



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INFORMAČNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INFORMATION SYSTEMS

**HARDVÉROVÁ REALIZÁCIA NUMERICKÉHO
INTEGRÁTORA S METÓDOU VYŠŠIEHO RÁDU**

HARDWARE REALIZATION OF HIGHER ORDER NUMERICAL INTEGRATOR

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT

TERM PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FRANTIŠEK MATEČNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. VÁCLAV ŠÁTEK, Ph.D.

BRNO 2018

Abstrakt

Práca popisuje numerickú integráciu a riešenie diferenciálnych rovníc pomocou metódy Taylorovej rady v rôznych typoch integrátorov. Ďalej je popísaná aritmetika pevnej a pohyblivej rádovej čiarky. Následne sú predstavené návrhy a spôsob výpočtu paralelných integrátorov s operáciou násobenia a delania v prevedení pevnej a pohyblivej rádovej čiarky.

Abstract

This work deals with numerical integration and solution of differential equations by the Taylor series in many types of integrators. Next is described floating point and fixed point arithmetic. Subsequently are presented designs and method of calculation of parallel multiplication and division integrators in floating point and fixed point arithmetic. TODO - opraviť!!

Kľúčové slová

diferenciálna rovnica, numerická integrácia, Taylorova rada, pevná rádová čiarka, pohyblivá rádová čiarka, integrátor

Keywords

differential equation, numeric integration, Taylor series, fixed point, floating point, integrator

Citácia

MATEČNÝ, František. *Hardvérová realizácia numerického integrátora s metódou vyššieho rádu*. Brno, 2018. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Václav Šátek, Ph.D.

Hardvérová realizácia numerického integrátora s metódou vyššieho rádu

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Václava Šátka, Ph.D. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....

František Matečný

2. mája 2018

Podakovanie

Chcel by som sa poďakovať svojmu školiteľovi Ing. Václavovi Šátkovi, Ph.D., za odborné vedenie práce, podporu, vecné pripomienky, komentáre a rady k mojej práci. Moje poďakovanie taktiež patrí mojej rodine, priateľke Katke, kamarátom a všetkým ostatným, ktorí ma podporovali počas celej doby môjho štúdia a bez ktorých by táto práca nemohla vzniknúť.

Obsah

1	Úvod	2
2	Numerická integrácia	3
2.1	Taylorova rada	3
2.2	Eulerova metóda	4
2.3	Runge-Kutta	4
2.3.1	Runge-Kutta 2. rádu	4
2.3.2	Runge-Kutta 4. rádu	5
3	Riešenie diferenciálnych rovníc Taylorovou radou	6
3.1	Riešenie diferenciálnej rovnice s operáciou násobenia	7
3.2	Riešenie diferenciálnej rovnice s operáciou delenia	8
4	Reprezentácia operandov	10
4.1	Pevná rádová čiarka	10
4.2	Pohyblivá rádová čiarka	11
4.2.1	Súčet a rozdiel	13
4.2.2	Násobenie a delenie	14
5	Numerické integrátory	15
5.1	Násobiaci integrátor v pevnej rádovej čiarke	16
5.2	Deliaci integrátor v pevnej rádovej čiarke	16
5.3	Jendovstupý integrátor v pohyblivej rádovej čiarke	18
5.4	Násobiaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke	18
5.5	Deliaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke	20
5.6	Sústava diferenciálnych rovníc	21
6	Implementácia integrátorov vo VHDL	23
7	Analýza	24
7.1	Porovnanie Taylorovej rady s metódou Runge-Kutta 2. rádu	24
7.2	Porovnanie Taylorovej rady s metódou Runge-Kutta 4. rádu	24
8	Záver	25
	Literatúra	26

Kapitola 1

Úvod

Hlavným cieľom tejto práce je návrh hardvérových komponentov na riešenie rozsiahlych diferenciálnych rovníc. Diferenciálne rovnice sa väčšinou riešia pomocou numerickej integrácie, a teda s použitím vhodných numerických metód. Hardvérový komponent využívajúci numerickú integráciu sa nazýva numerický integrátor.

V kapitole 2 sú predstavené rôzne numerické metódy - Eulerova metóda, metóda Runge-Kutta a Taylorov rad. Najväčšia pozornosť je venovaná metóde Taylorovej rady, ktorá poskytuje vhodný pomer medzi rýchlosťou a presnosťou [2]. Bližší popis a práca s touto metódou sú uvedené v kapitole 3. Ukážeme si rozdelenie Taylorovej rady na jednotlivé členy a následne úpravu týchto členov tak, aby bolo možné výpočet čo najviac paralelizovať a optimalizovať. Táto úprava bude realizovaná na obyčajných diferenciálnych rovniciach s operáciou násobenia a delenia. Takto upravené a vytvorené rovnice budú následne použité pri návrhu rôznych typov numerických integrátorov.

Kapitola 4 sa zaoberá reprezentáciou operandov v pevnej a v pohyblivej rádovej čiarky. Pri použití pohyblivej rádovej čiarky sú uvedené postupy výpočtu znamienka, exponentu a mantisy na jednoduchých matematických operáciách ako sú sčítanie, odčítanie, násobenie a delenie.

V kapitole 5 sú predstavené a popísané návrhy jednotlivých integrátorov a popis ich činnosti. Podľa rovníc uvedených v kapitole 3, sú navrhnuté paralelné numerické integrátory s operáciou násobenia a delenia. Oba integrátory sú navrhnuté v prevedení pevnej a pohyblivej rádovej čiarky. Operácia delenia je realizovaná pomocou deliacho algoritmu SRT. Bližší popis tohto algoritmu sa nachádza v bakalárskej práci Simulátor procesora s operáciou delenia [3]. Vzájomným zapojením navrhnutých numerických integrátorov je možné riešiť rozsiahle diferenciálne rovnice.

Kapitola 2

Numerická integrácia

Diferenciálne rovnice sú matematické rovnice, v ktorých ako premenné vystupujú derivácie funkcií. Najvyššia derivácia v rovnici udáva rád rovnice. Rovnice, ktoré obsahujú derivácie len podľa jednej premennej, sa nazývajú obyčajné diferenciálne rovnice (ODR). Rovnice, ktoré obsahujú derivácie podľa viacerých premenných, sú takzvané parciálne diferenciálne rovnice (PDR). Diferenciálnu rovnicu je možné riešiť analyticky alebo použitím numerickej metódy. Pri väčšine praktických úloh je analytické riešenie veľmi zložité, preto sa používa skôr riešenie numerické. Základným princípom numerického riešenia je diskretizácia premenných, keď spojitú veličinu nahradíme postupnosťou diskrétnych bodov. Pri použití dostatočne hustom rozložení bodov môžeme približne reprezentovať spojitú veličinu. Vzdialenosť medzi dvoma susednými bodmi sa nazýva krok metódy. Numerické metódy pri svojom výpočte používajú niekoľko predchádzajúcich krokov. Podľa počtu týchto krokov rozdelujeme numerické metódy na metódy jednokrokové a viackrokové. Jednokrokové metódy pri svojom výpočte používajú len jeden predchádzajúci krok, viackrokové využívajú niekoľko predchádzajúcich krokov. Pri numerických metódach je teda potrebné zvoliť počiatočný stav t.j. počiatočnú podmienku riešenej úlohy [4].

Najhlavnejšími kritériami pri numerických metódach je ich presnosť a rýchlosť. Tie je možné ovplyvniť veľkosťou integračného kroku a rádom integračnej metódy. Pri počítaní numerickými metódami nedostávame teoreticky presné riešenie, ale výsledok konverguje k správne mu riešeniu, a teda dostávame výsledok s určitou presnosťou. Výsledná chyba výpočtu je súčet lokálnej a akumulovanej chyby. Lokálna chyba zahŕňa chybu numerickej metódy a zaokrúhľovaciu chybu, ktorá môže byť spôsobená typom hardvérovej architektúry, ako napríklad použitím pevnej alebo pohyblivej rádovej čiarky, ktoré sú bližšie popísané v kapitole 4. Akumulovaná chyba je súčtom lokálnych chýb, a teda sa počas výpočtu zvyšuje.

2.1 Taylorova rada

Táto numerická metóda je tvorená nekonečným radom, avšak na výpočet sa používa len niekoľko jej členov. Počet použitých členov udáva rád metódy. Čím väčší počet členov použijeme, tým je výsledok presnejší. Počet použitých členov môže byť zadaný fixne, alebo sa môže dynamicky meniť v závislosti od požadovanej presnosti. Presnosť sa počíta z viacerých najvyšších členov, a po dosiahnutí požadovanej presnosti výpočet končí. Nekonečnú Taylorovu radu môžeme zapísať:

$$y_{i+1} = y_i + hy'_i + \frac{h^2}{2!}y''_i + \frac{h^3}{3!}y'''_i + \frac{h^4}{4!}y^{(4)}_i + \dots + \frac{h^n}{n!}y^{(n)}_i, \quad (2.1)$$

kde h je veľkosť integračného kroku a i označuje krok diskretizovanej veličiny. Ďalšie popísané metódy sú odvodené od Taylorovej rady.

2.2 Eulerova metóda

Najjednoduchšou jednokrokovou metódou je Eulerova metóda. Je to Taylorova rada 1. rádu, keďže používa len prvé dva členy Taylorovej rady. Preto je rýchla, ale menej presná. Zapisuje sa nasledovne:

$$y_{i+1} = y_i + hy'_i \quad (2.2)$$

Zvolením dostatočne malého integračného kroku h môžeme zvýšiť jej presnosť.

2.3 Runge-Kutta

Ďalšou veľmi známou numerickou metódou je Runge-Kutta. Všeobecná schéma tejto metódy má tvar:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \sum_{j=1}^r \alpha_j k_j, \quad i = 0, 1, \dots \\ k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_j &= f(x_i + \lambda_j h, y_i + \mu_j h k_{j-1}), \quad j = 2, \dots, r \end{aligned} \quad (2.3)$$

kde α_j , λ_j a μ_j sú vhodne zvolené konštanty a r určuje rád metódy. Ako je z uvedených rovníc vidieť, pri výpočte sa používajú medzivýpočty k , ktorých počet je rovný rádu metódy. Najznámejšie a najčastejšie používané varianty sú Runge-Kutta 2. a 4. rádu, ktoré sú popísané nižšie.

2.3.1 Runge-Kutta 2. rádu

Táto metóda je oproti Eulerovej metóde presnejšia, ale pri rovnakej veľkosti integračného kroku vyžaduje viac operácií. Na výpočet používa dva medzivýpočty k_1 a k_2 . Má nasledujúci tvar:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{2}h(k_1 + k_2) \\ k_1 &= f(t_i, y_i) \\ k_2 &= f(t_{i+1}, y_i + hk_1) \end{aligned} \quad (2.4)$$

2.3.2 Runge-Kutta 4. rádu

Runge-Kutta 4 rádu je najpoužívanější tvar tejto metódy, ktorý môžeme zapísať nasledovne:

$$\begin{aligned}y_{i+1} &= y_i + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\k_1 &= f(t_i, y_i) \\k_2 &= f(t_{i+1} + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1) \\k_3 &= f(t_{i+1} + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2) \\k_4 &= f(t_{i+1} + h, y_i + hk_3)\end{aligned}\tag{2.5}$$

Pri výpočte sú použité štyri medzivýpočty, avšak aj napriek tomu má táto metóda dobrý pomer rýchlosti a presnosti.

Kapitola 3

Riešenie diferenciálnych rovníc Taylorovou radou

Na riešenie diferenciálnych rovníc je možné upraviť základný tvar Taylorovej rady (2.1) tak, aby sa dali jednotlivé operácie vykonávať paralelne. Prevod jednoduchej obyčajnej diferenciálnej rovnice je prevzatý z [3]. Ďalšie možné zdroje sú [6], [1].

Obyčajná diferenciálna rovnica:

$$y' = y, \quad y(0) = y_0. \quad (3.1)$$

Z tohto vzťahu vyplýva, že:

$$y = y' = y'' = y''' = y^{(4)} = \dots = y^{(n)}. \quad (3.2)$$

Po dosadení do Taylorovej rady (2.1) získame:

$$y_{i+1} = y_i + hy_i + \frac{h^2}{2!}y_i + \frac{h^3}{3!}y_i + \frac{h^4}{4!}y_i + \dots + \frac{h^n}{n!}y_i \quad (3.3)$$

To je možné prepísať na:

$$y_{i+1} = y_i + DY1_i + DY2_i + DY3_i + DY4_i + \dots + DY(N)_i \quad (3.4)$$

kde je význam jednotlivých členov nasledujúci:

$$\begin{aligned} DY1_i &= hy_i \\ DY2_i &= \frac{h^2}{2!}y_i = \frac{h}{2}DY1_i \\ DY3_i &= \frac{h^3}{3!}y_i = \frac{h}{3}DY2_i \\ DY4_i &= \frac{h^4}{4!}y_i = \frac{h}{4}DY3_i \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.5)$$

Všeobecný zápis:

$$DY(N)_i = \frac{h^n}{n!}y_i = \frac{h}{n}DY(N-1)_i$$

Z týchto vzťahov je možné riešiť jednoduché diferenciálne rovnice, ako je tomu [5], [1]. Zo vzťahov taktiež vyplýva, že každý ďalší člen Taylorovej rady je počítaný z predchádzajúceho, čo vedie k zefektívneniu výpočtu, a to hlavne pri vyšších deriváciách, kde je výpočet častokrát zložitý. Podobným postupom je možné upraviť diferenciálne rovnice, ktoré obsahujú operáciu násobenia alebo delenia, a tiež tak zvýšiť efektívnosť výpočtu týchto výpočtovo náročnejších operácií.

3.1 Riešenie diferenciálnej rovnice s operáciou násobenia

Všeobecný zápis pre diferenciálnu rovnicu s operáciou násobenia je nasledujúci:

$$y' = qr, \quad y(0) = y_0 \quad (3.6)$$

Pre výpočet každej premennej v rovnici je potrebné použiť Taylorovu radu v tvare (3.4). Jednotlivé Taylorove rady vyzerajú nasledovne:

$$y_{i+1} = y_i + DY1_i + DY2_i + DY3_i + DY4_i + \dots + DY(n)_i \quad (3.7)$$

$$q_{i+1} = q_i + DQ1_i + DQ2_i + DQ3_i + DQ4_i + \dots + DQ(n)_i \quad (3.8)$$

$$r_{i+1} = r_i + DR1_i + DR2_i + DR3_i + DR4_i + \dots + DR(n)_i \quad (3.9)$$

Spočítame jednotlivé derivácie rovnice (3.6):

$$\begin{aligned} y' &= qr \\ y'' &= q'r + qr' \\ y''' &= q''r + 2q'r' + qr'' \\ y^{(4)} &= q'''r + 3q''r' + 3q'r'' + qr''' \\ &\vdots \end{aligned}$$

Ako je vidieť, derivácie vytvárajú Pascalov trojuholník a môžeme ich všeobecne zapísať ako:

$$y^{(n+1)} = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} q^{(n-k)} r^{(k)}$$

Z derivácií odvodíme jednotlivé členy Taylorovej rady (2.1), ktoré majú nasledujúci význam:

$$\begin{aligned} \frac{DY1_i}{h} &= DQ0_i DR0_i \\ \frac{DY2_i}{\frac{h^2}{2!}} &= \frac{DQ1_i}{h} DR0_i + DQ0_i \frac{DR1_i}{h} \\ \frac{DY3_i}{\frac{h^3}{3!}} &= \frac{DQ2_i}{\frac{h^2}{2!}} DR0_i + 2 \frac{DQ1_i}{h} \frac{DR1_i}{h} + DQ0_i \frac{DR2_i}{\frac{h^2}{2!}} \\ \frac{DY4_i}{\frac{h^4}{4!}} &= \frac{DQ3_i}{\frac{h^3}{3!}} DR0_i + 3 \frac{DQ2_i}{\frac{h^2}{2!}} \frac{DR1_i}{h} + 3 \frac{DQ1_i}{h} \frac{DR2_i}{\frac{h^2}{2!}} + DQ0_i \frac{DR3_i}{\frac{h^3}{3!}} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.10)$$

Po úprave dostaneme konečný tvar jednotlivých členov:

$$DY1_i = hq_i r_i \quad (3.11)$$

$$DY2_i = \frac{h}{2}(DQ1_i DR0_i + DQ0_i DR1_i) \quad (3.12)$$

$$DY3_i = \frac{h}{3}(DQ2_i DR0_i + DQ1_i DR1_i + DQ0_i DR2_i) \quad (3.13)$$

$$DY4_i = \frac{h}{4}(DQ3_i DR0_i + DQ2_i DR1_i + DQ1_i DR2_i + DQ0_i DR3_i) \quad (3.14)$$

\vdots

Všeobecný zápis:

$$DY(N)_i = \frac{h}{N} \cdot \left(\sum_{k=1}^N DQ(N-k)_i \cdot DR(k-1)_i \right)$$

Uvedený prevod vychádza z práce [12]. Jednotlivé rovnice členov Taylorovej rady budú slúžiť pri návrhu a implementácii násobiacich integrátorov.

3.2 Riešenie diferenciálnej rovnice s operáciou delenia

Podobne, ako v predchádzajúcom prípade, zapíšme diferenciálnu rovnicu s operáciou delenia nasledovne:

$$y' = \frac{u}{v}, \quad y(0) = y_0 \quad (3.15)$$

Jednotlivé Taylorove rady pre premenné v rovnici vyzerajú nasledovne:

$$y_{i+1} = y_i + DY1_i + DY2_i + DY3_i + DY4_i + \dots + DY(n)_i \quad (3.16)$$

$$u_{i+1} = u_i + DU1_i + DU2_i + DU3_i + DU4_i + \dots + DU(n)_i \quad (3.17)$$

$$v_{i+1} = v_i + DV1_i + DV2_i + DV3_i + DV4_i + \dots + DV(n)_i \quad (3.18)$$

Ďalšie derivácie rovnice (3.15) sú:

$$\begin{aligned} y'' &= \frac{u'v - uv'}{v^2} = \frac{1}{v}(u' - y'v') \\ y''' &= \left(\frac{1}{v}(u' - y'v') \right)' = \frac{1}{v}(u'' - 2y''v' - y'v'') \\ y^{(4)} &= \left(\frac{1}{v}(u'' - 2y''v' - y'v'') \right)' = \frac{1}{v}(u''' - 3y'''v' - 3y''v'' - y'v''') \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.19)$$

Aj tu je vidieť, že jednotlivé derivácie tvoria Pascalov trojuholník. Všeobecný zápis je nasledovný:

$$y^{(n+1)} = \frac{1}{v} \left(u^{(n)} - \left(\sum_{k=1}^n \binom{n}{k} y^{(n-k+1)} v^{(k)} \right) \right)$$

Po dosadení jednotlivých členov $DV(n)_i$ a $DU(n)_i$ do derivácií (3.19) dostaneme:

$$\begin{aligned}
\frac{DY1_i}{h} &= \frac{1}{v}u \\
\frac{DY2_i}{\frac{h^2}{2!}} &= \frac{1}{v}\left(\frac{DU1_i}{h} - \frac{DY1_i}{h}\frac{DV1_i}{h}\right) \\
\frac{DY3_i}{\frac{h^3}{3!}} &= \frac{1}{v}\left(\frac{DU2_i}{\frac{h^2}{2!}} - 2\frac{DY2_i}{\frac{h^2}{2!}}\frac{DV1_i}{h} - \frac{DY1_i}{h}\frac{DV2_i}{\frac{h^2}{2!}}\right) \\
\frac{DY4_i}{\frac{h^4}{4!}} &= \frac{1}{v}\left(\frac{DU3_i}{\frac{h^3}{3!}} - 3\frac{DY3_i}{\frac{h^3}{3!}}\frac{DV1_i}{h} - 3\frac{DY2_i}{\frac{h^2}{2!}}\frac{DV2_i}{\frac{h^2}{2!}} - \frac{DY1_i}{h}\frac{DV3_i}{\frac{h^3}{3!}}\right) \\
&\vdots
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Po úprave majú jednotlivé členy Taylorovej rady nasledovný tvar:

$$DY1_i = \frac{1}{v_i}(hu_i) \tag{3.21}$$

$$DY2_i = \frac{1}{2v_i}(DU1_i h - DY1_i DV1_i) \tag{3.22}$$

$$DY3_i = \frac{1}{3v_i}(DU2_i h - 2DY2_i DV1_i - DY1_i DV2_i) \tag{3.23}$$

$$DY4_i = \frac{1}{4v_i}(DU3_i h - 3DY3_i DV1_i - 2DY2_i DV2_i - DY1_i DV3_i) \tag{3.24}$$

\vdots

Všeobecný zápis:

$$DY(N)_i = \frac{1}{NDV0_i} \cdot \left(DU(N-1)_i \cdot h - \left(\sum_{k=1}^{N-1} (N-k) \cdot DY(N-k)_i \cdot DV(k)_i \right) \right)$$

Vyjadrenie jednotlivých členov Taylorovej rady vychádza z mojej bakalárskej práce [3]. Takto upravené členy sú následne použité na návrh jednotlivých typov integrátorov popísaných v kapitole 5.

Kapitola 4

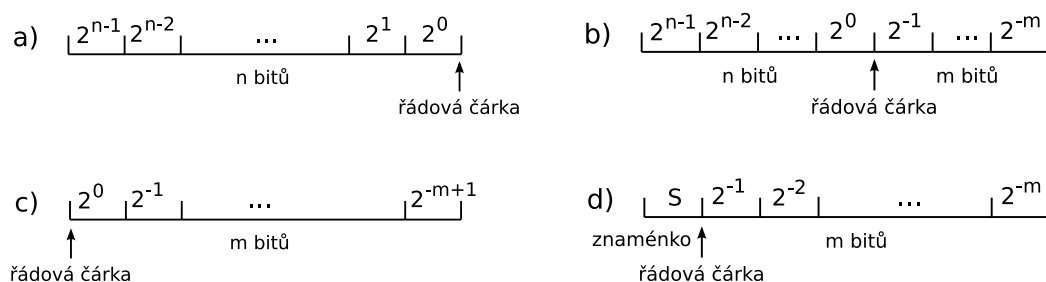
Reprezentácia operandov

Čísla vo výpočtových systémoch sú reprezentované rôznymi spôsobmi v závislosti od zvolenej aritmetiky. Najpoužívanjšie sú reprezentácie čísiel v pevnej a v pohyblivej rádovej čiarky (ang. fixed point (FX) a floating point (FP)). Obe aritmetiky sú popísané v nasledujúcich podkapitolách. Informácie v tejto kapitole sú čerpané z [9], [10], [1], [7], [8].

4.1 Pevná rádová čiarka

Pri počítaní v pevnej rádovej čiarky sú čísla reprezentované na k bitoch v tvare $n.m$, kde prvých n bitov tvorí časť čísla pred desatinnou čiarkou, a zostávajúcich m bitov tvorí číslo za desatinnou čiarkou. Pozícia desatinnej čiarky je dopredu známa. V závislosti od jej pozície sa používajú rôzne formáty pevnej rádovej čiarky. Tie najpoužívannejšie sú znázornené na obrázku 4.1.

Obrázok 4.1a zobrazuje aritmetiku s nulovým počtom bitov za desatinnou čiarkou a teda sa jedná o celočíselnú aritmetiku na n bitoch. Vedľajší obrázok 4.1b zobrazuje aritmetiku s n bitmi pred desatinnou čiarkou a s m bitmi za desatinnou čiarkou. Ďalšia časť obrázku 4.1c je opakom 4.1a, kde je číslo reprezentované len za desatinnou čiarkou na m bitoch. Posledný obrázok 4.1d je podobný ako 4.1c, ale s pridaným znamienkovým bitom S . V tejto práci budem používať FX aritmetiku v tvare 4.1b s pridaním znamienkovým bitom na pozícii MSB (most significant bit).



Obr. 4.1: Rôzne formáty fixed point aritmetiky [1]

Vo fixed point aritmetike sa používajú rôzne kódy, napr. priamy kód, doplnkový kód či inverzný kód. V nasledujúcich kapitolách a pri návrhu integrátorov v pevnej rádovej čiarky budeme používať doplnkový kód.

4.2 Pohyblivá rádová čiarka

Čísla uložené v pohyblivej rádovej čiarkke sú tvorené exponentom a mantisou. Všeobecný tvar na získanie hodnoty uloženej vo FP je nasledujúci:

$$X = B^E \cdot M \quad (4.1)$$

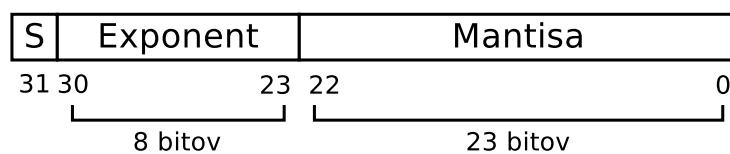
X - výsledná hodnota

B - základ sústavy

E - hodnota exponentu

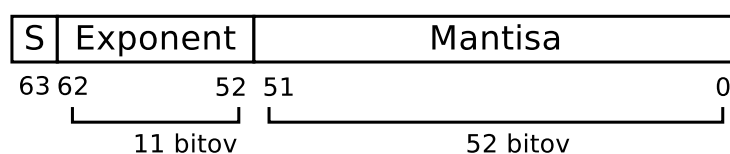
M - mantisa

Zvýšením počtu bitov v exponente E sa zvýši rozsah hodnôt, ktorý je možný reprezentovať, a zvýšením počtu bitov v mantise M sa zvýši presnosť uložených čísel. Existuje veľa formátov uloženia čísel v pohyblivej rádovej čiarkke. Najpoužívanější a najrozšírenejší je štandard **IEEE 754**. Definuje vlastný formát uloženia čísel a viaceré formáty s rôznou presnosťou. Najpoužívanější z nich sú formáty čísel s jednoduchou (single) a s dvojitou (double) presnosťou. Čísla s jednoduchou presnosťou sú uložené na 32 bitoch, kde MSB je znamienkový bit S , ďalších 8 bitov tvorí exponent E , a zvyšných 23 bitov tvorí mantisu M .



Obr. 4.2: IEEE 754 formát s jednoduchou presnosťou

Čísla s dvojitou presnosťou sú uložené v rovnakom formáte ako čísla s jednoduchou presnosťou, avšak líšia sa v počte bitov, ktorý je zväčšený na 64, kde MSB je znamienkový bit S , ďalších 11 bitov tvorí exponent E , a zvyšných 52 bitov tvorí mantisu M .



Obr. 4.3: IEEE 754 formát s dvojitou presnosťou

Znamienko S nadobúda hodnoty 0, čo značí kladné číslo; alebo 1, čo značí záporné číslo. Exponent je uložený v kóde s nepárnyim posunutím o hodnotu BIAS. Táto hodnota je zvolená tak, aby uložený exponent bol vždy kladný. Pri jednoduchej presnosti má teda BIAS hodnotu 127 a pri dvojitej presnosti hodnotu 2047.

Hodnota mantisy je uložená v priamom kóde bez znamienka, znížená o hodnotu 1, keďže je tu použitá tzv. normalizácia. Mantis je normalizovaná do tvaru $1.M$, kde sa jednotka neukladá – je skrytá, čím sa ušetrí jeden bit. Hodnotu takto uloženého čísla získame zo vzťahu:

$$X_{754} = -1^S \cdot 2^{E-BIAS} \cdot (1, M) \quad (4.2)$$

X_{754} - výsledná hodnota

$BIAS$ - 127 alebo 2047

E - hodnota exponentu

M - mantisa

Štandard IEEE 754 definuje aj špeciálne hodnoty ako kladnú/zápornú nulu, kladné/záporné nekonečno, či hodnotu NaN (not a number). Tieto hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.1. Hodnota mantisy v normalizovanom tvare je v intervale $< 1, 0; 2, 0$). Ak tomu tak nie je, ide o tzv. denormalizované číslo, a hodnota exponentu je braná ako -126 . Štandard IEEE 754 definuje aj spôsob vykonávania základných matematických operácií, ktoré sú popísané v sekciách 4.2.1 a 4.2.2.

S (znamienko)	E (exponent)	M (mantisa)	význam
0/1	00000000	nulová hodnota	+/- 0
0/1	00000000	nenulová hodnota	+/- denormalizované číslo
0/1	1 - 254	ľubovoľná hodnota	+/- FP číslo
0/1	11111111	nulová hodnota	+/- ∞
0/1	11111111	nenulová hodnota	NaN

Tabuľka 4.1: Štandard IEEE 754 [10]

4.2.1 Súčet a rozdiel

Súčet a rozdiel v pohyblivej rádovej čiarke sa počíta podľa vzorcov

$$X + Y = (M_X \cdot 2^{E_X - E_Y} + M_Y) \cdot 2^{E_Y}, \text{ kde } E_X \leq E_Y \quad (4.3)$$

$$X - Y = (M_X \cdot 2^{E_X - E_Y} - M_Y) \cdot 2^{E_Y}, \text{ kde } E_X \leq E_Y \quad (4.4)$$

Postup výpočtu operácie súčtu/rozdielu v pohyblivej rádovej čiarke podľa štandardu IEEE 754 ([11], [13]) je nasledovný:

1. Na začiatku výpočtu sa obe čísla skontrolujú na výskyt špeciálnych hodnôt z tabuľky 4.1. Ak ide o špeciálne číslo, výsledok sa určí podľa tabuľky 4.2. Inak sa pokračuje bodom 2.
2. Vykoná sa porovnanie exponentov. Ak sú exponenty rozdielne, mantisu menšieho čísla posunieme o rozdiel exponentov doprava. Tým docielime rovnosť oboch exponentov. Pri posune je dôležité, aby sme nezabudli na 1, ktorá je skrytá, kvôli normalizácií. Posun sa vykonáva spolu s toutou 1.
3. Následne sa porovnávajú znamienka, a podľa výsledku sa vykoná súčet alebo rozdiel mantisy väčšieho čísla a posunutej mantisy. Ak došlo k pretečeniu, mantisa výsledku sa posunie o jeden bit doprava a hodnota exponentu sa zvýši. Aby bolo možné pretečenie detekovať, je potrebné sčítanie/odčítanie mantís vykonávať na sčítačke o jeden bit väčšej než je veľkosť mantisy (veľkosťou mantisy sa tu myslí počet bitov potrebných na uloženie mantisy aj so skrytou 1, čiže $|1.M| + 1$).
4. Ak je to potrebné, vykoná sa normalizácia. Mantisa sa posunie o potrebný počet bitov doprava resp. doľava, tak, aby bola v tvare $1.M$. O daný počet bitov sa exponent zvýši resp. zníži.
5. Na koniec výpočtu sa skontroluje hodnota exponentu. Ak je hodnota maximálna, došlo k pretečeniu výsledku. Ten sa nastaví podľa znamienka na kladné alebo záporné nekonečno. V opačnom prípade, ak je hodnota exponentu minimálna (nulová), došlo k podtečeniu, a výsledok je nastavený podľa znamienka na kladnú alebo zápornú nulu.

Hodnota operandu 1	Hodnota operandu 2	Výsledok sčítania
FP číslo	+/- ∞	+/- ∞
+/- ∞	+/- ∞	+/- ∞
+ ∞	- ∞	NaN
NaN	ľubovoľná hodnota	NaN

Tabuľka 4.2: Výsledok operácie sčítania so špeciálnymi hodnotami

4.2.2 Násobenie a delenie

Násobenie a delenie v pohyblivej rádovej čiarke sa počíta nasledovne:

$$X \times Y = (M_X \cdot M_Y) \cdot 2^{E_X + E_Y} \quad (4.5)$$

$$X \div Y = (M_X \div M_Y) \cdot 2^{E_X - E_Y} \quad (4.6)$$

Postup výpočtu operácií násobenia a delenia podľa štandardu IEEE 754 ([11], [13]) je nasledovný:

1. Rovnako ako pri sčítaní, aj teraz sa na začiatku výpočtu skontroluje výskyt špeciálnych hodnôt oboch čísel podľa tabuľky 4.1. Ak ide o špeciálne číslo, výsledok sa určí podľa tabuľky 4.3 alebo 4.4. Pri operácii delenia je potrebné kontrolovať nepovolenú operáciu delenie nulou. Pokračuje sa bodom 2.
2. Pri násobení sa hodnota exponentu vypočíta ako súčet exponentov, od ktorého sa odpočíta hodnota *BIAS*. Pri operácii delenia sa hodnota exponentu vypočíta ako rozdiel exponentov, ku ktorému je pripočítaná hodnota *BIAS*.
3. Výsledná mantisa je rovná súčinu resp. podielu mantís. Pri násobení je potrebné použiť násobičku, ktorej bitová šírka sa rovná dvojnásobku počtu bitov mantisy 1.*M*. Ak dôjde k pretečeniu alebo k podtečeniu mantisy, vykoná sa posun mantisy doprava resp. doľava a hodnota exponentu sa zvýši resp. zníži.
4. Pokiaľ je to potrebné, prebehne normalizácia.
5. Na konci výpočtu sa skontroluje hodnota exponentu. Postupuje sa rovnako ako pri operácii súčtu: ak je hodnota exponentu maximálna, nastaví sa podľa znamienka na kladné alebo záporné nekonečno. V opačnom prípade, ak je hodnota exponentu minimálna (nulová), výsledok sa nastaví podľa znamienka na kladnú alebo zápornú nulu.

Hodnota operandu 1	Hodnota operandu 2	Výsledok násobenia
kladné/záporné FP číslo	+/- ∞	+/- ∞
nula	+/- ∞	NaN
+/- ∞	+/- ∞	+/- ∞
NaN	ľubovoľná hodnota	NaN

Tabuľka 4.3: Výsledok operácie násobenia so špeciálnymi hodnotami

Hodnota operandu 1	Hodnota operandu 2	Výsledok násobenia
kladné/záporné FP číslo	+/- 0	+/- ∞
0	0	NaN

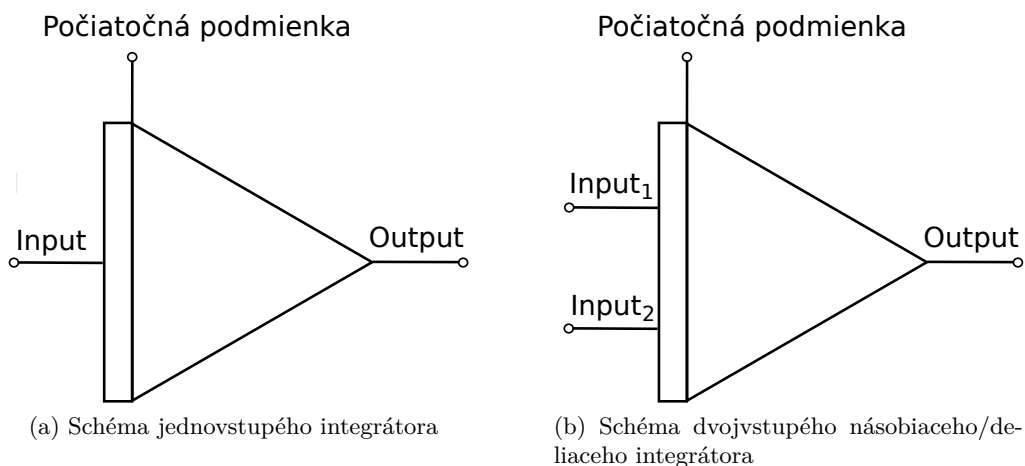
Tabuľka 4.4: Výsledok operácie delenia so špeciálnymi hodnotami

Kapitola 5

Numerické integrátory

Numerický integrátor je hardvérový komponent, ktorý slúži na výpočet numerickej integrácie. Podľa spôsobu výpočtu a komunikácie medzi komponentmi integrátora sa numerické integrátory delia na sériové, sériovo-paralelné a paralelné. My sa budeme zaoberať paralelnými numerickými integrátormi, kvôli ich jednoduchosti a rýchlosti výpočtu. Ďalej môžeme numerické integrátory rozdeliť na jednovstupé a dvojevstupé. Jedno vstupný integrátor vykonáva integráciu vstupnej hodnoty a posiela ju na výstup. Schéma integrátora je znázornená na obrázku 5.1a a ako z názvu vyplýva obsahuje jeden vstup pre vstupnú hodnotu. Ďalej obsahuje jeden vstup pre počiatočnú podmienku a jeden výstup pre výsledok výpočtu. Dvojevstupové integrátory obsahujú jeden vstup pre počiatočnú podmienku, dva vstupy pre prívod operandov a jeden výstup pre výsledok výpočtu. Schéma integrátora je znázornená na obrázku 5.1b. Tieto integrátory rozdeľujeme podľa použitej operácie na násobiace a deliace integrátory.

V nasledujúcich podkapitolách predstavíme jednotlivé návrhy paralelných násobiacich a paralelných deliacich integrátorov, oba typy v pevnej a v pohyblivej rádovej čiarke. Predstíme taktiež jednovstupý paralelný integrátor v pohyblivej rádovej čiarke.

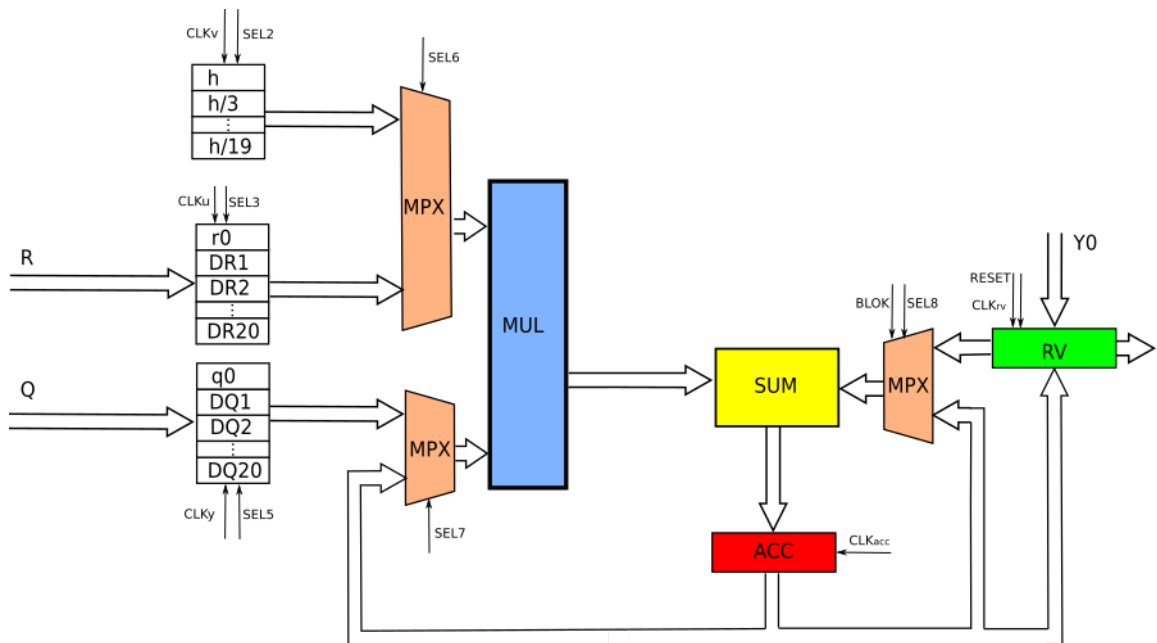


Obr. 5.1: Schéma jednovstupého a dvojevstupého integrátora

5.1 Násobiaci integrátor v pevnej rádovej čiarke

Násobiaci integrátor počíta rovnicu (3.6) pomocou (3.11) – (3.14). Na základe týchto rovníc bol vytvorený návrh paralelného násobiaceho integrátora, ktorý je na obrázku 5.2. Návrh vychádza z práce V. Závadu [12] a bol upravený a rozšírený o počet registrov DRn a DQn , ktoré slúžia na ukladanie prichádzajúcich členov. Počet týchto registrov je stanovený podľa použitej aritmetiky a požadovanej presnosti.

Každý člen DYn obsahuje postupné delenie integračného kroku h . Tieto hodnoty sú predpočítané a uložené v sade registrov h . Avšak nie je potrebné uložiť všetkých 20 hodnôt, stačí uložiť len tie hodnoty, ktorých deliteľ je nepárne číslo. Ostatné hodnoty je možné vypočítať jednoduchým posunom registra doprava, čo je vlastne delenie číslom 2. Týmto spôsobom znížime počet registrov o polovicu. Počet operácií potrebných na výpočet sa nezvýši, keďže posun registra je možné vykonávať v predstihu a paralelne s inými operáciami.



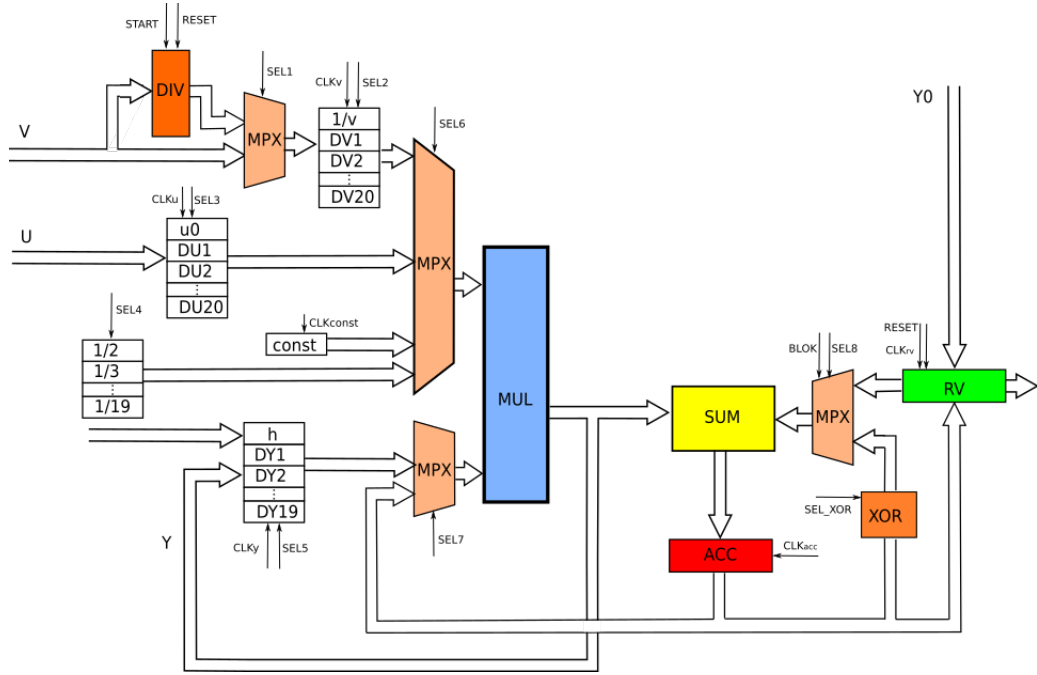
Obr. 5.2: Paralelno-paralelný násobiaci integrátor [12]

Na začiatku výpočtu sú pomocou signálu *RESET* vynulované všetky registre, a nastaví sa potrebné signály na multiplexory *MPX*. Následne je do registra *RV* nahraná počiatočná podmienka, do registra *h* je nahraný integračný krok metódy a do registrov h/i , $i=3,5..19$ sú nahrané predpočítané konštanty. Po prijatí hodnôt R a Q sa začne výpočet. Výsledok výpočtu je uložený v registri *RV*.

5.2 Deliaci integrátor v pevnej rádovej čiarke

Tento integrátor počíta rovnicu (3.15) pomocou členov (3.21) - (3.24). Podobne, ako u násobiaceho integrátora, bol z týchto rovníc vytvorený návrh paralelného deliaceho integrátora. Návrh vychádza z bakalárskej práce [3] a bol upravený podobne ako predošlý násobiaci integrátor zvýšením počtu registrov DUn a DVn . Taktiež sa zvýšil počet registrov DYn , ktoré slúžia na uloženie jednotlivých členov Taylorovej rady, keďže na výpočet nasledu-

júceho člena je použitý predchádzajúci člen. Deliaci integrátor, narozdiel od násobiaceho integrátora, nepoužíva sadu registrov h , ale podobnú sadu registrov, ktorá obsahuje hodnoty $1/n$. Podobne ako u násobiaceho integrátora je možné zmenšiť počet týchto registrov na polovicu s využitím operácie *shift*. Register *const* obsahuje *counter*, ktorý sa postupne inkrementuje, a s ktorým sa násobí hodnota DYn . Výsledná hodnota je uložená do daného registra DYn a znova použitá v ďalšom výpočte, čím sa ušetrí operácia násobenia.

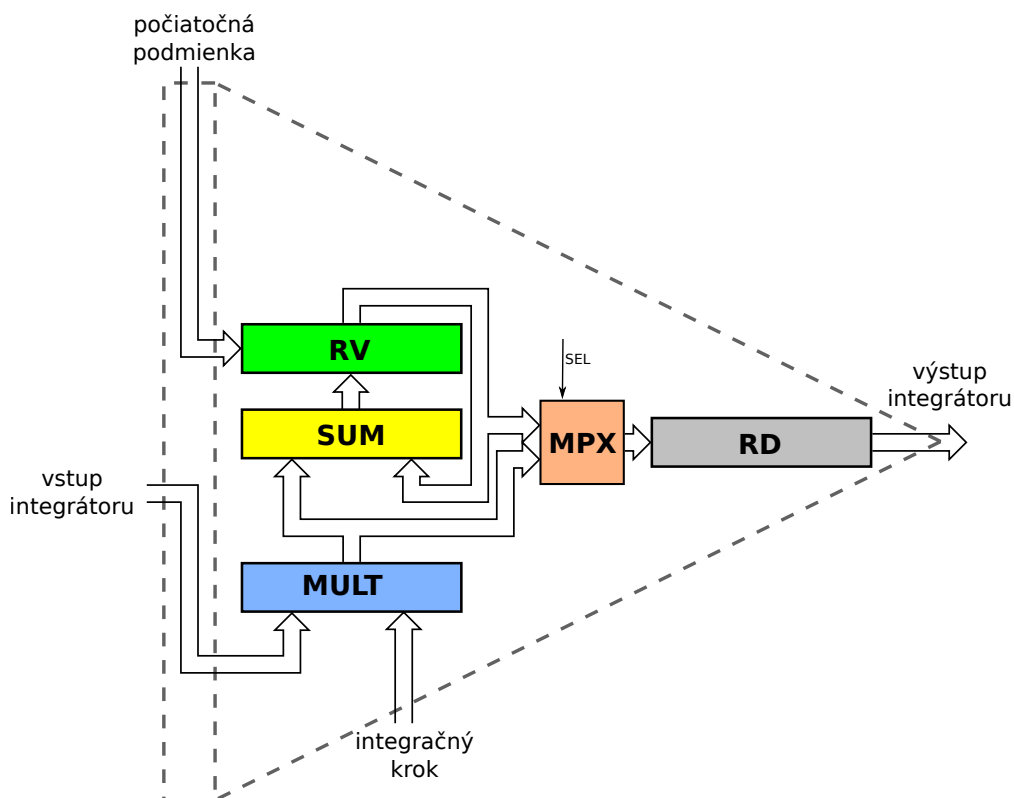


Obr. 5.3: Paralelno-paralelný deliaci integrátor [3]

Podobne ako pri násobiacom integrátore, aj pri paralelnom deliacom integrátore sú na začiatku výpočtu vynulované registre pomocou signálu *RESET* a nastavené signály multiplexorov *MPX*. Ďalej je do registra *RV* nahraná počiatočná podmienka a do registra *h* je nahraný integračný krok. Do registrov $1/n$ sú uložené predpočítané konštanty. Po prijatí hodnôt U a V sa začne výpočet. Hodnota V je privedená do deličky *DIV* a spustí sa výpočet $1/v$ s použitím deliaceho algoritmu *SRT*. Delenie je realizované len raz počas celého výpočtu, keďže ide o veľmi náročnú operáciu. Kvôli optimalizácii je paralelne s delením realizovaný výpočet násobenia uh . Po skončení výpočtu je výsledok uložený do registra *RV*.

5.3 Jendovstupý integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

Tento integrátor bol navrhnutý podľa rovníc (3.5) na základe ktorých počíta diferenciálnu rovnucu (3.1). Z toho vyplýva, že vykonáva numerickú integráciu vstupnej hodnoty a následne výslednú hodnotu posiela na výstup. Na naštartovanie výpočtu slúži počiatočná podmienka. Tá je nahraná na začiatku výpočtu do registra RV.RD. Schéma integrátora je na obrázku 5.4 a vychádza z práce J. Opálku [5].

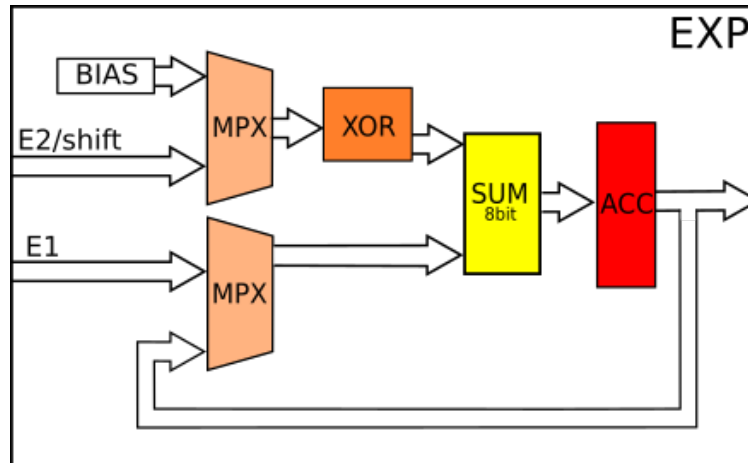


Obr. 5.4: Paralelný jednovstupový integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

5.4 Násobiaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

Blokové schémy zapojenia integrátorov pracujúcich v pohyblivej rádovej čiarke vychádzajú z predchádzajúcich návrhov, ale boli rozšírené o prácu so znamienkami, s mantisou a s exponentmi. Samotný výpočet exponenta sa deje v komponente *EXP*, ktorého návrh je zobrazený na obrázku 5.5.

Komponent *EXP* slúži na vykonávanie výpočtov s exponentmi, ktoré sú popísané v sekciách 4.2.1 a 4.2.2. Obsahuje dva vstupy, do ktorých sú privedené jednotlivé exponenty z komponentov *DIV*, *MUL* a *SUM*. Výpočet sa uskutočňuje pomocou paralelnej sčítačky na 8 alebo 11 bitoch, podľa v závislosti použitej aritmetiky. Pri vykonávaní operácie súčinu alebo rozdielu slúži komponent *EXP* na výpočet rozdielu exponentov. Výsledná hodnota



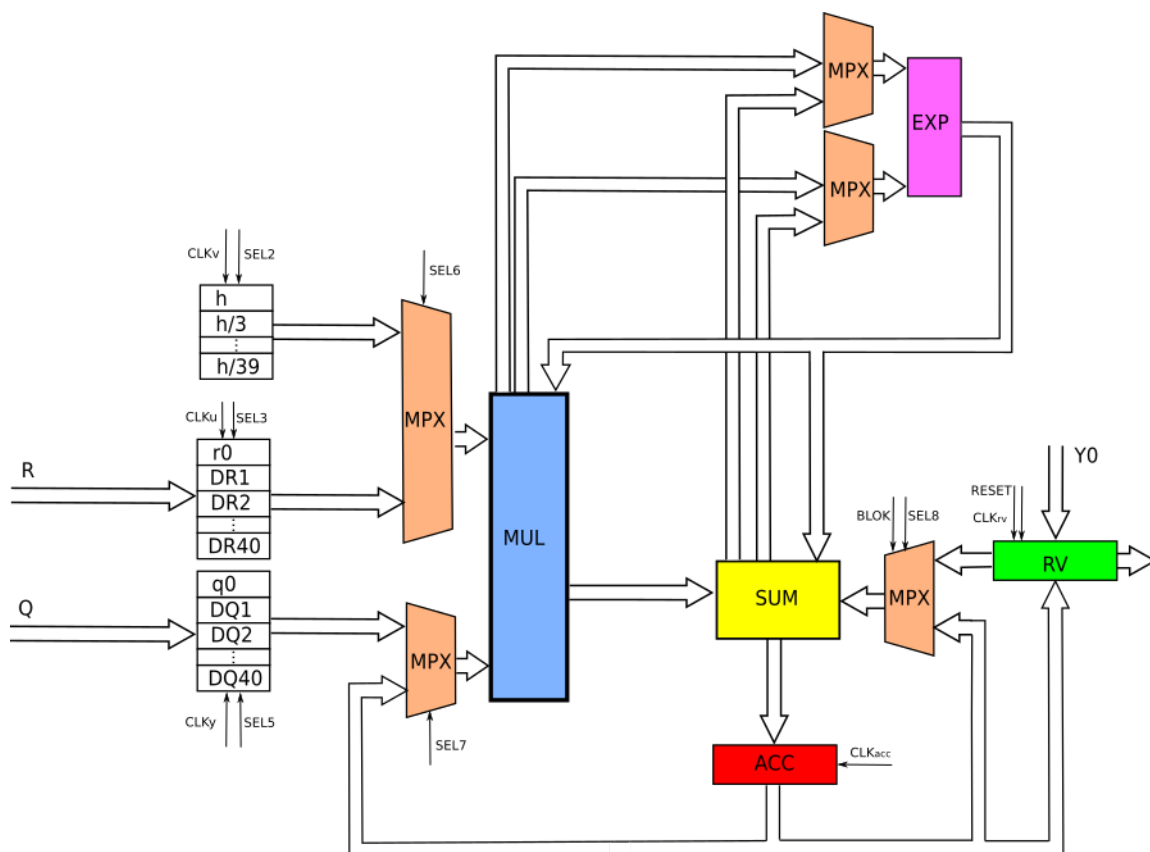
Obr. 5.5: EXP - blok pracujúci s exponentmi

rozdielu je privedená naspäť do sčítačky *SUM* cez register *ACC*. Pri operácii násobenia alebo delenia slúži komponent *EXP* na výpočet výsledného exponentu. Podľa typu operácie sa vykoná súčet alebo rozdiel prijatých exponentov. Táto hodnota je uložená v registri *ACC* a privedená naspäť do sčítačky *SUM_{8bit}* s hodnotou z registra *BIAS*. Vykoná sa súčet alebo rozdiel týchto hodnôt a výsledná hodnota je privedená naspäť do násobičky *MUL* alebo deličky *DIV*. Okrem spomenutých operácií slúži komponent *EXP* na zvýšenie alebo zníženie hodnoty exponenta na základe posunu mantisy pri pretečení/podtečení a pri normalizácii.

Kvôli prehľadnosti neobsahuje schéma zapojenia znázornenie výpočtu znamienka a rozdelenie operandov na znamienko, exponent a na mantisu, a ich opätovné zloženie. Tieto operácie sa vykonávajú v komponentoch *DIV*, *MUL* a *SUM*.

Návrh paralelného násobiaceho integrátora v pohyblivej rádovej čiarke je na obrázku 5.2. Čísla v pohyblivej rádovej čiarke môžeme zobrazit presnejšie ako čísla v pevnej rádovej čiarke, čiže pri uložení malých čísel v pohyblivej rádovej čiarke dochádza k menšej zaokrúhľovacej chybe. Z tohto dôvodu je možné počítať Taylorovu radu s použitím väčšieho počtu členov a zvýšiť tak presnosť výpočtu. Inegrátory v pohyblivej rádovej čiarke sú teda navrhnuté tak, aby umožňovali výpočet až na 40 členov Taylorovej rady. Kvôli tomu, ako môžeme vidieť v návrhu, je zvýšený počet registrov *DR_n* a *DQ_n* na 40. Sada registrov *h/i, i = 3, 5..39* obsahuje 20 registrov, kde sú zvyšné hodnoty dopočítané rovnako ako pri integrátoroch v pevnej rádovej čiarke.

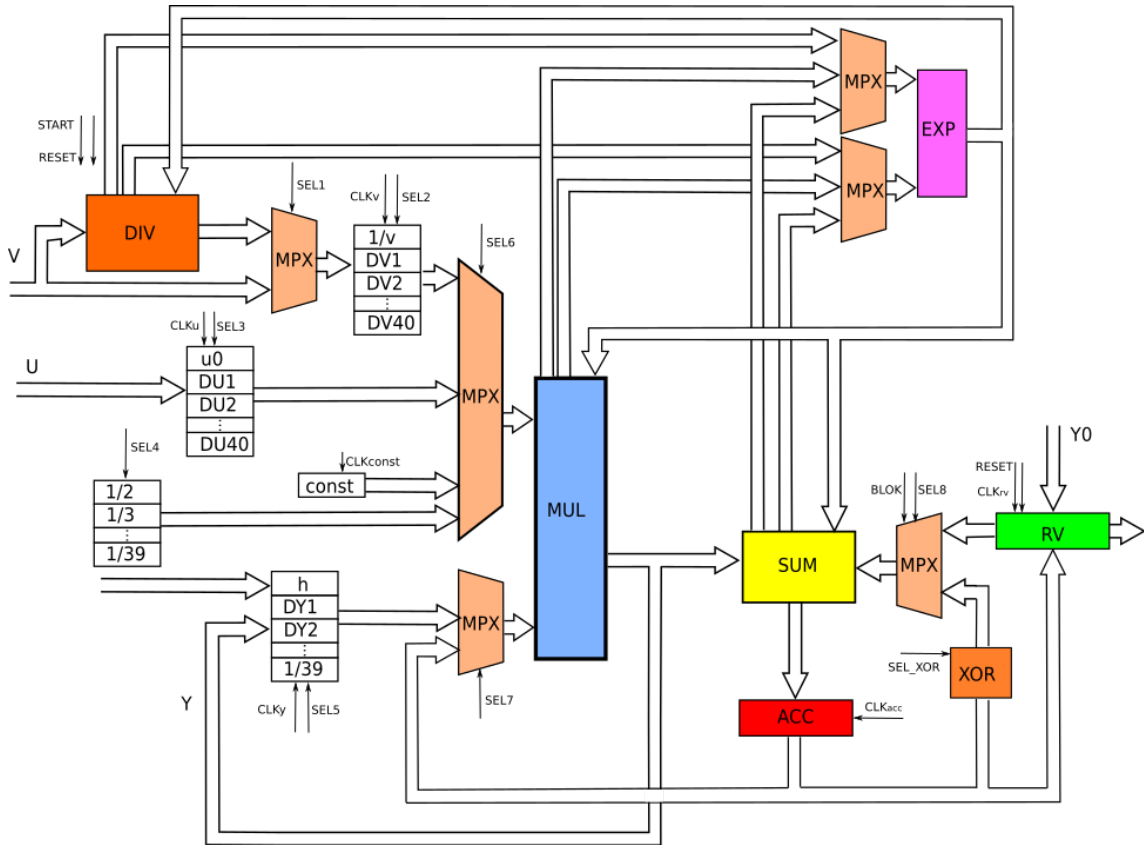
Spôsob výpočtu paralelného násobiaceho integrátora v pohyblivej rádovej čiarke je rovnaký ako pri násobiacom integrátore v pevnej rádovej čiarke. Rozdielne sa vykonávajú operácie násobenia a sčítania. Po privedení hodnôt na vstupy násobičky *MUL* alebo sčítačky *SUM* sú čísla v FP uložené do pomocných registrov v týchto komponentoch. Z týchto registrov sú jednotlivé časti FP čísla rozdistribuované do samostatných výpočetných obvodov. Znamienka sú privedené ku komponentu *XOR*, ktorý vykonáva nonekvivalenciu. Exponenty, ako je popísané vyššie, spracúva komponent *EXP*. Mantisy sú privedené do paralelnej násobičky alebo sčítačky. Výsledné hodnoty sú uložené do výstupného registra daného komponentu (*MUL* alebo *SUM*) a poskytnuté na jeho výstupe k ďalšiemu výpočtu.



Obr. 5.6: Paralelno-paralelný násobiaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

5.5 Deliaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

Paralelný deliaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke je najzložitejší z navrhnutých integrátorov. Obsahuje všetky spomínané operácie: sčítanie, odčítanie, násobenie a delenie; a všetky vykonáva v pohyblivej rádovej čiarke. Operácie násobenia a sčítania sa vykonávajú rovnako ako v paralelnom násobiacom integrátore v pohyblivej rádovej čiarke. Operácia delenia sa vykonáva iba raz za celý výpočet a to paralelne s operáciou násobenia, ako je tomu aj v deliacom interátore v FX aritmetike. Tu však môže dôjsť ku kolízii v použití komponentu *EXP*. Keďže delenie je náročnou operáciou a jej vykonávanie je zdĺhavé, komponent *EXP* je poskytnutý najskôr na výpočet exponentov pri operácii násobenia. Po uvoľnení komponentu *EXP* násobičkou *MUL* je komponent *EXP* pridelený deličke *DIV* na výpočet exponentov. Po skončení delenia je podiel uložený do registra $1/v$ a pokračuje sa v ďalšom výpočte.



Obr. 5.7: Paralelno-paralelný deliaci integrátor v pohyblivej rádovej čiarke

5.6 Sústava diferenciálnych rovníc

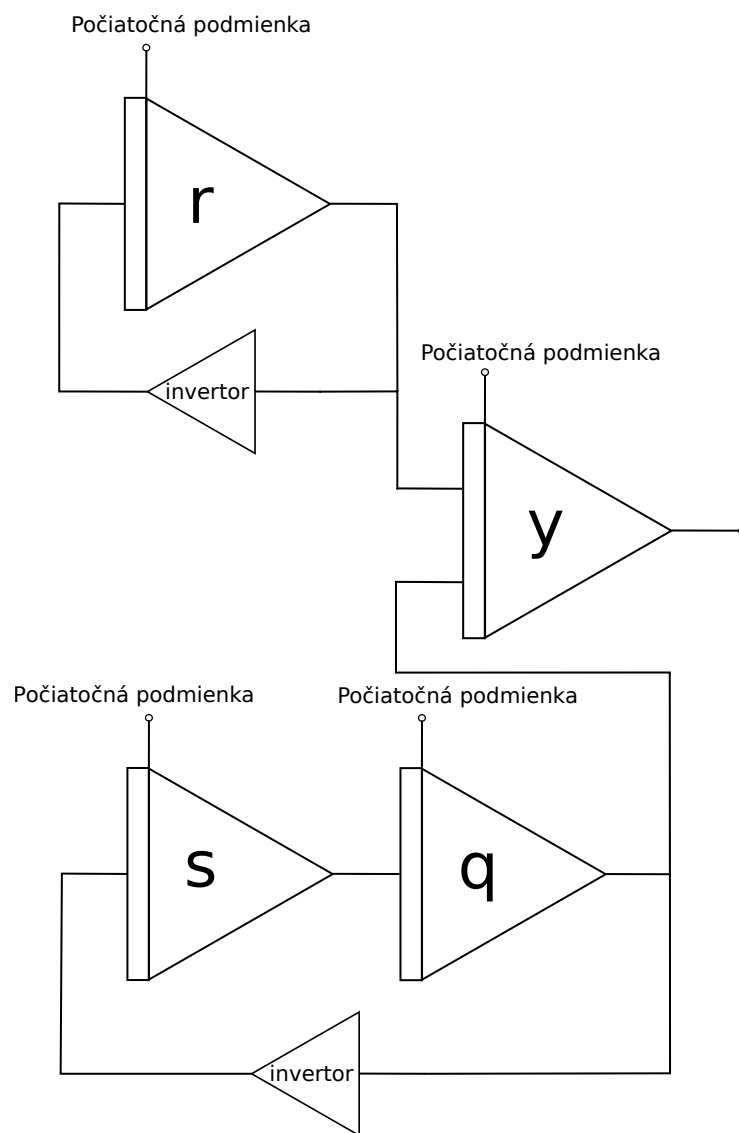
Integrátory, ktoré sme si popísali je možné medzi sebou zapojiť a riešiť tak diferenciálnu rovnicu. Po zapojení integrátorov nebude nutné predpočítavať vstupné hodnoty, ale stačí zadať počiatočné podmienky na naštartovanie výpočtu a všetky ostatné hodnoty sa dopočítajú. Zvoľme konkrétnu diferenciálnu rovnicu s operáciou násobenia v tvare:

$$y' = \sin(t)e^{-t}, \quad y(0) = 1 \quad (5.1)$$

Rovnicu prevedieme do sústavy diferenciálnych rovníc:

$$\begin{aligned} y' &= qr, & y(0) &= 1 \\ r' &= -r, & r(0) &= 1 \\ q' &= s, & q(0) &= 0 \\ s' &= -q, & s(0) &= 1 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Zo sústavy rovníc vytvoríme schému zapojenia integrátorov.



Obr. 5.8: Schéma zapojenia integrátorov [3]

Kapitola 6

Implementácia integrátorov vo VHDL

Jednotlivé integrátory boli implementované v prostredí Xilinx ISE a simulované v Model Sim použitím testbanchu.

Paralelný jednovstupový integrátor je tvorený FX - paralelná násobička, sčítačka.

FP Naprogramovanie FPGA VRTX-5. Pre zložitú prácu a neúspešné sprevádzkovanie displeja, prípadne iných výstupných metód, boli integrátory naprogramované a otestované v FPGA Spartan na prípravku Fitkit.

Kapitola 7

Analýza

- 7.1 Porovanie Taylorovej rady s metódou Runge-Kutta 2. radu
- 7.2 Porovanie Taylorovej rady s metódou Runge-Kutta 4. radu

Kapitola 8

Záver

V tejto práci sme sa zaoberali numerickou integráciou pomocou metódy Taylorovej rady. Úpravou jej členov sme získali potrebné rovnice, z ktorých boli vytvorené jednotlivé návrhy integrátorov. Rozšírili sme návrhy paralelných integrátorov s operáciou násobenia a delenia v pevnej rádovej čiarky tak, aby s nimi bolo možné počítať diferenciálne rovnice na 20 členov Taylorovej rady. Ďalej sme tieto integrátory navrhli aj v prevedení pohyblivej rádovej čiarky. Navrhli sme komponent slúžiaci na výpočet exponentu a na jeho úpravu pri normalizácii. Keďže výpočet v aritmetike pohyblivej rádovej čiarky je presnejší, integrátory využívajúce túto aritmetiku sú navrhnuté na riešenie diferenciálnych rovníc až na 40 členov Taylorovej rady.

Ďalším pokračovaním práce je popísanie navrhnutých integrátorov vo VHDL, otestovanie ich funkčnosti na VIRTEX5 a následné analyzovanie ich časovej a priestorovej zložitosti v porovnaní s metódou Runge-Kutta.

Literatúra

- [1] Kraus, M.: *Paralelní výpočetní architektury založené na numerické integraci*. Disertační práce, FIT VUT v Brně, 2013.
- [2] Kunovský, J.: *Modern Taylor Series Method*. Habilitation work, VUT Brno, 1994.
- [3] Matečný, F.: *Simulátor procesora s operáciou delenia*. Bakalářská práce, FIT VUT v Brně, 2016.
- [4] Milan Kubíček, D. J., Miroslava Dubcová: *Numerické metody a algoritmy*. VŠCHT Praha, 2005, ISBN 80-7080-558-7.
- [5] Opálka, J.: *Automatické řízení výpočtu*. Bakalářská práce, FIT VUT v Brně, 2014.
- [6] Opálka, J.: *Automatické řízení výpočtu ve specializovaném výpočetním systému*. Diplomová práce, FIT VUT v Brně, 2016.
- [7] Sekanina, L.: Operace v FP a iterační algoritmy. , 2017, slajdy k predmetu INP - Návrh počítačových systémů.
- [8] Sekanina, L.: Reprezentace dat. , 2017, slajdy k predmetu INP - Návrh počítačových systémů.
- [9] Tišnovský, P.: Fixed point arithmetic [online].
<http://www.root.cz/clanky/fixed-point-arithmetic/>, 2006-05-24 [cit. 2017-11-22].
- [10] Tišnovský, P.: Norma IEEE 754 a příbuzní: formáty plovoucí řádové tečky [online].
<https://www.root.cz/clanky/norma-ieee-754-a-pribuzni-formaty-plovouci-radove-tecky/>, 2006-05-31 [cit. 2017-11-22].
- [11] Tišnovský, P.: Aritmetické operace s hodnotami ve formátu plovoucí řádové čárky [online].
<https://www.root.cz/clanky/aritmeticke-operace-s-hodnotami-ve-formatu-plovouci-radove-cariky/>, 2006-06-07 [cit. 2018-01-07].
- [12] Závada, V.: *Simulátor procesoru s operací násobení*. Bakalářská práce, FIT VUT v Brně, 2016.
- [13] Čambor, M.: *Elementární procesor v aritmetice pevné a pohyblivé řádové čárky*. Bakalářská práce, FIT VUT v Brně, 2009.