

**Modelovanie hydraulického systému
troch spojených nádob v prostredí
Simscape Fluids**

(Tutoriál)



**Ľudovít Hiřovský
2018/2019**

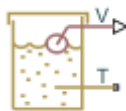
Hydraulický systém troch spojených nádob

Systém troch nádob je typickým a často využívaným príkladom modelovania hydraulických systémov vo výučbe. V tomto tutoriáli sa oboznámime s špecializovaným prostredím Simscape Fluids, jeho funkčnými blokmi a ich konkrétnou implementáciou v tomto prostredí. Výhodou tohto prostredia je funkčná integrita týchto blokov, čo znamená, že systém sa dá prispôsobiť bez hlbšieho odvádzania matematického modelu, s parametrami priamo od výrobcov hydraulických komponentov.

V tutoriáli sa budú nachádzať nádoby v 2 typoch spojenia, od ktorých budú závisieť vzájomné korelácie a to **vertikálne spojenie nádob** – v takomto spojení nebudú nádoby medzi sebou interagovať a **horizontálne spojenie nádob** – v tomto spojení budú existovať medzi nádobami vzájomné interakcie.

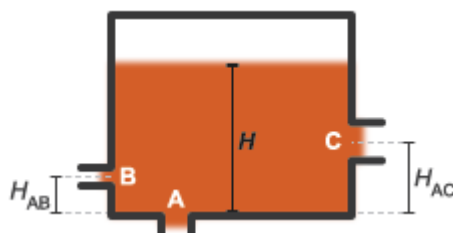
Simulačný model bude pozostávať z viacerých funkčných blokov reprezentujúcich hydraulické komponenty tohto systému, ktoré si v tejto kapitole opíšeme.

Základným prvkom tohto modelu bude funkčný blok Tank, ktorý je znázornený na Obr. 2 a ktorý si bližšie špecifikujeme



Obr. 1 Funkčný blok Tank

Nachádza sa v knižnici *Simscape / Fluids / Hydraulics (Isothermal) / Low-Pressure Blocks*. Tento blok nám predstavuje nádrž s kvapalinou, ktorá sa v nej nachádza pod určitým tlakom. Pri nastavovaní portov si môžeme vybrať jeden až tri vstupno-výstupné porty, ktoré nám znázorňujú prítoky a odtoky z daných nádrží. Nádoba je natlakovaná konštantným tlakom. Pre lepšie znázornenie portov modelu nádoby si ich zobrazíme na Obr. 2, pričom uvažujeme nádobu s troma vstupno-výstupnými portami.



Obr. 2 Znáznornenie funkčného bloku Tank aj s jeho príslušnými portami

V tomto bloku sa berú do úvahy jednotlivé vzdialenosti odtokových otvorov od dna nádoby, alebo jeden od druhého. Vzhľadom na túto vzdialenosť a meniacu sa výšku hladiny sa v nádobách mení hydrostatický tlak. Pri tomto bloku uvažujeme so koeficientom straty tlaku, ktorý je potrebné zaviesť vzhľadom na tlakové straty pri portoch bloku.

Pri tomto funkčnom bloku uvažujeme so spomínanými tromi vstupno-výstupnými portami a jedným výstupným. Výstupný port V predstavuje fyzický signál s informáciou o objeme kvapaliny nachádzajúcej sa v nádrži. Zvyšné porty A, B, C súvisia s transportom tekutiny medzi odtokovými otvormi nádrže. Port V je výstup z tohto bloku vo forme fyzického signálu reprezentujúceho objem kvapaliny v nádrži.

Druhý základný hydraulický prvok *Hydraulic Constant Pressure Source* je znázornený na Obr. 3 aj s jeho popisom.



Obr. 3 Funkčný blok Hydraulic Constant Flow Rate Source

Blok hydraulického konštantného prietoku predstavuje ideálny zdroj hydraulickej energie, ktorý je dostatočne silný na to, aby udržiaval stanovený prietok na svojom výstupe bez ohľadu na tlakový rozdiel medzi zdrojom. Kladný smer bloku je z portu T do portu P.

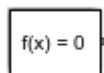
Port T je vstupno/výstupný port súvisiaci s atmosférickým tlakom a kvapalinou. Väčšinou je k tomuto portu pripojená hydraulická referencia, alebo nádrž, rezervoár. Jeden typ pripojenia, hydraulickú referenciu, si znázorníme na Obr. 4 a popíšeme.



Obr. 4 Funkčný blok Hydraulic Reference

Tento funkčný blok sa nachádza v knižnici *Hydraulic Elements* a predstavuje spojenie s atmosférickým tlakom. Hydraulické porty všetkých blokov, ktoré sa vzťahujú na atmosféru (napr. sacie otvory hydraulických čerpadiel, alebo spätné porty ventilov, valcov, potrubí, ak sa považujú za priamo spojené s atmosférou) musia byť pripojené k hydraulickému referenčnému bloku.

Ďalším blokom, ktorý je potrebný zapojiť do schémy pre jej správne fungovanie, je blok *Solver Configuration*. Tento blok je z knižnice *Utilities* a znázorníme si ho na Obr. 5.



Obr. 5 Funkčný blok Solver Configuration

Určuje parametre potrebné k správneho priebehu simulácie. Tento blok musí byť súčasťou každej blokovej schémy v špecializovaných prostrediach Simscape. Hlavnou úlohou tohto bloku je definovať vzorkovanie simulácie a spôsob výpočtov dynamických zmien v systéme. Tento blok sme do schémy zapojili bez zmeny jeho parametrov – všetky parametre sú nastavené na pôvodnej hodnote.




Pre upresnenie vlastností kvapaliny, ktorá prúdi cez systém je potrebné do schémy systému zapojiť funkčný blok *Hydraulic Fluid* z knižnice *Hydraulic Utilities*, ktorý si znázorníme na Obr. 6 .



Obr. 6 Funkčný blok Hydraulic Fluid

Výsledné hodnoty výšok hladín budeme zo simulačnej schémy získavať pomocou zakomponovania základných funkčných blokov prostredia Simulink. Táto kombinácia je veľmi vhodná vzhľadom na lepšie možnosti práce s grafom v prostredí MATLAB. Tieto bloky si zhrnieme s ich názornou ukážkou a popisom v Tab. 1.

Tab. 1 Popis základných funkčných blokov v prostredí Simulink

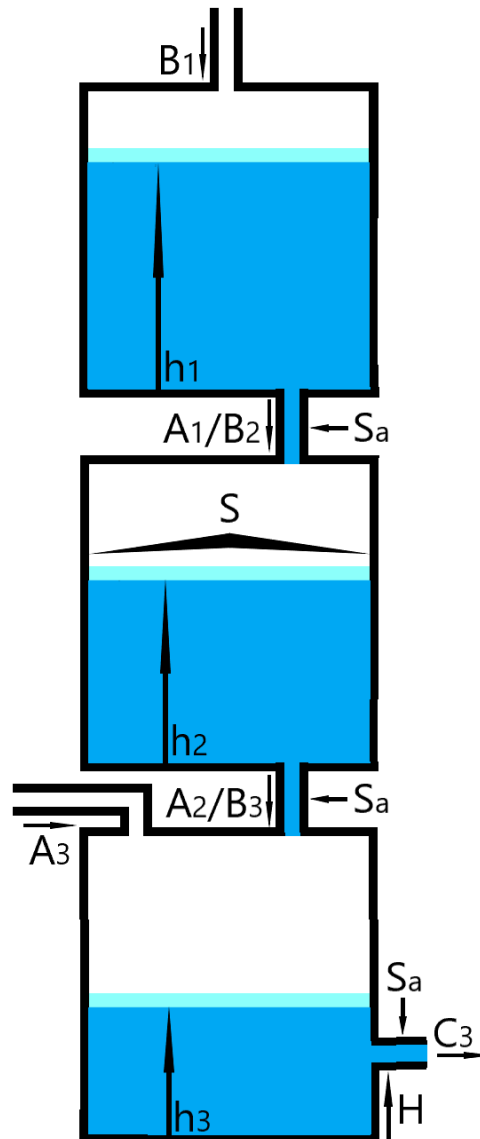
Funkčný blok	Popis jeho funkcionality
	<p>Blok Scope a zobrazuje vstupné signály v čase.</p>
	<p>Blok Gain násobí vstup konštantnou hodnotou, pričom vstup a daná hodnota môže byť skalár, vektor alebo matica. Gain sa prevedie z premennej typu double na dátový typ zadaný v maske bloku. Vstup a gain sa potom vynásobia a výsledok sa prevedie na výstupný typ údajov.</p>
	<p>Blok PS-Simulink Converter prevádza fyzický signál na výstupný signál Simulink.</p>

S využitím týchto blokov sa budú modelovať systémy troch spojených nádob a sledovať jeho dynamiku prostredníctvom zmeny výšok hladín systémov.

System troch nádob bez interakcie – modelovanie v prostredí Simscape Fluids

V hydraulickom systéme troch nádob bez interakcie sú tieto nádoby prepojené vertikálne pomocou spájajúceho výtokového otvoru, cez ktorý prúdi kvapalina z nádoby do nádoby vplyvom gravitácie.

System si znázorníme na Obr. 7, pričom bude na tomto obrázku sa bude nachádzať znázornenie totožné so zapojením komponentov nádrží v Simscape Fluids.



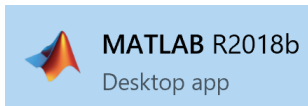
Obr. 7 Hydraulický systém troch nádob bez interakcie

Tento hydraulický systém je zložený z troch spojených nádob valcového tvaru s plochou podstavy S . Spojenie medzi nádobami je realizované pomocou výtokového otvoru kruhového prierezu s plochou S_a . Pri tomto modeli sú vstupy do systému tvorené pomocou ideálneho zdroja prítoku cez port A_1 a A_3 a vzájomnými výtokmi z nádoby do nádoby A_1/B_2 , A_2/B_3 , pričom kvapalina prúdi len jedným smerom. Výsledný odtok z tohto systému je cez port C_3 , ktorý je vo vzdialenosti H od

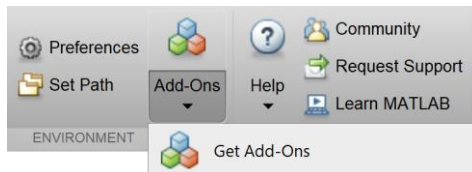
dna poslednej nádoby. Veličiny, ktoré z tohto systému môžeme sledovať je objem kvapaliny v nádržiach, ktorý súvisí so zmenami výšok jednotlivých hladín h_1, h_2, h_3 .

Princíp modelovania v tomto prostredí je položený na skladaní funkčných prvkov s integrovanou funkcionalitou hydraulických komponentov s cieľom čo najlepšej aproximácie reálneho systému. Tento postup si zhrnieme v základných bodoch, pričom budeme pracovať vo v programovom prostredí Matlab&Simulink 2018b.

- Otvoríme si aplikáciu Matlab R2018b



- Na hornej lište v časti Enviroment klikneme na možnosť Add-Ons -> Get Add-Ons



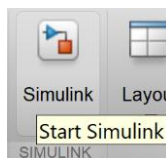
- Otvorí sa okno s názvom Add-On Explorer, v ktorom do vyhľadávača v pravom hornom rohu zadáme názov rozšírenia, ktoré chceme pridať – Simscape Fluids



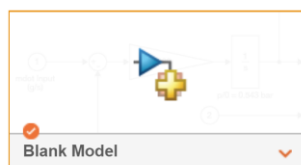
- Nainštalujeme toto rozšírenie



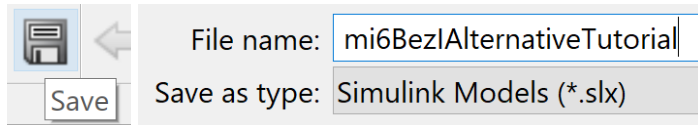
- Po nainštalovaní rozšírenia si otvoríme simulačné prostredie Simulink



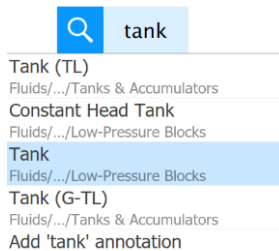
- Po otvorení okna Simulink Start Page vyberieme možnosť Blank Model



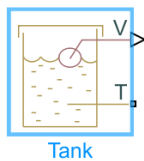
- Model si po vytvorení ihneď uložíme, aby sme ho počas vývoja modelu nestratili, ukladáme ho vo formáte .slx



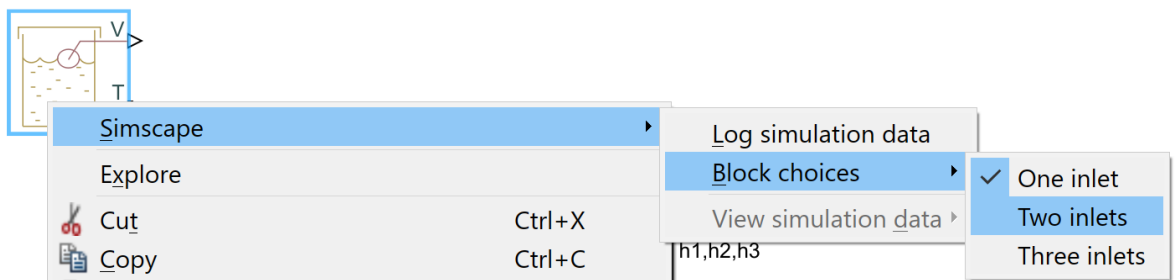
- Začneme modelovať prvú nádrž vloženíu bloku Tank. Tento blok vložíme do schémy kliknutím na ľubovoľnú časť okna v Simulinku (využijeme jeho interaktivitu), pričom po kliknutí začneme písať názov bloku



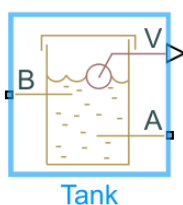
- Zobrazia sa nám viaceré možnosti výberu blokov, pričom vyberáme blok z knižnice Low-Pressure Blocks – táto informácia sa zobrazí pod názvom bloku



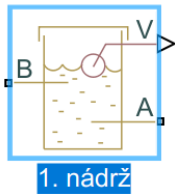
- Blok Tank je základným funkčným blokom schémy, ktorý nám reprezentuje nádrž s jej vlastnosťami. Prvá nádrž nášho systému bude mať podľa Obr. 7 jeden vstup a jeden výstup. Počet Vstupno/výstupných portov upravíme pravým kliknutím na tento funkčný blok a vyberieme možnosť Simscape -> Block choices -> Two inlets



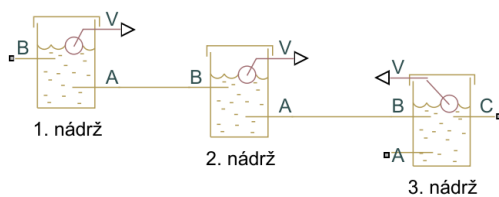
- Po Vybrání nasledujúcej možnosti bude nádrž vyzeráť takto



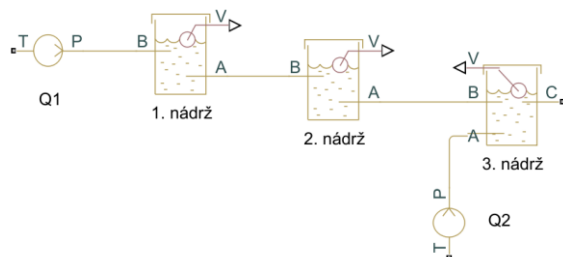
- Vznikol nám systém 1. nádrž, ktorý reprezentuje funkčný blok Tank, ktorého názov je vhodné zmeniť. Názov bloku zmeníme tak, že na daný blok klikneme ľavým tlačidlom myši a pod ním sa zobrazí jeho pôvodný názov, ktorý jednoducho označíme a prepíšeme



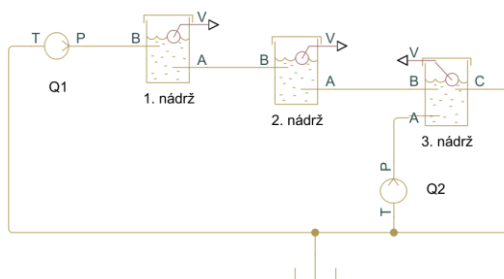
- Rovnako postupujeme pri všetkých nádobách, pričom sa dopracujeme k nasledujúcej schéme



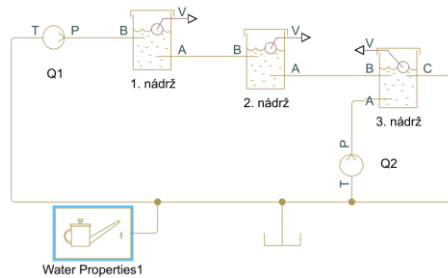
- Konštantné prítoky do týchto nádrží sú implementované pomocou blokov ideálnych zdrojov prietoku. Vytvárame ich rovnako ako bloky nádrží. Nazveme ich Q_1 a Q_2



- Pre správne fungovanie schémy je do nej potrebné zapojiť viaceré vedľajšie funkčné bloky. Vytvárame ich rovnakým spôsobom ako funkčné bloky nádrží. Prvým blokom bude hydraulická referencia, ktorú je potrebné zapojiť do každej schémy simulačného modelu hydraulického systému. K tomuto bloku zapojíme aj výsledný odtok zo systému Vzniká hydraulický obvod



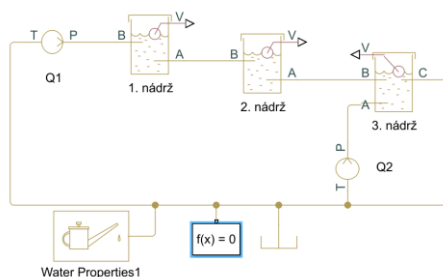
- Následne je potrebné zapojiť funkčný blok, ktorého funkcionality pridáva do hydraulického obvodu vlastnosti v ňom tečúcej kvapaline, v našom prípade vody



- Jeho dimenzovanie prebieha v maske tohto bloku, ku ktorej sa dostaneme dvojitým kliknutím ľavého tlačidla na tento blok. Kvapalina v našom systéme je voda pri izbovej teplote

Parameters	
Hydraulic fluid:	Water
Relative amount of trapped air:	1e-3
System temperature (C):	20
Viscosity derating factor:	1
Pressure below absolute zero:	Error
Fluid Properties:	
Density (kg/m ³):	997.8
Viscosity (cSt):	1.00565
Bulk modulus (Pa) at atm. pressure and no gas:	2.17804e+09

- Posledným funkčným blokom je blok konfigurácie riešiča, v ktorom nastavujeme spôsob priebehu simulácie a jej vzorkovanie, nechávame pôvodné hodnoty

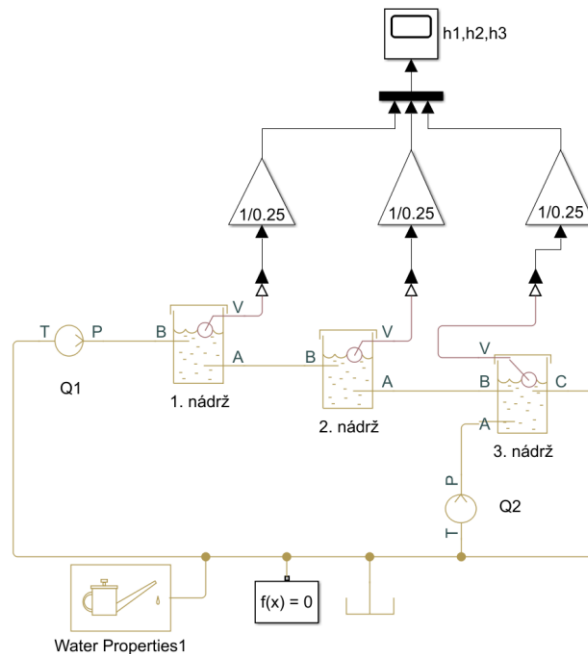


- Parametrizáciu všetkých hlavných funkčných zhrnieme v Tab. 2, v ktorej sa nachádza popis parametrov, ich implicitné nastavenie, príslušný funkčný blok súvisiaci s daným parametrom

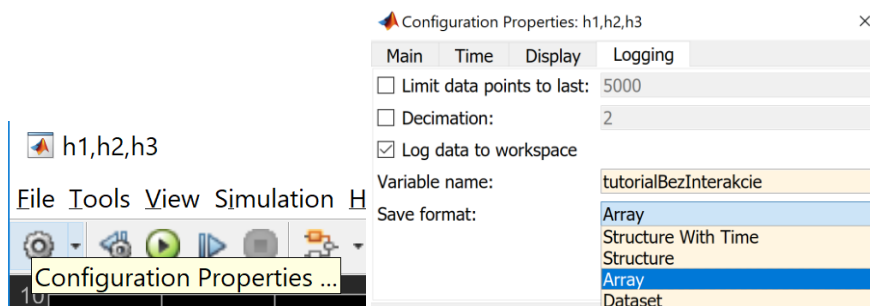
Tab. 2 Parametrizácia hydraulického systému troch nádob bez interakcie v prostredí Simscape Fluids

Parameter	Popis	Implicitné nastavenie		
		1. nádrž	2. nádrž	3. nádrž
Funkčný blok Tank				
Parameters Tab				
Pressurization	Tlak v nádrži	0[Pa]		
Tank volume parameterization	Voľba parametrizácie pre objem nádrže	Constant cross-sectional area		
Tank cross-section area	Plocha prierezu nádrže	0.25[m ²]		
Port A/B/C pipeline diameter	Plocha prierezu výtokového/prítokového otvoru A/B/C	65 × 10 ⁻⁵ [m ²]		
Port A/B/C pressure loss coefficient	Empirický koeficient používaný na výpočet tlakových strát na porte A / B / C	$\begin{pmatrix} 3 \times 10^{-9} \\ 1 \times 10^{-8} \\ - \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.85 \times 10^{-9} \\ 1 \times 10^{-8} \\ - \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 \times 10^{-8} \\ 1 \times 10^{-8} \\ 1.3 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$
		[bezr. veličina]		
Port B/C height above port A	Vzdialenosť portu B / C od portu A(dna nádoby)	$\begin{pmatrix} 2[m] \\ - \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2[m] \\ - \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2[m] \\ 0.2[m] \end{pmatrix}$
Acceleration due to gravity	Konštanta gravitačného zrýchlenia	9.80665[m/s ²]		
Check if fluid level violating minimum valid condition	Varovanie pri neplatných výškach nádrže	none		
Variables Tab				
Fluid level	Počiatočná výška hladiny	1.2[m]	0.7[m]	1[m]
Funkčný blok Hydraulic Constant Flow Rate Source		Q₁		Q₂
Flow rate	Konštantný prietok	8 × 10 ⁻³ [m ³ /s]		5 × 10 ⁻³ [m ³ /s]

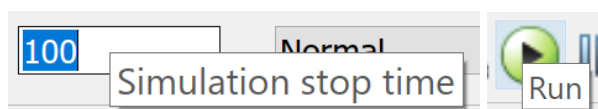
- Po parametrizácii hlavných funkčných blokov je potrebné pripojiť k hydraulickému obvodu Bloky Scope. Signál vedúci do týchto blokov prekonvertujeme pomocou PS-Simulink konvertora. Výstup z funkčných blokov nádrží je vo forme fyzického signálu reprezentujúceho objem v nádržiach, ktorý pred vstupom do bloku Scope predelíme obsahom prierezu nádrží, pričom dostaneme na výstupe výšku hladiny v nádržiach



- Toto je výsledná schéma systému troch nádrží bez interakcie v prostredí Simscape Fluids. Pre lepšie pracovanie z grafmi si prevedieme funkcie vygenerované blokom Scope, teda zmeny výšok hladín v čase, do programovacieho prostredia Matlab vo forme viacrozmerného poľa. Otvoríme ľavým dvojklikom blok Scope, klikneme na Configuration Properties -> Logging -> Log data to workspace -> Variable name(názov premennej v programovom prostredí Matlab) -> Save format -> Array(data budú vo formáte viacrozmerné pole)



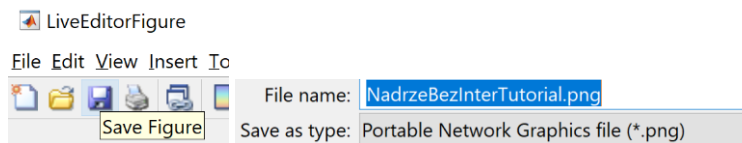
- Následne nastavíme čas zastavenia simulácie a proces odsimulujeme

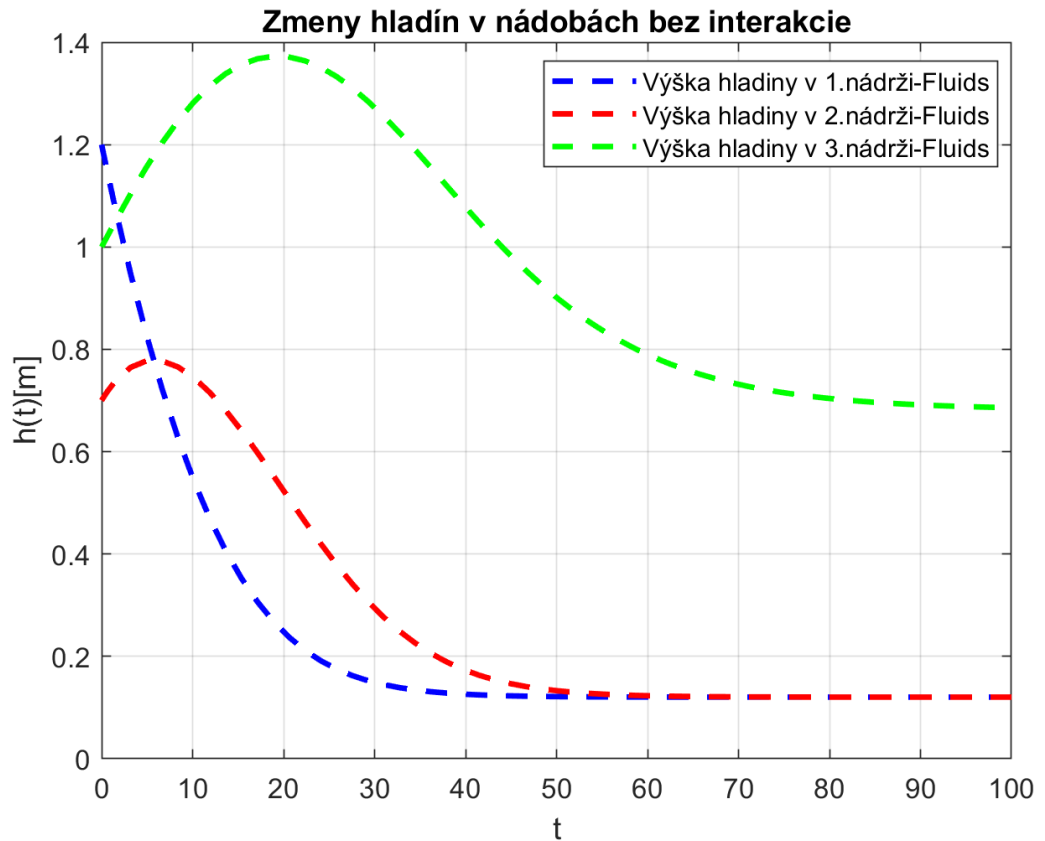


- Výsledok simulácií si zobrazíme v grafe vytvorenom v prostredí Matlab, pri ktorom využijeme výsledky simulácii, ktoré sme si preniesli z funkčného bloku Scope do tohto prostredia vo forme viacrozmerného poľa. Zdrojový kód vytvárania grafu vyzerá napríklad takto

```
%zmena výšky hladiny v prvej nádrži
plot(tutorialBezInterakcie(:,1),
tutorialBezInterakcie(:,2),'Blue','LineWidth',1);
%príkaz pre zakresľovanie nasledujúcich priebehov do rovnakého grafu
hold on
%zmena výšky hladiny v druhej nádrži
plot(tutorialBezInterakcie(:,1),
tutorialBezInterakcie(:,3),'Red','LineWidth',1);
%zmena výšky hladiny v tretej nádrži
plot(tutorialBezInterakcie(:,1),
tutorialBezInterakcie(:,4),'Green','LineWidth',1);
%príkaz pre koniec zakresľovania priebehov do jedného grafu
hold off;
%vytvorenie mriežok pre lepšie zorientovanie sa v grafe
grid;
%názov grafu
title('Zmeny hladín v nádobách bez interakcie')
%popis osí
xlabel('t'); ylabel('h(t)[m]');
%legenda grafu
legend({'Výška hladiny v 1.nádrži-Simulink','Výška hladiny v 2.nádrži-
Simulink','Výška hladiny v 3.nádrži-Simulink'},'Location','best')
```

- Samotný graf výslednej odozvy systému si ako obrázok ukladáme stlačením možnosti Save Figure označenej obrázkom modrej diskety v hornej lište grafu, pričom súbor ukladáme pod formátom .png. Je znázornený na Obr. 8



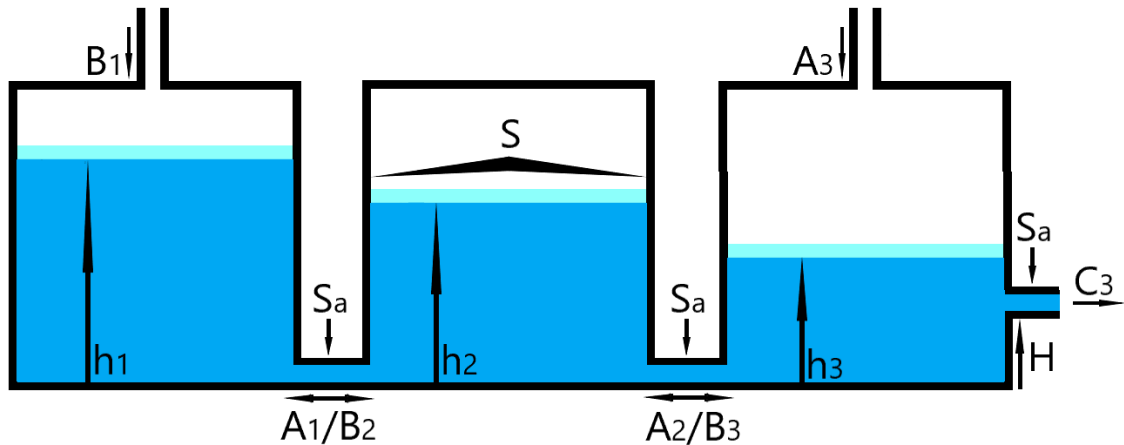


Obr. 8 Výsledná simulácia systému troch nádob bez interakcie

Z grafu je možné vidieť, že sa hladina prvej a druhej nádoby ustáli na hodnote 0.12 m a to v čase približne 60 s, zatiaľ čo hladina v tretej nádobe sa ustáli približne na hodnote 0.68 m v čase 100 s.

System troch nádob s interakciou – modelovanie v prostredí Simscape Fluids

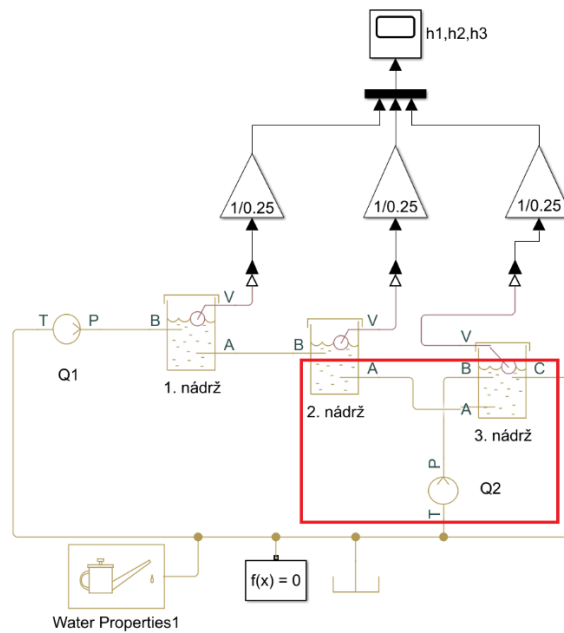
Hydraulický systém troch nádob v interakcii sa odlišuje od predošlého systému spôsobom prepojenia. V systéme nádob s interakciou sú tieto nádoby v horizontálnom spojení, pričom smer vzájomného prietoku kvapaliny závisí od výšky hladín a teda od objemu v nádobách. Rozloženie hydraulického systému troch nádob si znázorníme na Obr. 9.



Obr. 9 Hydraulický systém troch nádob s interakciou

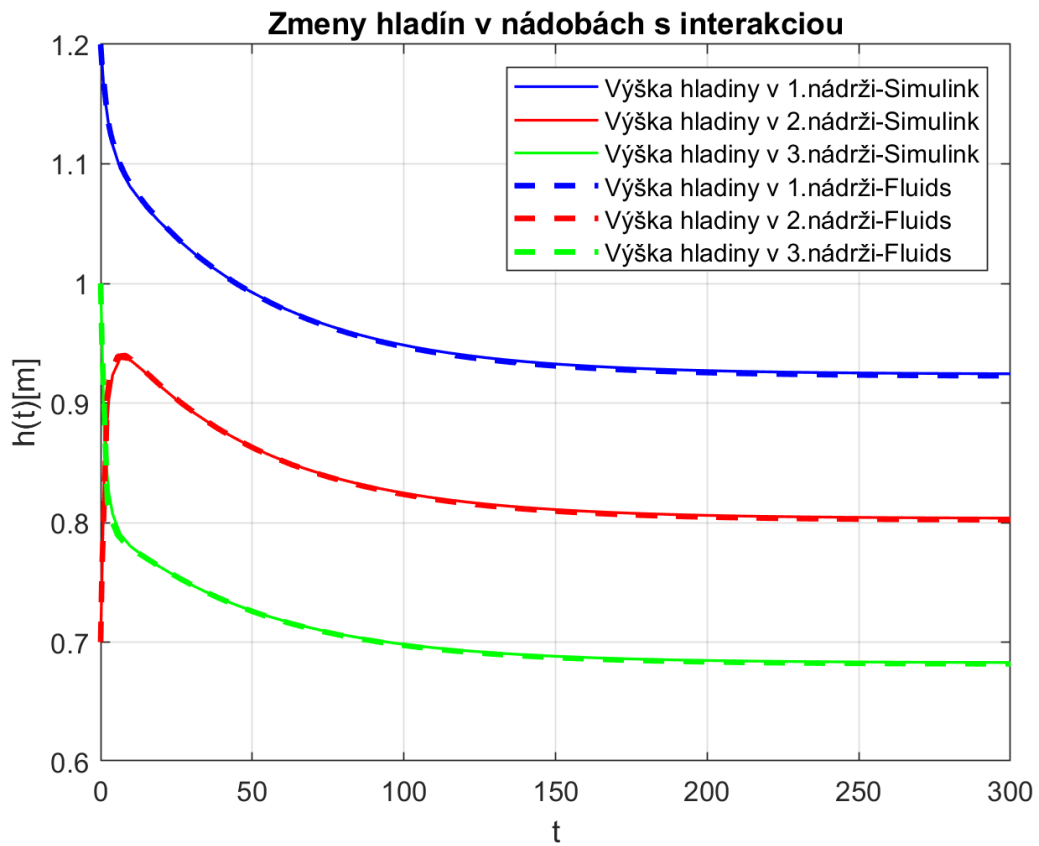
Tri nádoby sú rovnakého valcového tvaru, s rovnakými rozmermi, rozdiel bude medzi vzájomnými interakciami nádob. Smer prietoku (smer jeho rýchlosti) z nádoby do nádoby závisí od toho, v ktorej nádobe je väčší objem kvapaliny. Keď predpokladáme, že je v prvej nádobe vyššia hladina vody ako v druhej, prúdi kvapalina z prvej nádoby do druhej, pokiaľ výška hladiny v druhej nádobe nestúpne na vyššiu úroveň, ako v tej prvej. Keď táto situácia nastane, prietok kvapaliny nadobudne opačný smer. Keď budú v interagujúcich nádobách rovnaké výšky hladín hovoríme, že výšky nadobudnú ustálený stav (pri nezmenenom prítoku do systému).

V prostredí Fluids to bude znamenať zmenu prepájania funkčných blokov s portami nádoby. Prietokové otvory, ktorými sú nádoby vzájomne spojené už nebudú v určitej výške, ale ich poloha bude na dne nádoby. Funkcionalita tohto prostredia podľa tohto usporiadania automaticky vytvorí princíp interakcie. Modelovanie tohto systému bude skoro totožné. Jedinými parametrom, ktorý zmeníme bude vzdialenosť portu B / C od portu A (dna nádoby) s hodnotou $\begin{pmatrix} 2[m] \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0[m] \\ - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2[m] \\ 0.2[m] \end{pmatrix}$. Všetky ostatné parametre budú totožné a sú zhrnuté v Tab. 2. Rozdielnosť vo výslednom prepojení bude spočívať v zmene portov pri vstupe do tretej nádrže. Túto rozdielnosť si farebne zvýrazníme na výslednej schéme (Obr. 10).



Obr. 10 Rozdielnosť v schéme troch spojených nádrží

Výsledný graf simulácie sme získali opäť rovnako ako pri predošlom systéme a je znázornený na Obr. 11. Čas simulácie sme zvolili 300[s].



Obr. 11 Výsledná simulácia systému troch nádob bez interakcie

Na grafe môžeme vidieť zmeny výšok hladín v systéme troch hydraulických nádob v prepojení, ktoré medzi sebou interagujú. Výška hladiny v prvej nádobe sa ustáli na hodnote $0.92m$, pričom nato bude potrebovať čas $200s$. Hladina v druhej nádrži bude na ustálenie potrebovať rovnaký čas, pričom sa ustáli na hodnote $0.8m$ a tretia hladina sa ustáli na hodnote $0.68m$ v takom istom čase.