stanovení parametru δ

Ze stejného experimentu, ovšem z rovnice (6), kterou upravíme uvážením ustálené hodnoty a dle zjednodušení v rovnicích (42) a (43) na

$$0 = \beta v_t \sqrt{h_1(t) - h_2(t)} - \delta v_{02} \sqrt{h_2(t)}, \tag{46}$$

vyjádříme koeficient δ a dosadíme ustálené hodnoty z grafu 8

$$\delta = \frac{\beta v_t \sqrt{h_1(t) - h_2(t)}}{v_{02}\sqrt{h_2(t)}} \doteq 0.1359. \tag{47}$$

Úkol 4.5 Doplnění pro Úkol 2

Právě dopočítané parametry dosadíme do rovnic (16), (22), (23) a (24) matic řízení $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ a $\boldsymbol{D}$ pro pracovní bod $\boldsymbol{P_0}$ a získáme tak finální tvar

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} -0.31 & 0.27 \\ 0.27 & -0.33 \end{bmatrix}, \tag{48}$$

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} 0.0067 & -0.11 & -0.039 & 0 \\ 0 & 0 & 0.039 & -0.15 \end{bmatrix}, \tag{49}$$

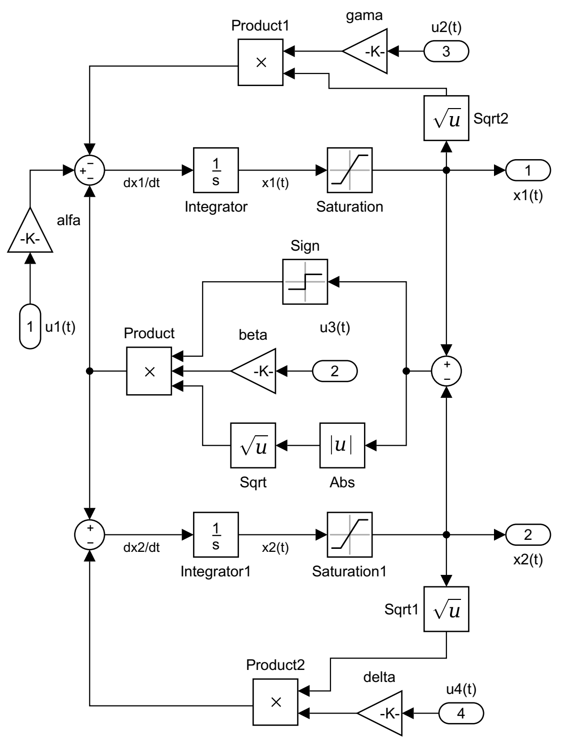
$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{50}$$

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{51}$$

Úkol 5 Schémata v Simulinku

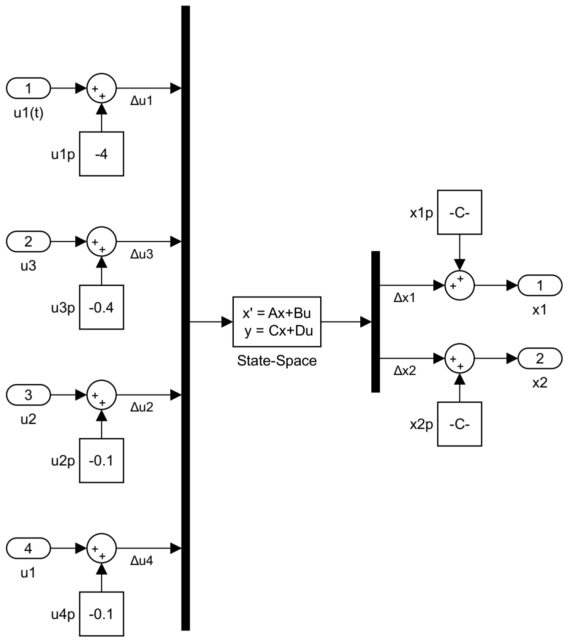
V SIMULINKu vytvoříme modely nelineárního a linearizovaného systému.

Nelineární model na obrázku 9 je sestaven přesně podle rovnic (5), (6), (7) a (8).



Obrázek 9: Schéma nelineárního modelu

Linearizovaný model na obrázku 10 vychází z přírůstkových rovnic (28) a (29) pro změny. Blok *State-Space* je naplněn maticemi řízení (48), (49), (50) a (51).

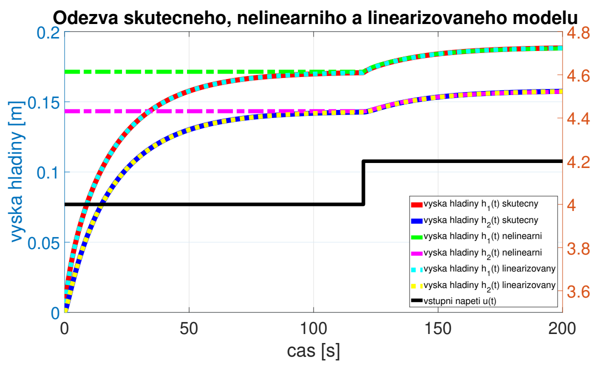


Obrázek 10: Schéma linearizovaného modelu

Úkol 6 Porovnání odezvy a zhodnocení úkolu

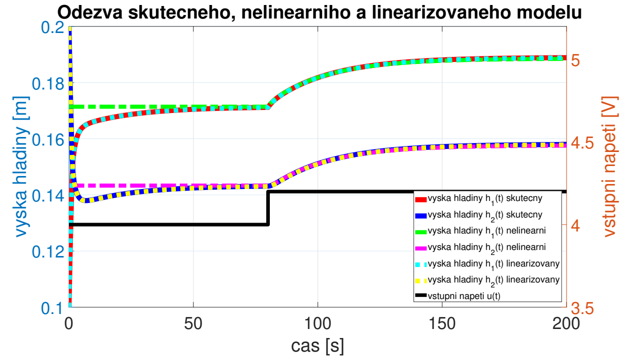
Na závěr porovnáme odezvy obou modelů z Úkol 5 a skutečného systému. Na druhé ose v grafech vyjádříme vstupní napětí $u(t)$.

Nejprve necháme z nulových počátečních podmínek systém naběhnout do pracovního bodu $\boldsymbol{P_0}$ a v čase 120 s vybudíme 5% skok, jak je vidět v grafu 11.



Obrázek 11: Odezva systemů na vstupní napětí $u(t)$ s nulovými počatečními podmínkami

V druhém případě nastavíme v simulaci počáteční podmínky $h_1(0) = 0.1$ a $h_2(0) = 0.2$, opět necháme systém ustálit v pracovním bodě $\boldsymbol{P_0}$ a v čase 80 s vybudíme 5% skok, jak ukazuje graf 12.



Obrázek 12: Odezva systemů na vstupní napětí $u(t)$ s nenulovými počátečními podmínkami

Druhý průběh je zároveň demonstrací funkčnosti modelu pro případ, že je $h_2 > h_1$.

Náhledem na dvojici grafů se přesvědčíme o přesnosti rekonstrukce nelineárního modelu a od dosažení pracovního bodu i o kvalitě navrženého linearizovaného modelu. Vzhledem k téměř dokonalým překryvům můžeme konstatovat, že se nám skutečný systém podařilo věrně namodelovat.