



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MODELOVÁNÍ STROJŮ V MAPLESIM

MODELING OF MACHINERY IN MAPLESIM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Moravanský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Lukáš Moravanský**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Modelování strojů v MapleSim

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na pokročilé modelování strojních zařízení s využitím nástroje MapleSim. V kontextu průmyslu 4.0 lze mluvit o vytváření tzv. digitálního dvojčete stroje či jeho části. Student se v rámci práce zaměří prioritně na využití softwaru MapleSim v němž vytvoří ukázkový model – digitální dvojče části stroje (dle vlastního výběru).

Cíle bakalářské práce:

Proveďte stručnou rešerši v oblasti modelování strojů.
Proveďte průzkum dostupných nástrojů pro modelování.
Nastudujte práci v softwarovém nástroji MapleSim.
Popište základní postup tvorby modelu stroje v MapleSim.
Realizujte model stroje či strojní části (dle vlastního výběru).
Proveďte zhodnocení výsledků i samotného modelovacího nástroje.

Seznam doporučené literatury:

MAPLESOFT, A DIVISION OF WATERLOO MAPLE INC. MapleSim User's Guide. 2014, 240 s.
ISBN 978-1-926902-32-6. Dostupné také z:
https://www.maplesoft.com/documentation_center/maplesim6/maplesimuserguide.pdf.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na modelování strojních zařízení s využitím nástroje MapleSim. Úvodní část obsahuje stručné nahlédnutí do oblasti digitálních dvojčat v průmyslu 4.0 a přístupy, kterými jsou strojní součásti modelovány. Další části práce se zabývají nástrojem MapleSim. V poslední části je realizováno vlastní digitální dvojče s využitím nástrojů MapleSim a Automation Studio.

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on modelling of machinery using MapleSim. The introductory part provides a brief insight into the field of digital twins in Industry 4.0 and the approaches by which machine components are modelled. Other parts of the thesis focus on the MapleSim tool. In the last part, a custom digital twin is created using MapleSim and Automation Studio tools.

KLÍČOVÁ SLOVA

MapleSim, modelování strojů, digitální dvojče, HIL, nástroje modelování, FMI, Automation Studio

KEYWORDS

MapleSim, machinery modeling, digital twin, HIL, modeling tools, FMI, Automation Studio



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2022

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MORAVANSKÝ, Lukáš. *Modelování strojů v MapleSim*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky, 2022, 81 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Stanislav Lang, PhD.

ACKNOWLEDGEMENTS

„First of all, I would like to thank my supervisor Ing. et Ing. Stanislav Lang, Ph.D for his dedicated help and expert advice. Furthermore, I would like to thank SOMA for making it possible to create a model of a real machine and for providing the CAD model. I would especially like to thank Nathan Van Heyst and his team for providing me with a MapleSim license and valuable advices when working with MapleSim.“

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 20. 5. 2022

.....

Lukáš Moravanský

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	MODELOVÁNÍ STROJŮ	17
2.1	Modelování v kontextu digitálního dvojčete	17
2.1.1	Návrh produktu	18
2.1.2	Prediktivní údržba.....	18
2.2	Zjednodušení modelu	20
2.3	Kauzální a akauzální modelování	22
2.3.1	Kauzální modelování	22
2.3.2	Akauzální modelování	22
2.4	Multidomain modeling	23
2.4.1	Vazební grafy	23
2.4.2	Objektově orientované modelování	24
2.5	Multibody	25
2.6	Subsystemy	27
2.7	Hardware-in-the-loop	28
3	MAPLESIM	31
3.1	Maplesoft	31
3.2	Maple	32
3.3	Obecné informace	32
3.3.1	Systémové požadavky	32
3.4	Symbolické řešení rovnic	34
3.5	Modelovací jazyk Modelica	34
3.6	Popis uživatelského prostředí	36
3.7	Knihovny	42
3.7.1	Signal Blocks	42
3.7.2	Electrical	43
3.7.3	1-D Mechanical	44
3.7.4	Multibody	44
3.8	Toolboxy a konektory	45
3.8.1	CAD Toolbox	45
3.8.2	B&R MapleSim Connector	46
3.8.3	MapleSim Insight	47
3.9	Řešiče.....	48
3.10	Functional Mockup Interface (FMI).....	49
3.11	Galerie a příklady modelů	50
4	DOSTUPNÉ NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ	51
4.1	OpenModelica	51
4.2	Simscape a Simulink	52
4.3	Dymola	53
4.4	Cenové porovnání nástrojů MapleSim a Simscape	54
5	ZÁKLADNÍ POSTUP PŘI TVORBĚ MODELU V MAPLESIMU.....	55
5.1	Úprava CAD Modelu.....	56
5.2	Propojení CAD komponent v MapleSim.....	56
5.3	Hydraulická soustava.....	57
5.4	Propojení hydraulické soustavy s multibody soustavou.....	59
5.5	Ovládání ventilů	59

6	VLASTNÍ MODEL	61
6.1	Využití CAD Toolboxu.....	61
6.2	Pohyby modelu	62
6.3	Subsystemy	63
6.4	Snímače	63
6.5	Výměna sleeve.....	64
6.6	FMU blok.....	65
6.7	Sekvence	66
6.8	Řídící program a konfigurace v Automation Studiu	66
6.9	Ovládání simulace v SceneViewer	68
6.10	Zhodnocení a rozšíření.....	68
7	ZÁVĚR.....	69
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	71
9	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	77
10	SEZNAM TABULEK	79
11	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

S rozvíjející se digitalizací díky Průmyslu 4.0 je tvorba digitálních dvojčat pro společnosti stále častějším tématem. Jako analytický nástroj přináší spoustu benefitů v oblasti životnosti výrobku a jeho doby uvedení na trh. Při vývoji nových produktů výrazně sníží dopad nedostatku materiálu a jiných ekonomických problémů. Předložená bakalářská práce tyto benefity více rozebírá v kapitole zabývající se využitím digitálního dvojčete v Průmyslu 4.0.

Pro tvorbu digitálních dvojčat je dostupných mnoho nástrojů. V současnosti ale bývá nezbytné, aby tyto nástroje z různých oblastí byly schopny zpracovávat model, který je tvořen napříč těmito platformami. Předložená bakalářská práce je zaměřena na tvorbu digitálního dvojčete v nástroji MapleSim a díky standartu FMI byl v rámci zadaného tématu vyvinut model s využitím dvou platforem – MapleSim a Automation Studio.

U úvodní části je digitální dvojče zasazeno do kontextu Průmyslu 4.0. Dále jsou uvedeny nejčastější přístupy pro modelování strojů. Na tyto přístupy je dále v práci často odkazováno v souvislosti s popisem nástroje MapleSim nebo realizací vlastních modelů. V práci je také proveden průzkum dostupných nástrojů, které využívají stejných přístupů modelování jako MapleSim.

Hlavním důvodem výběru nástroje MapleSim byla jeho kompatibilita s Automation Studií od společnosti B&R Automation. Cílem bylo prozkoumat možnosti, které nabízí spojení těchto dvou nástrojů. Vytvořený model v nástroji MapleSim má tedy sloužit jako platforma pro vývoj řídicího programu snižující potřebu testování vyvíjeného programu na reálném stroji. Může tak přinést benefity v časové oblasti vývoje řídicího programu.

Vytvořený model slouží pouze jako ukázka tvorby digitálního dvojčete s využitím různých přístupů a nebude využitý pro komerční účely.

2 MODELOVÁNÍ STROJŮ

Modelování je proces vytváření modelu. Model lze chápat jako znázornění konstrukce a fungování předloženého systému. Model je systému podobný, ale je jeho zjednodušenou reprezentací. Při procesu modelování by mělo být snahou vytvořit blízkou aproximaci skutečného systému a zahrnout podstatné vlastnosti pro výsledný model tak, aby nebyl zbytečně komplexní [1].

Tvorba modelu je často spojena s požadavkem na operování s výsledným modelem. Tímto procesem je simulace. U modelu lze měnit jeho parametry a experimentovat s ním, což může být u reprezentovaného systému nemožné nebo příliš nákladné a nepraktické [1]. Budeme-li za reprezentovaný systém považovat stroj nebo strojní součást, můžeme v simulaci experimentovat se vstupními parametry (např. otáčky motoru) a nebo sledovat změnu vlastností daného systému (např. vibrace).

Následující podkapitoly pojednávají o metodách a přístupech, které se při vytváření dynamických modelů strojů využívají.

2.1 Modelování v kontextu digitálního dvojčete

Koncept digitálního dvojčete poprvé v roce 2003 prezentoval Michael Grieves na Michiganské univerzitě jako „digitální ekvivalent fyzického produktu“. NASA, která jako první definovala pojem *digitální dvojče*, využívala tento koncept již v minulém století při práci na projektu Apollo. Nadále jej využívá v oblasti kosmonautiky a letectví [2].

Z průzkumu analytické společnosti Gartner provedeného v roce 2019 vyplývá, že 75 % organizací implementujících internet věcí (Internet of Things - IoT) již využívalo nebo plánovalo využívat digitální dvojčata do jednoho roku. Oproti minulým průzkumům bylo zjevné, že digitální dvojčata vstupují do hlavního proudu použití. Virtuální modely výrobků mohou zkrátit dobu uvedení na trh a přinést výhody v oblasti životního cyklu strojů a výrobků [3; 4].

V současnosti lze pojem *digitální dvojče* chápat jako virtuální reprezentaci fyzických objektů, systémů, ale také procesů interagující s okolím v reálném světě. Při vztažení této definice konkrétně na fyzikální modelování strojů v průmyslu, může být digitální dvojče využito pro prediktivní udržování strojů nebo pro vývoj nového zařízení [2; 5].

2.1.1 Návrh produktu

Vývoj nového produktu v dřívější době často zahrnoval vytvoření reálného prototypu, na kterém pak mohlo probíhat testování klíčových vlastností. Digitální dvojče přináší benefity v oblasti ekonomické i časové. Sestavení a následné iterativní upravování fyzického modelu může být nákladné a časově náročné. V dnešní době jsou dostupné výkonné nástroje, které umožní vývojáři sestavit digitální model, na kterém může požadované vlastnosti testovat. Vývojář může například sledovat fyzikální vlastnosti produktu, životnost, a nebo odhalit potenciální problémy [2].

Digitální dvojče nepřináší výhody jen při návrhu konstrukce, ale taky při návrhu řízení. Programátor nemusí vyvíjený program testovat na fyzickém stroji, ale na digitálním dvojčeti. Vývoj řízení na digitálním dvojčeti také snižuje potenciální riziko poškození stroje. V kapitole 2.7 je popsán příklad testování řídicí jednotky na digitálním modelu [6].

2.1.2 Prediktivní údržba

Pro prediktivní údržbu jsou používány tři nejvýznamnější metody – statistika spolehlivosti, metoda založená na fyzikálním modelu a metoda založená na datech [5].

Při využití statistické metody se pro predikci poruch využívají historická data o závadách. Data jsou obsažena v hustotě rozdělení pravděpodobnosti a pro předpověď poruch se využívá např. Weibullovo rozdělení, Bayesova metoda atd. Tato metoda je vhodná pro velkosériovou výrobu, naopak nevhodná je pro výrobu drahých zařízení, která se skládají z velkého množství dílů (např. letadla, kosmické lodě, CNCMT apod.) [5].

Pro předpověď poruchy s využitím statistické metody není brána v úvahu složitost provozního prostředí nebo degradace výkonu zařízení. Tyto okolnosti ale zohledňuje druhá metoda, u které je vytvořen fyzikálně-matematický model. Tento přístup dokáže odhalit logiku poruch bez využití velkého množství dat. K vývoji je ale potřeba odborná znalost vývojáře v oblastech fyziky, mechaniky apod. a i přesto je obtížné vytvořit přesný model degradace [5].

Další metoda řízená daty nepotřebuje přesný fyzikální model. Využívá umělou neuronovou síť pro analýzu velkých dat (big data). Degradace systému je určena z historických dat. Pro získání co nejlepších výsledků je na za zařízení instalováno mnoho senzorů pro sběr co nejvíce dat. Na některé klíčové části ale nelze nainstalovat senzory, což může komplikovat analýzu [5].

Jednotlivé metody mají své nedostatky, ovšem s rozvojem technologií byla vytvořena hybridní metoda. Ta spojuje výhody fyzikálního modelu a metody řízené velkými daty. Díky digitálnímu dvojčeti založeném na této hybridní metodě lze získat přesnější vnitřní stav libovolné části systému bez nutnosti použití většího množství senzorů. Kromě toho lze provádět na digitálním dvojčeti experimenty za extrémních podmínek, které by byly na fyzickém zařízení těžko proveditelné a nákladné [5].

Příklad digitálního dvojčete pro CNC

CNC obráběcí stroje jsou důležitou součástí Průmyslu 4.0. mohou tak posloužit jako příklad pro zakomponování digitálního dvojčete do inteligentní výroby (smart manufacturing) mezi IoT, big data, data mining a strojové učení.

Příkladové CNC disponuje nepravidelnými poruchami. Pokud se tyto závady neodstraní v čas, bude ovlivněna přesnost výroby. „Tradiční“ metoda diagnostiky poruch může být nestabilní a nákladná, protože je závislá na zkušenostech odborníků. S řešením tohoto problému pomůže inteligentní digitální dvojče. Potenciálním místem, kde může dojít k poruše, je kuličkový šroub CNC stroje. Ten přenáší sílu z motoru a ovlivňuje přesnost obrábění [7].

Pro digitální reprezentaci skutečného systému je v modelovacím nástroji (např. MapleSim) vytvořen multidoménový model, který je sestaven z podsystémů (vřeteno, posuvný systém atd.). Pro sestavení přesnější fyzikálního modelu pomůže nástroj využívající metodu konečných prvků (např. ANSYS). K dosažení vyšší přesnosti modelu jsou také prováděny experimenty na skutečném CNC stroji. Data ze snímačů naměřená na skutečném stroji jsou porovnávána s daty ze simulace a model je iterativně upravován, dokud není odchylka mezi těmito výsledky dostatečně malá. Je neefektivní snažit se vytvořit dokonale přesný model skutečného stroje, který by spotřeboval velké množství energie a času simulace. Proto je vhodné s ohledem na účel model zjednodušit (viz kapitola 1.2) [5].

Na kuličkový stroj jsou umístěny snímače teploty a vibrací. Data jsou ukládána do databáze a zpracovávána systémem využívající umělou inteligenci. Databáze je doplněna o hodnoty z vytvořeného modelu, které na reálném CNC stroji nelze naměřit. Díky umělé inteligenci je včas odhalen blížící se porucha kuličkového šroubu [5; 7].

2.2 Zjednodušení modelu

Za hlavní součást modelování a simulace je považováno zjednodušení modelovaného systému. Jde o snahu nalezení té správné podmnožiny charakteristik nebo vlastností systému, která je dostatečná pro splnění požadované studie. Cílem je navrhnout model, který by nebyl zjednodušený natolik, že by se stal triviálním, ale zároveň neobsahoval mnoho nadbytečných podrobností. Sestavení a fungování modelu by se pak mohlo stát nepraktické a nákladné. [8].

Zjednodušení modelu ovlivňuje jeho snadné použití, flexibilitu, vizualizaci a rychlost simulace. Zjednodušený model usnadňuje vývoj a údržbu, což může přinést benefity i z ekonomického hlediska. Uživateli, který model analyzuje a experimentuje s ním, poskytuje lepší přehlednost o funkčnosti systému a model je jednodušší na interpretaci [9]

Role	Úloha	Benefity
Projektový manažer	Řídí proces	<ul style="list-style-type: none"> • Menší náklady • Menší časová náročnost • Menší využití zdrojů • Užitečné při zadávání modelovacích cílů
Vývojář modelu	Vyvíjí model	<ul style="list-style-type: none"> • Potřeba méně vstupních dat • Flexibilnější modelování • Jednodušší vývoj a údržba • Jednodušší odhalení chyb • Zabraňuje zavádění příliš pokročilých řešení
Uživatel modelu	Provádí a analyzuje experimenty	<ul style="list-style-type: none"> • Jednodušší interpretace • Zlepšený vhled do problematiky • Rychlejší experimenty • Lepší přehled o předpokladech

Tab. 1: Výhody jednodušších modelů pro zúčastněné strany [9]

2.3 Kauzální a akauzální modelování

Skutečné konstrukční celky, kterými mohou být např. motory nebo hnací ústrojí, se skládají ze soustavy vzájemně se ovlivňujících fyzikálních komponent. Většina simulačních nástrojů předpokládá, že tyto systémy lze znázornit pomocí blokových schémat, kde je pomocí spojovacích čar naznačeno, že jsou bloky vzájemně propojeny fyzikálními zákony. Tyto bloková schémata mohou být kauzální nebo akauzální. Modelovací nástroj MapleSim umožňuje modelování oběma přístupy [10; 11].

2.3.1 Kauzální modelování

Kauzální modelování lze chápat jako znázornění toku signálu. V blokovém schématu proudí z jednoho bloku do druhého jednosměrný signál, který reprezentuje časově proměnné číslo. V bloku se na vstupním signálu provede přesně definovaná matematická operace a výsledný signál je výstupem bloku [10].

Tento způsob modelování pomocí blokových diagramů se zrodil v 80. letech 20. století. S nástupem levných osobních počítačů bylo umožněno většímu počtu inženýrů vyvíjet dynamické modely systémů pomocí blokových diagramů na vlastních stolních počítačích. Způsob zapojování bloků vychází z předchozích metod simulace na analogových počítačích, kdy byly bloky reprezentovány elektrickými součástkami [12].

Tento přístup založený na toku signálů je pracným procesem, který se za více než 50 let nezměnil. Obyčejné diferenciální rovnice (ODR) musí být před použitím simulačního nástroje odvozeny na základě základních znalostí fyziky a následně přeuspořádány do řady integrálních rovnic. Teprve pak mohou být zadány do blokového schématu v simulačním nástroji [12].

2.3.2 Akauzální modelování

Při modelování situací ze skutečného světa je mnoho reálných systémů akauzálních. Nelze určit, zda proudění způsobuje rozdíl tlaků v trubici, nebo naopak. Kauzalita je uměle vytvořena, protože fyzikální zákony musí být transformovány do vhodného výpočetního popisu [13].

U modelování akauzálních systémů proudí signál mezi propojenými bloky oběma směry. Každý blok obsahuje informace o tom, které fyzikální zákony musí dodržovat, a signál nese informace, které fyzikální veličiny musí být zachovány [10].

Akauzální modelování lépe reprezentuje způsob interakce fyzikálních komponent. Bloková schémata se pak více podobají skutečnému systému, než modely tvořené nástroji využívající kauzální přístup [12].

2.4 Multidomain modeling

Při navrhování součástí v oblasti robotiky, mechatroniky, automobilového nebo i leteckého průmyslu je často potřeba vytvořit model s komponentami z různých oblastí (domén). Jedná se například o oblast hydrauliky, elektroniky, pneumatiky, mechaniky atd. V modelovaném systému může nastat situace, kdy jedna oblast ovlivňuje jinou. Například při vhodných podmínkách existuje vysoká korelace mezi změnou napětí na motoru a vibracemi připojeného mechanického ramene. V takovém případě je potřeba v modelu propojit oblast elektrotechniky a mechaniky. Tento vztah by bylo obtížnější odhalit v případě, že by byly motor a mechanické rameno simulovány v oddělených systémech [14; 12].

Existuje několik přístupů pro fyzikální modelování. V následujících podkapitolách jsou zmíněny dva nejvíce charakteristické přístupy, o kterých se literatura nejčastěji zmiňuje [14].

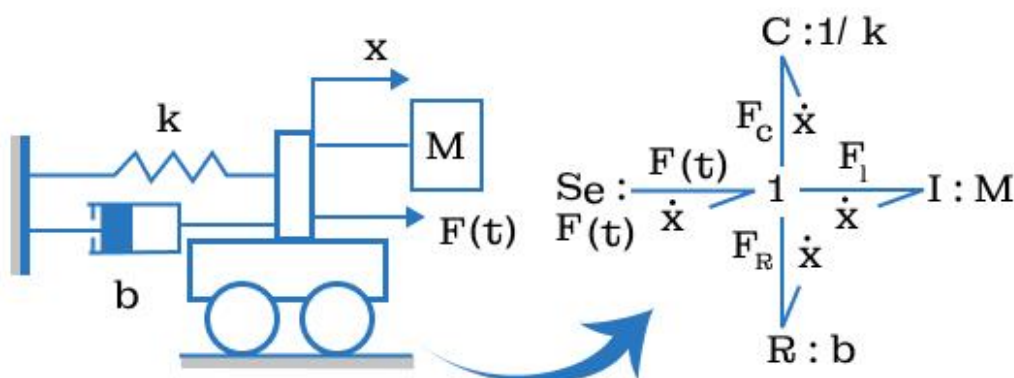
2.4.1 Vazební grafy

Jedná se o jeden z nejčastěji používaných grafických popisů fyzikálních a dynamických systémů, který pomocí vazeb znázorňuje pohyby materiálů nebo energie. Vazební grafy jsou vhodné pro multidoménoovou analýzu. Na základě této analýzy se vytvoří rovnice, které jsou zpracovány simulačním jazykem. Díky tomu, že zachovávají topologickou i výpočetní strukturu, mohou moderní modelovací nástroje automaticky provádět výpočetní strukturu při sestavování modelu [14; 15].

Vazby v těchto grafech jsou reprezentovány *harpunou*. Každá vazba obsahuje dvě proměnné, které se v terminologii grafů značí jako e (úsilí – effort) a f (tok – flow). [14]

Každý diagram obsahuje uzly:

- Typu I - proměnné úsilí jsou stejné, zatímco součet proměnných toku je roven nule.
- Typu O - proměnné toku jsou stejné, zatímco součet proměnných e je roven nule.



Obr. 1: Schéma převedené na vazební graf dle akademické práce [16]

2.4.2 Objektově orientované modelování

U objektově orientovaného (zkratka OO – object oriented) modelování je systém rozložen do tzv. objektů. Pod těmito objekty si lze představit entity z reálného světa, např. převodovku, spojku apod. Objekty mohou také reprezentovat nefyzické entity jako jsou například smlouva, licence nebo povolení. Každý objekt obsahuje data, sadu atributů a operací, které může objekt provádět. Jednotlivé objekty mají jméno a specifické hodnoty svých atributů [17].

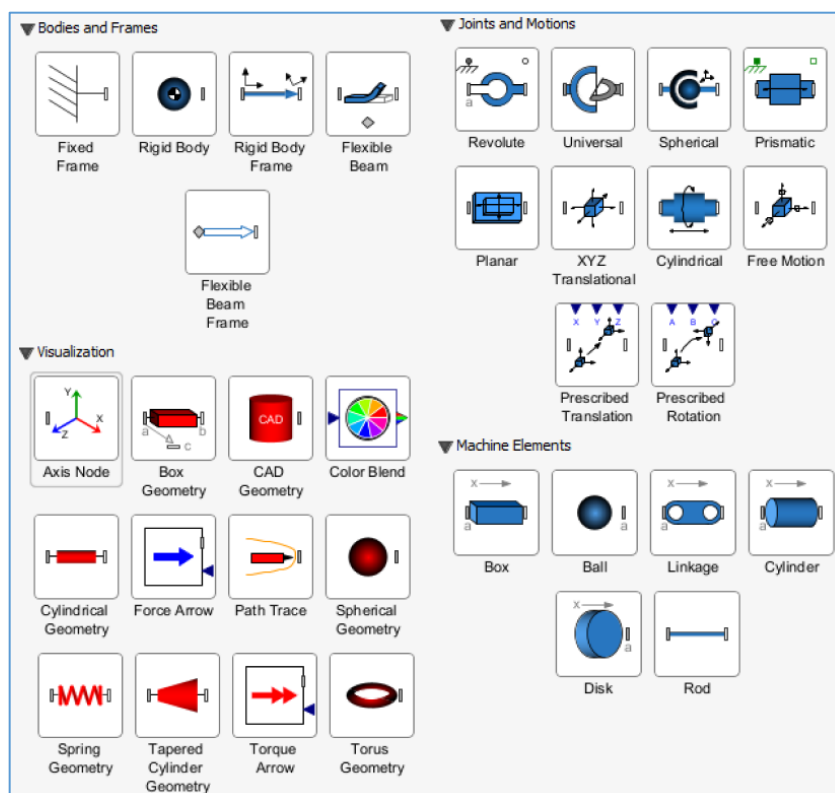
Skupiny objektů, které mají společné atributy a vlastnosti, jsou nazývány třídy. Vztahy mezi dvěma nebo více třídami se nazývají *asociace*. Důležitou metodou vytváření tříd je dědičnost, kdy dojde k vytvoření nové třídy pomocí již definované třídy. Nová třída přebírá, tzv. dědí atributy a chování již existující třídy označované jako *předek* [13; 17].

V literaturách a článcích zabývajících se OO modelováním je často používán jazyk Modelica (viz. kapitola 3.5). Simulační nástroje založené na tomto modelovacím jazyku poskytují knihovny obsahující komponenty z různých domén. Tyto komponenty jsou během modelování propojeny tak, aby vznikla požadovaná kompozice, která je pak simulačním systémem automaticky transformována do spustitelného simulačního kódu [18].

2.5 Multibody

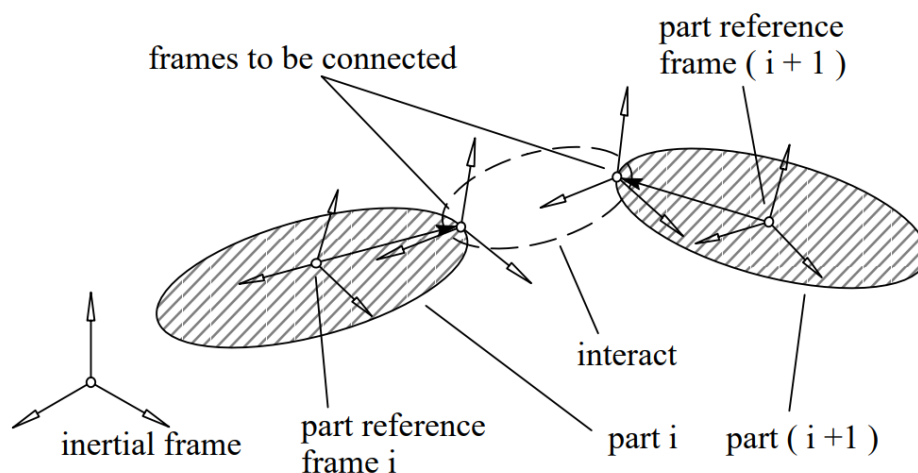
V minulosti se klasická mechanika a systémy tuhých těles vyznačovaly značným omezením komplexnosti modelu. Složitější dynamické úlohy spolu s neefektivními numerickými metodami řešení diferenciálních rovnic se mnohdy stávaly nepřekonatelné. Díky požadavkům na složitější modely družic a rychlému vývoji výkonnějších počítačů vzniklo odvětví mechaniky: dynamika soustavy s více tělesy (*multibody system dynamics*). Výzkum v oblasti dynamiky soustavy více těles vycházel z klasické mechaniky. Vyvinuly se nové metody modelování s ohledem na reakční síly, točivé momenty, propojení CAD modelů, animace a na předběžné zpracování pomocí datových modelů [19].

Multibody systém zahrnuje sadu prvků, jako jsou klouby, podpěry, pružiny a tlumiče, tuhá tělesa a silové nebo polohové aktuátory. Tato sada prvků je dostupná v knihovnách daných modelovacích nástrojů. Při modelování se připouští libovolná topologie (stromová, řetězová a uzavřené smyčky) [19].



Obr. 2: Ukázka Multibody knihovny v nástroji MapleSim

Základ multibody systému tvoří třídy součástí a interakcí (viz. obrázek 3). Součást popisuje tuhé těleso, které může být popsáno hmotností, těžištěm a momentem setrvačnosti. Tato třída musí být charakterizována alespoň jedním pevným rámem tělesa. Interakce popisuje vztah mezi součástmi a může být realizována kloubem, akčním členem nebo senzorem [19].



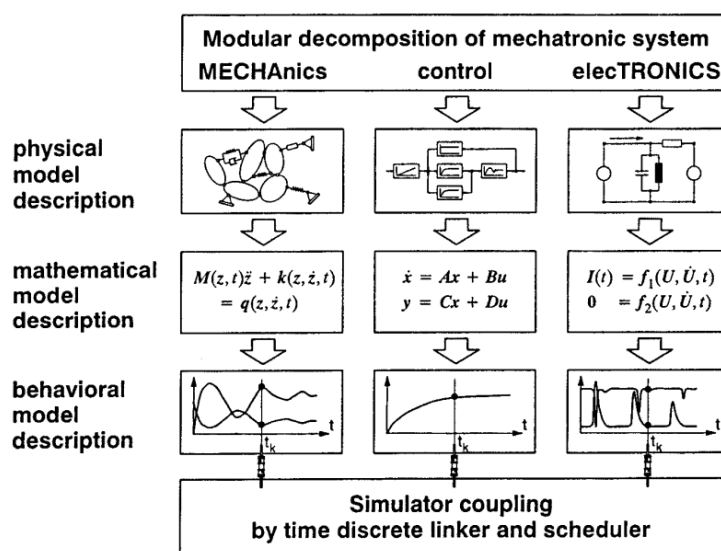
Obr. 3: Multibody systém reprezentován datamodelem [19]

Modelování strojů v simulačních nástrojích často vychází z CAD modelů. Současné simulační nástroje často umožňují importování CAD modelů pomocí softwarových balíčků. To může značně zjednodušit pracovní postup modelování a eliminovat potenciální chyby, které by mohly při ručním vytváření dynamického systému nastat. Importovaný model se pak sestavuje jako multibody systém a jednotlivé součásti modelu obsahují informace o hmotnosti, momentu setrvačnosti apod [20].

2.6 Subsystémy

Při modelování složitějších systémů (např. vysoce přesný obráběcí stroj) se využívá modelování komponent z mnoha různých oblastí (viz kapitola 2.4). Pro usnadnění modelování je potřeba globální systém rozložit do tzv. subsystémů (v české literatuře se též vyskytuje pojem podsystém). Při použití tohoto přístupu vyplyne několik výhod. Subsystémy mohou být modelovány nezávisle na sobě různými odborníky z oblastí, kterých se subsystém týká. Často lze pro vývoj subsystémů použít různé softwarové nástroje. Je tedy důležité, aby měl každý subsystém definované své rozhraní [21].

Pro provedení celkové globální simulace musí být subsystémy propojeny. Toho lze dosáhnout na třech různých úrovních popisu modelu. Obrázek níže znázorňuje takový popis pro mechatronický systém [21].



Obr. 4: modulární modelování a simulace mechatronického systému [21]

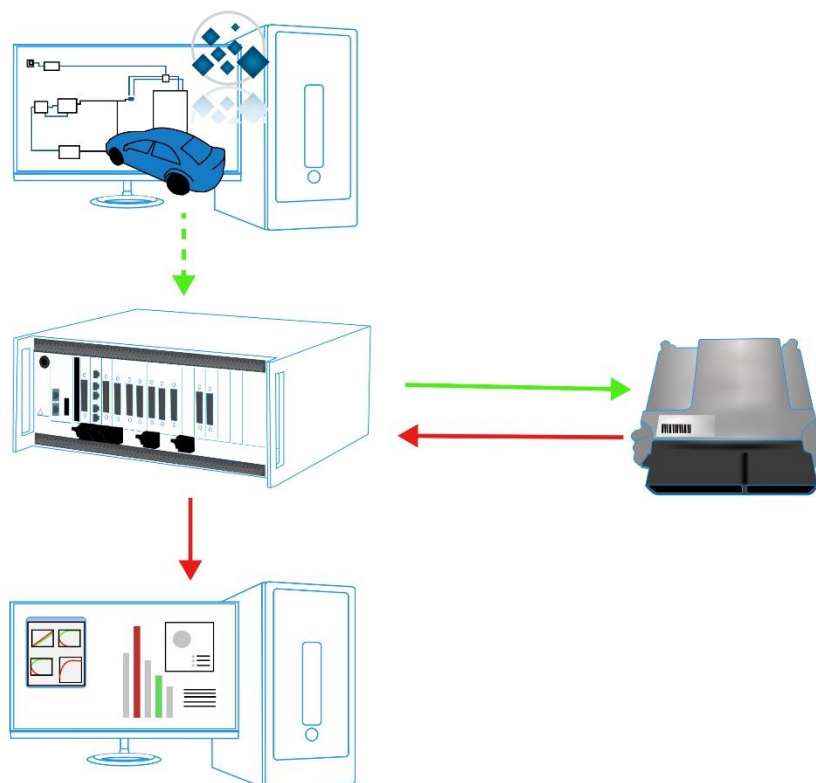
Fyzikální popis subsystémů mechatronického systému je vytvořen modelováním multibody (viz. kapitola 2.5). Matematický popis subsystémů je reprezentován pomocí rovnic. Výsledky simulace matematických modelů, jako jsou trajektorie rychlosti a polohy těles, je popsáno chování modelu na třetí úrovni [21].

2.7 Hardware-in-the-loop

Simulace hardwaru ve smyčce (Hardware-in-the-loop, HIL nebo HWIL) je technika, která se používá při testování a vývoji složitých systémů. V kontextu vývoje strojů to znamená, že řídicí systém je propojen s virtuálním strojem nebo reálným zařízením pomocí sběrnice. Simulační systém tedy vyhodnocuje chování stroje, poskytuje důležité údaje o stroji pro řízení a navíc protokoluje vnitřní stavové veličiny pro diagnostiku. Dále umožňuje testovat chování systémů za složitých podmínek, které se v terénu vyskytují jen zřídka. Hlavním benefitem je možnost testování řídicích systémů bez nutnosti použití reálného stroje nebo zařízení [22; 23].

Aplikace HIL simulací jsou rozšířené do mnoha oborů. První aplikace HIL se objevily v leteckém průmyslu, kde piloti podstupovali výcvik na simulaci v hardwaru kokpitu, aniž by nesli rizika spojená s létáním. V automobilovém průmyslu se HIL využívalo pro vývoj protiblokovacích brzdových systémů, řízení trakce a elektronických řídicích jednotek. Další využití nalézá simulace HIL v oblasti energetiky a robotiky [24].

Pro simulace HIL je důležitý výpočetní výkon. Nástroj MapleSim je vhodný pro vývoj HIL simulací díky zjednodušování generovaných rovnic modelu a zároveň zachování jeho věrnosti (viz kapitola 3.4). Jako příklad lze uvést použití MapleSimu při vývoji vozidla Chevrolet Equinox. Jednalo se o multibody model celého vozidla včetně pneumatik s 22 stupni volnosti a 26 proměnných stavového prostoru. Model byl exportován do simulátoru dSpace s menším výkonem (PowerPC 1GHz) a dosáhl rychlosti aktualizace 63 μ s, což bylo šestnáctkrát rychlejší než u ostatních populárních nástrojů [12].



Obr. 5: Příklad HIL testování jednotky ECU

Na obrázku 5 je zjednodušeně znázorněn příklad HIL testování elektronické řídicí jednotky ECU (Electronic Control Unit). V modelovacím nástroji MapleSim je vytvořen model systému, který je exportován v jazyce C. Model je importován do simulačního hardwaru, ke kterému je pomocí sběrnice připojena ECU. Na hardwaru je simulováno chování modelu v reálném čase a ECU interaguje s modelem pomocí definovaných vstupů a výstupů. Hardware ukládá data ze simulace a umožňuje „real-time“ analýzu.

3 MAPLESIM

MapleSim je nástroj od společnosti Maplesoft umožňující modelování a simulaci „vícedoménových“ systémů. Pro tvorbu modelu může být použito kauzálního i akauzálního přístupu – fyzikální systém vytvořený akauzálním přístupem může být ovládán řídicí logikou vytvořenou kauzálním přístupem, jak je ukázáno v kapitole 5.

Následující podkapitoly popisují tento nástroj. Zařazeno je i téma FMI standartu, které je významné pro tvorbu digitálních dvojčat s využitím více platforem.

3.1 Maplesoft

Společnost Maplesoft byla založena 1988 a vzešla z pokročilého výzkumného projektu na univerzitě v kanadském Waterloo na počátku 80. let. Původní název společnosti Waterloo Maple bylo březnu roku 2003 změněn na současný název Maplesoft, což bylo odrazem oblíbenosti a používání tohoto názvu v rámci zákaznické komunity. Název Waterloo Maple Inc. zůstal právním názvem společnosti a Maplesoft stal její divizí [25; 26].

V roce 2009 byla společnost Maplesoft odkoupena společností Cybernet Systems Co., Ltd. Současně společnost Maplesoft sídlí v kanadském Waterloo. Produkty a služby společnosti Maplesoft využívá více než 8000 vzdělávacích institucí, výzkumných laboratoří a společností z více než 90 zemí [27; 28].

3.2 Maple

Maple je matematický nástroj umožňující počítat matematické výpočty v numerické i symbolické podobě. Díky rozsáhlým funkcím tohoto nástroje je využíván v mnoha oblastech. Například zápisová technika Clickable Math umožňuje zápis a zobrazení matematických výrazů ve tvaru, v jakém by je uživatel zapsal na papír. Tato funkce nalezne své využití hlavně školním prostředím. Dále disponuje mnoha dalšími funkcemi, které využívají výzkumníci a vývojáři v mnoha dalších oblastech. Maple umožňuje exportovat zapsané matematické problémy do PDF i LaTeX.

Projekt Maple vznikl v roce 1980. Systémy pro provádění symbolické matematiky v tomto období vyžadovaly mnoho megabytů paměti RAM a rozsáhlý čas CPU pro provádění běžných výpočtů. Cílem projektů bylo vyvinout systém počítačové algebry, který by byl přístupný většímu počtu výzkumných pracovníků a studentům [29].

MapleSim využívá Maple jako výpočetní prostředek k řešení diferenciálně-algebraických rovnic (DAE). Ke spuštění a používání nástroje MapleSim je tedy potřeba mít nainstalovaný nástroj Maple. Díky kombinaci symbolických a numerických technik umožňuje Maple řešit problémy, pro které by nestačilo použít pouze jeden těchto přístupů [30].

3.3 Obecné informace

První verze nástroje MapleSim byla vydána v prosinci roku 2008. Nástroj byl během let aktualizován a Maplesoft vydával nové verze. Po verzi *MapleSim 7* začal Maplesoft pojmenovávat verze podle roku, ve kterém byla verze vydána. Následovala tedy verze *MapleSim 2015*. Společnost nástroj a jeho doplňky neustále vyvíjí a v současnosti je dostupná verze *MapleSim 2021*.

3.3.1 Systémové požadavky

V této podkapitole jsou shromážděny systémové nároky pro MapleSim. Pro spuštění MapleSim je vyžadována licencovaná kopie Maple. Maple i MapleSim mají stejné systémové požadavky.

Maple 2022 a MapleSim 2021:

Verze	CPU	RAM	Hard Disk
Windows Server 2016, 2019	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
Windows 10	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
Windows 11	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
<ul style="list-style-type: none"> Doporučuje se 16bitové barevné rozlišení 1024 × 768 (nebo větší) Povoleno připojení TCP/IP povoleno 			

Tab. 2: Systémové požadavky MapleSim pro Windows (64 bit) [31]

Operační systém	CPU	RAM	Hard Disk
Red Hat Enterprise Linux 7, 8	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
SUSE Linux Enterprise Desktop 15	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
Ubuntu 20.04 LTS, 21.10	1.4 gigahertz (GHz) nebo rychlejší 64-bit (x64)	4 GB	10 GB
<ul style="list-style-type: none"> Doporučuje se 16bitové barevné rozlišení 1024 × 768 (nebo větší) X11 R6 Povoleno připojení TCP/IP povoleno 			

Tab. 3: Systémové požadavky MapleSim pro Linux (64 bit) [31]

Operační systém	CPU	RAM	Hard Disk
macOS 12, 11, 10.15	64-bit, Intel	4 GB	10 GB
macOS 12, 11	Apple M1	4 GB	10 GB
<ul style="list-style-type: none"> Doporučuje se 16bitové barevné rozlišení 1024 × 768 (nebo větší) Povoleno připojení TCP/IP povoleno Rosetta 2 je vyžadována pro Mac s Apple silicon 			

Tab. 4: Systémové požadavky MapleSim pro Mac [31]

3.4 Symbolické řešení rovnic

Jednou z hlavních výhod MapleSimu je zjednodušení generovaných rovnic pomocí symbolických technik. Díky této funkci se MapleSim stal na trhu jedinečným a pro vývojáře modelů byla tato vlastnost zásadní při výběru modelovacího nástroje. Generované symbolické rovnice lze využít jak pro symbolickou, tak pro numerickou analýzu úlohy [12; 32; 33].

Zjednodušující metody aplikované na vygenerované rovnice zahrnují redukci indexů, diferenciální eliminaci, oddělení nezávislých systémů a eliminaci redundantních systémů. Symbolické řešení algebraických smyček a snížení složitosti diferenciálně-algebraických rovnic (DAE) dělá mnoho dříve neřešitelných problémů numericky řešitelnými [12].

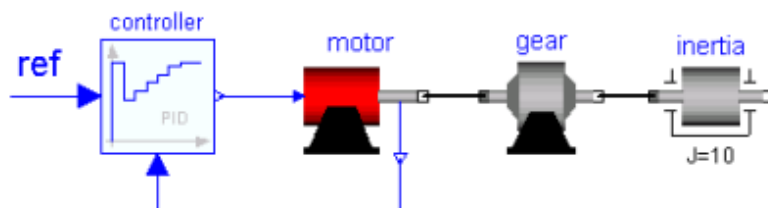
Numerickým řešičům (tzv. *solvery*, viz kapitola 3.9) jsou rovnice poskytovány ve výpočetně efektivní podobě, což zkracuje dobu simulace v některých případech až o několik řádů. Tato vlastnost je důležitá u opakovaných optimalizačních běhů a složitých simulací v reálném čase včetně HIL (viz kapitola 2.7). MapleSim tak umožní vyvíjet přesnější modely při zachování výkonu simulace [12].

3.5 Modelovací jazyk Modelica

Modelovací jazyk Modelica umožňuje multidoménové objektově orientované modelování kyberneticko-fyzikálních systémů. Předchůdce jazyku Modelica byl jazyk Dymola, který navrhl Hilding Elmqvist v rámci své disertační práce. Cílem modelovacího jazyka Dymola bylo umožnit tvůrcům modelů nahlížet na modelování z fyzikální perspektivy namísto matematické. Po jazyku Dymola byla vyvinuta řada dalších modelovacích nástrojů (např. Omola), ovšem modely vytvořené těmito jazyky nemohly být používány jiným nástrojem. Cílem jazyku Modelica bylo sjednotit roztržštěnost těchto modelovacích jazyků [34].

Jazyk Modelica i základní knihovna jsou standardizovány a modely i knihovny komponent jsou přenositelné mezi různými nástroji. Mezi nástroje, které využívají tento jazyk se řadí právě MapleSim.

Modely v tomto jazyce jsou popsány diferenciálními, algebraickými a diskrétními rovnicemi. Modely standardních komponent jsou obvykle k dispozici v modelových knihovnách. Sestavení modelu může být provedeno pomocí grafického editoru. Příklad jednoduchého systému je znázorněn na obr. 6. Níže je zobrazena textová reprezentace tohoto modelu. Například komponenta *gear* z modelové třídy *Gear* nastavuje velikost převodového poměru n na hodnotu *100* (v kódu podbarveno šedou barvou). [35]



Obr. 6: Jednoduchý systém vytvořen jazyku Modelica [35]

Ukázka textového zápisu modelovaného systému na obr. 6 [35]:

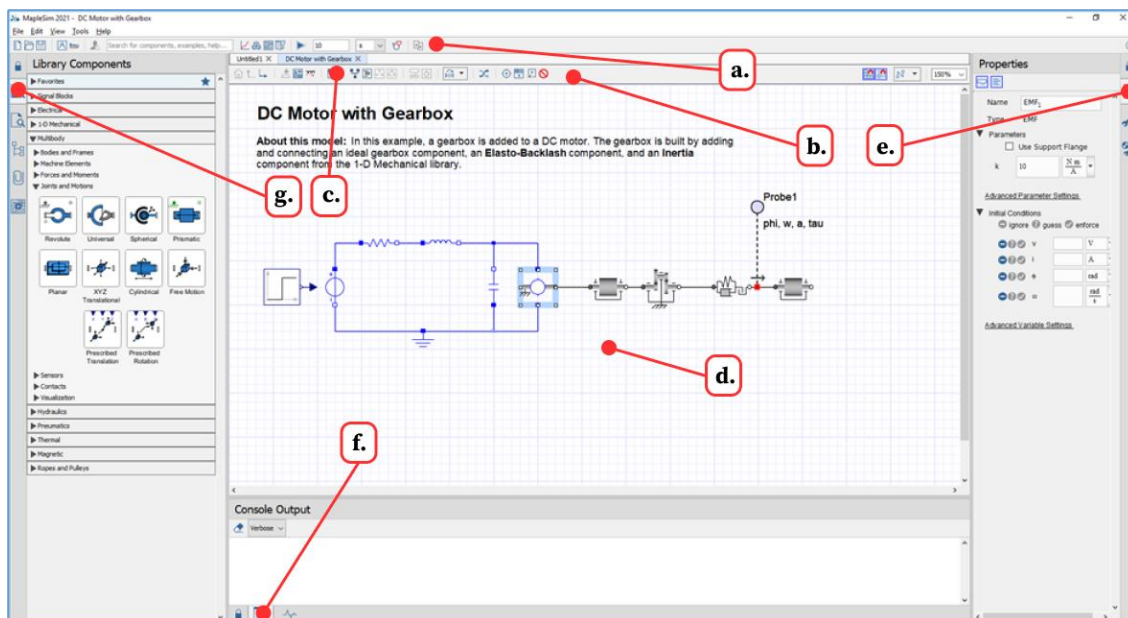
```

model MotorDrive
  PID          controller;
  Motor         motor;
  Gearbox      gear      (n=100);
  Inertia       inertia   (J=10);
equation
  connect(controller.outPort, motor.inPort);
  connect(controller.inPort2, motor.outPort);
  connect(gear.flange_a , motor.flange_b);
  connect(gear.flange_b , inertia.flange_a);
end MotorDrive;

```

3.6 Popis uživatelského prostředí

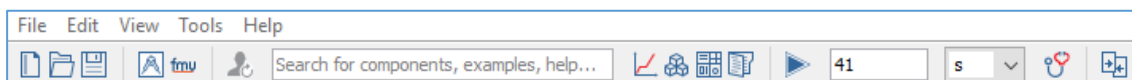
Následující popis uživatelského prostředí vychází z uživatelské příručky [10] a některá vysvětlení jsou odsud částečně přebrána.



Obr. 7: Uživatelské prostředí nástroje MapleSim

a. Hlavní panel nástrojů

Hlavní nabídka (*Main Toolbar*) obsahuje kromě ikon pro vytvoření, otevření a uložení souboru i ikony pro importování souborů (CAD, FMU) a ikony, kterými se uživatel dostane do okna pro analýzu (*Analysis Window*). Také obsahuje vyhledávací pole (*searchbox*), které po zadání klíčových slov prohledává knihovny, ukázky modelů a nápovědu. V hlavním panelu nástrojů lze nastavit dobu trvání simulace.



Obr. 8: Hlavní panel nástrojů

b. Model Workspace Toolbar

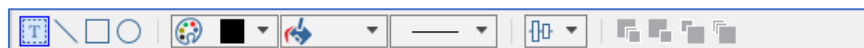
Panel nástrojů pracovní plochy obsahuje funkce pro práci s hierarchií subsystémů jako je úprava kódu nebo nastavení ikony subsystému. Také se zde nachází funkce *Attach probe*, která umožňuje do modelu připojit „sondu“. Tato sonda zaznamenává hodnoty sledovaných veličin a po provedení simulace vykreslí průběhy sledovaných veličin do grafů.



Obr. 9: Model Workspace Toolbar

c. Annotation Toolbar

Tento panel obsahuje nástroje pro popisování modelu. Nástrojem pro přidání textu (vpravo) uživatel vkládá textové pole. Další nástroje slouží pro tvorbu jednoduchých obrázků a úpravu jejich zobrazení (vybarvení, přechody, vkládání obrázků).



Obr. 10: Annotation Toolbar

d. Workspace

Workspace je prostor, ve kterém uživatel modeluje systém tvořením blokového diagramu. Maplesim umožňuje „drag and drop“, takže uživatel přetahuje komponenty přímo z knihovny a vkládá je do pracovního prostoru. Kromě vytváření diagramu může uživatel do pracovního pole vkládat textová pole a kreslit náčrty pomocí nástrojů z panelu *Annotation toolbar*.

e. Panel parametrů

Tento panel se skládá ze tří karet:

- **Vlastnosti (Properties)**

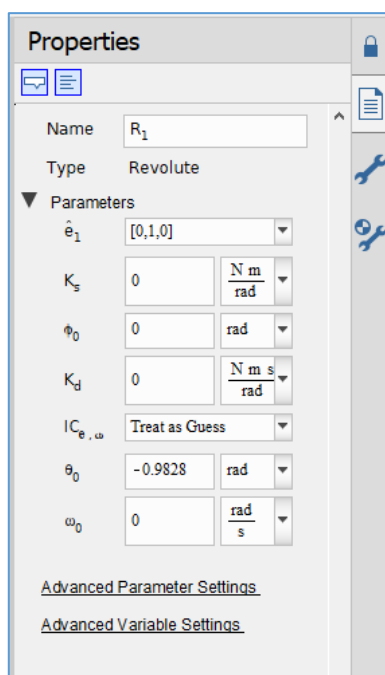
V kartě *Properties* jsou k zobrazení vlastnosti komponent modelu, jako jsou názvy, hodnoty parametrů a počáteční podmínky. Uživatel zde může tyto vlastnosti upravovat.

- **Nastavení simulace (Simulation Settings)**

V kartě *Simulation Settings* se nachází základní nastavení simulace, jako je doba jejího trvání nebo typ řešiče (viz kapitola 3.9), ale i pokročilé nastavení (čas začátku simulace, step-size atd.).

- **Multibody nastavení**

V *Multibody Settings* kartě si uživatel může nastavit zobrazení pro multibody komponenty v 3D-Workspace a v 3D-playback oknu. Také se zde nastavuje směr a velikost gravitace.



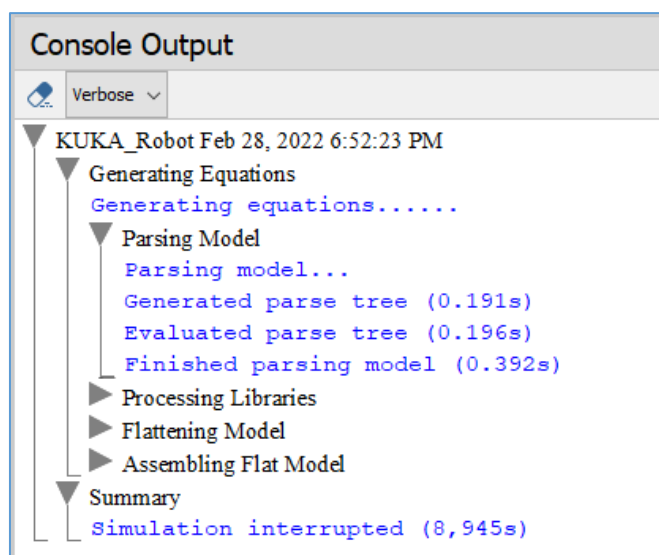
Obr. 11:Nastavení Multibody

f. Konzole

Konzole se skládá ze dvou záložek:

- **Výstup konzole (Console Output)**

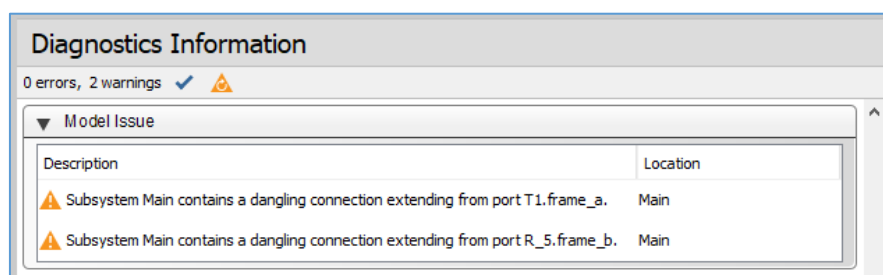
Zde se zobrazují zprávy o stavu enginu MapleSimu při generování matematického modelu. Jednotlivé kroky simulace jsou sbaleny ve vlastních sekcích, které obsahují zprávy o provedených krocích (viz. obr. 12). Zprávy ze záložky *Console Output* mohou pomoci při odstraňování chyb simulace.



Obr. 12: Konzole

- **Informace o diagnostice (Diagnostics Information)**

Zde se zobrazují diagnostické zprávy pro ladění během sestavování modelu. Tyto zprávy mohou pomoci při sestavování modelu, jako jsou nepropojené subsystémy a komponenty. Pokud se taková zpráva vyskytne, jejím obsahem je stručně popsán problém a odkaz na subsystém, ve kterém se problém nachází (viz obr. 13).



Obr. 13: Okno s informacemi o diagnostice

g. Panel palet (Palettes Pane)

Panel obsahuje pět karet, které využívá při sestavování projektu v MapleSimu.

- **Komponenty knihoven (Library Components)**

Karta knihoven je rozdělená do palet, které reprezentují specifickou oblast (doménu) modelování. Tyto palety obsahují předem vytvořené komponenty dané oblasti, které

může uživatel při modelování využít. Komponenty mohou být přetaženy do pracovního prostoru přetáhnutím (drag and drop). Jednotlivým knihovnám je věnována kapitola 3.7.

- **Místní komponenty (Local Components)**

V této kartě se nachází vlastní komponenty a subsystémy modelu. Vlastní komponenty si může uživatel vytvořit přímo v MapleSimu v paletě *Add Apps or Templates*. Uživatel zde popíše komponentu diferenciálními rovnicemi, určí počáteční podmínky a definuje vstupní a výstupní porty. Při vytváření vlastních součástí pomocí vlastních rovnic je možné využít všechny funkce, kterými disponuje Maple. Vlastní komponenta může být vytvořena pomocí kódu v jazyku Modelica (viz. kapitola 3.5).

- **Strom modelu (Model Tree)**

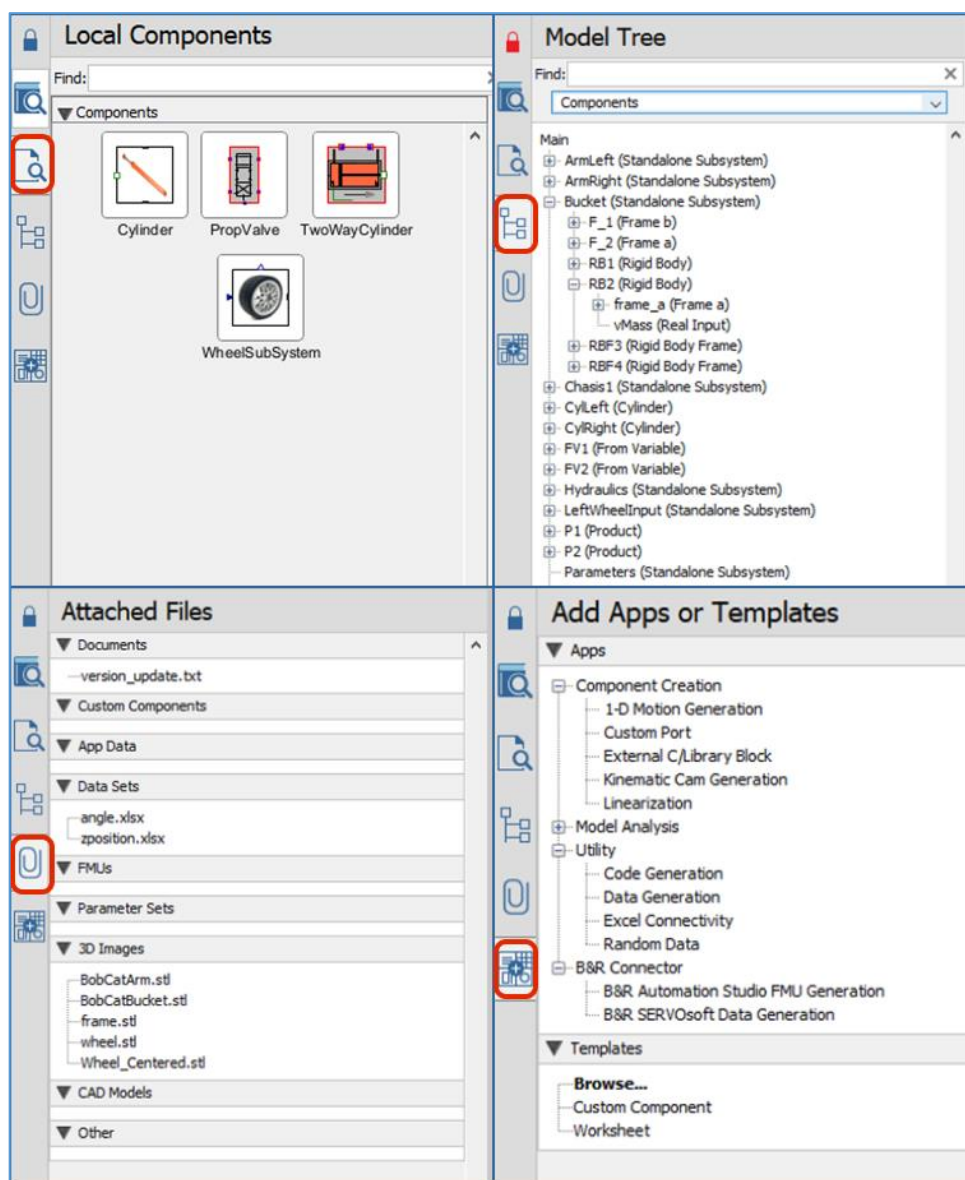
Model stromu obsahuje navigaci skrz celý model. Zobrazuje propojení mezi subsystémy a součástmi.

- **Připojené soubory (Attached Files)**

V kartě se nachází připojené přílohy k modelu, jako jsou soubory (tabulky, textové dokumenty apod.), 3D snímky, 3D modely atd.

- **Přidání aplikací a šablon**

V této kartě se nachází dostupné aplikace pro generování vlastních komponent a analýzu modelu.



Obr. 14: Panel palet

3.7 Knihovny

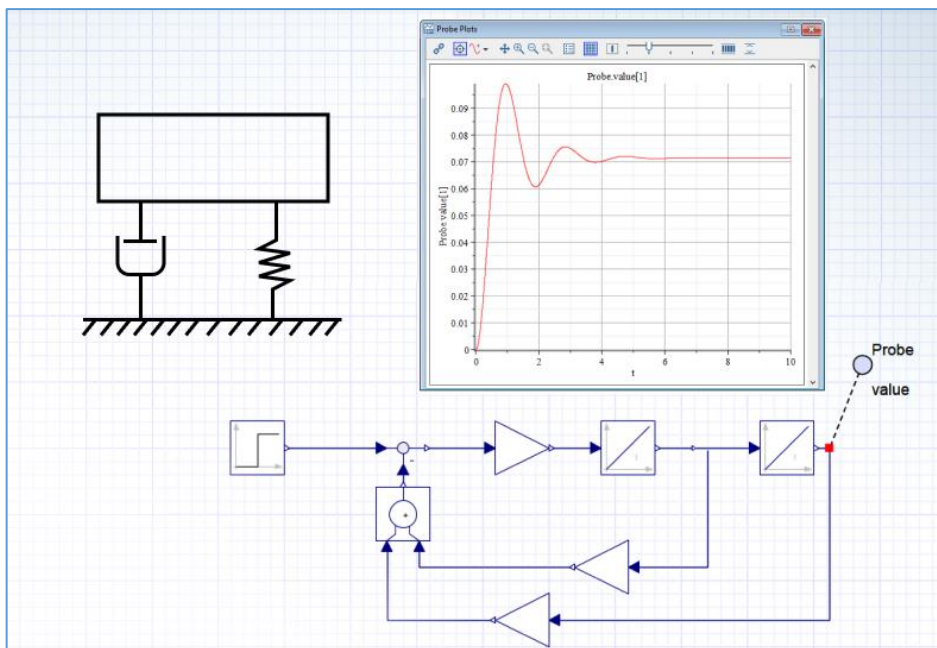
Následující podkapitoly poskytují stručný přehled o základních knihovnách v nástroji MapleSim. Vybrány byly knihovny, které jsou nejvíce reprezentativní pro modelování strojů.

3.7.1 Signal Blocks

Knihovna se signálními bloky obsahuje komponenty pro manipulaci a generování vstupních a výstupních signálů.

Typ	Popis
Boolean	Bloky k rozdělování nebo spojování logických signálů
Complex	Bloky komplexních matematických funkcí.
Continuous	Manipulace se spojitými signály
Controllers	Bloky pro regulaci
Discontinuous	Manipulace s nespojitými signály
Discrete	Manipulace s diskrétními signály
Interpolation Tables	Generování signálů na základě hodnot v interpolačních tabulkách
Math. Functions	Matematické funkce provedené na signálech (zpracování signálů)
Math. Operators	Matematické operace se signály
Integer Math	Mat. operace s celočíselnými signály
Relational	Manipulace se signály na základě relačních logických operátorů
Signal Converters	Převod signálů na jiné typy signálů
Sources	Generují signály požadovaného typu

Tab. 5: Rozdělení knihovny Signal Blocks



Obr. 15: Pružinový tlumič vytvořený ze signálových bloků

Výše na obrázku je uveden jednoduchý příklad modelu vytvořeného pomocí knihovny *Signal Blocks*. Jedná se o model pružinového tlumiče (*mass-spring damper*). Vlevo nahoře je znázorněno schéma systému a vpravo je vyobrazen průběh snímané veličiny.

3.7.2 Electrical

Tato knihovna obsahuje komponenty pro modelování elektrických strojů, obvodů, signálů apod.

Typ	Popis
Analog	Komponenty pro modelování el. analogových obvodů
Digital	Elektrické digitální součástky (registry, hradla a konvertory)
Machines	Elektrické synchronní a asynchronní stroje
Power Converters	Měniče pro AC/DC jednofázové a vícefázové el. systémy
Quasistationary	Komponenty pro el. obvody se sinusovými napětími a proudy.

Tab. 6: Rozdělení knihovny Electrical

3.7.3 1-D Mechanical

Tato knihovna obsahuje komponenty pro modelování jednorozměrných rotačních a translačních mechanických systémů.

Typ	Popis
Springs and Dampers	Pružiny a tlumiče pro rotační a translační systémy
Clutches and brakes	Spojky a brzdy pro rotační systémy
Bearings and Gears	Komponenty pro 1-D rotační systémy a ideální převodovky
Motion Drivers	Komponenty pro řízení pohybu pomocí vstupního signálu
Sensors	Snímače generující signál úměrný pohybové veličině

Tab. 7: Rozdělení knihovny 1-D Mechanical

3.7.4 Multibody

Tato knihovna obsahuje komponenty pro modelování mechanických systémů s více tělesy (viz. kapitola 2.5).

Typ	Popis
Bodies and Frames	Komponenty pro tvorbu tuhých těles a pružných nosníků.
Machine Elements	Komponenty s fyzikálními a vizuálními vlastnostmi
Forces and Moments	Působení momentů a sil
Joints and Motions	Komponenty pro definování pohybu mezi rámy.
Sensors	Komponenty pro měření pohybu a sil mezi rámy
Contacts	Komponenty modelující povrchový kontakt mezi prvky
Visualization	Tvarové komponenty pro 3-D vizualizaci

Tab. 8: Rozdělení knihovny Multibody

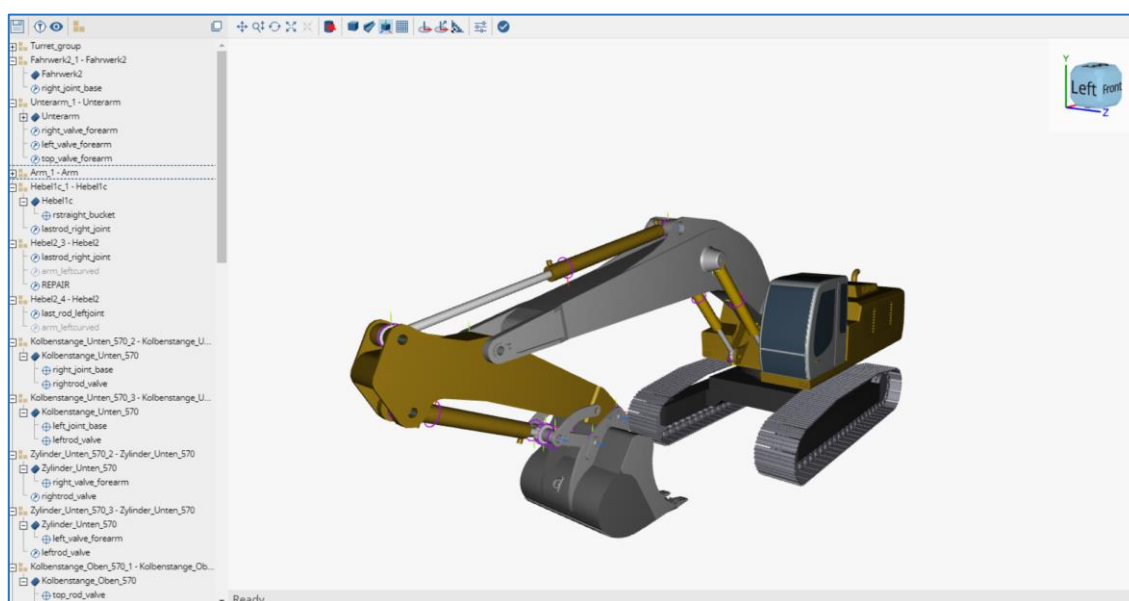
3.8 Toolboxy a konektory

Následující podkapitoly stručně popisují rozšiřující nástroje pro MapleSim. Vybrány byly nástroje nejvíce reprezentující tvorbu digitálního dvojčete, případně jsou použity pro tvorbu modelů v pozdějších kapitolách.

3.8.1 CAD Toolbox

MapleSim CAD Toolbox je nástroj, který umožňuje vytvořit multidoménový systém pomocí CAD modelu přímo v pracovním prostředí MapleSim. Importovaný model obsahuje vlastnosti CAD modelu, jako jsou hmotnost a setrvačnost. Díky tomuto nástroji lze zkoumat chování 3D modelů, které jsou součástí multiménového systému. [36]

Importovat lze soubory STEP a STL, které exportuje většina CAD systémů. Přímý import umožňují programy Inventor, SOLIDWORKS, AutoCAD, NX, Parasolid, CATIA a další. Importované soubory jsou pak automaticky převedeny na formát STL [36].



Obr. 16: Prostředí nástroje CAD Toolbox

3.8.2 B&R MapleSim Connector

B&R MapleSim Connector je nástroj vydaný společností B&R Industrial Automation, který umožňuje propojit digitální dvojče s PLC. Digitální dvojče vytvořené v prostředí MapleSim exportuje jako FMU blok (viz kapitola 3.10) a ten je následně importován do Automation Studia, které poslouží jako testovací platforma pro simulaci.

Nástroj umožní uživateli zvolit subsystém modelu v prostředí MapleSim. Uživatel má dále možnost zvolit si, které vstupy, výstupy a parametry subsystému mají být zachovány. Dále je zvolen řešič (viz kapitola 3.9) a doba cyklu v Automation Studiu. Vygenerovaný FMU blok obsahuje i modely ve formátu STL daného modelu.

The screenshot shows the 'B&R Automation Studio FMU Generation' window. It has a title bar with a question mark icon. The window is divided into several sections:

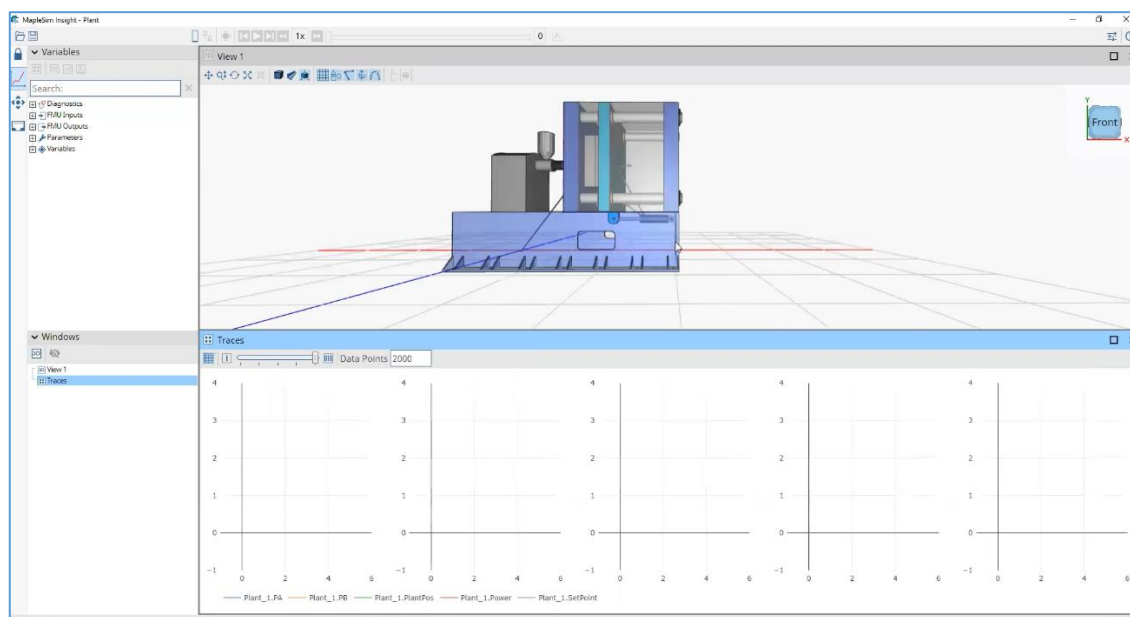
- Subsystem Selection:** A dropdown menu showing 'Main >'. Below it is a 'Load Selected Subsystem' button.
- Options:** A row of radio buttons: 'Inputs', 'Outputs', 'Parameters', 'Export Options' (which is selected), and 'Info Options'. There is a question mark icon to the right.
- Solver:** A section with radio buttons for 'Euler' (selected), 'RK2', 'RK3', 'RK4', 'Implicit Euler', 'CK45', and 'Rosenbrock'. Below these are labels 'Faster' and 'More stable' with arrows. A text box for 'Task class cycle time' contains '0.1e-2'. There is a checkbox for 'View advanced FMU settings'.
- Visualization Options:** A section with checkboxes for 'Export geometric shapes/primitives' (checked), 'Geometric shapes' (checked with a small icon), and 'Primitives' (unchecked with a small icon).
- Export:** A section with a 'Target directory' text box containing 'C:\Users\lukas' and a 'Browse' button. Below it is an 'FMU Archive Name' text box. There are two checked checkboxes: 'Remove temporary 'fmiTMPXXXXX' directory' and 'Overwrite FMU'. At the bottom is a 'Generate FMU Archive' button.

Obr. 17: Nastavení FMU generátoru pro B&R Automation Studio

3.8.3 MapleSim Insight

Nástroj MapleSim Insight poskytuje konstruktérům strojů funkce pro ladění na bázi simulace a trojrozměrné vizualizace. Detailní 3-D vizualizací a 2-D grafy poskytuje zpětnou vazbu programátorovi, který na digitálním dvojčeti testuje a optimalizuje kód. Díky propojení automatizačních platforem s MapleSim Insight v reálném čase ihned vidí, jaký vliv má navržené řízení na stroj.

Pro otevření simulačního modelu v MapleSim Insight je nejprve potřeba vytvořit FMU archiv. Ten může být vytvořen přímo v MapleSimu nástrojem *FMI Connector*. Pro komunikaci přes Ethernet/IP je vytvořen EDS soubor, který poskytuje detaily o tom, jak komunikovat s FMU. Po navázání komunikace s automatizační platformou je model ovládán předdefinovanými vstupy. Nástroj MapleSim Insight obsahuje funkci pro nahrávání videa ze simulace, které může být exportováno ve formátu MP4. Naměřené hodnoty mohou být také exportovány a použity pro analýzu [37].



Obr. 18: Prostředí nástroje MapleSim Insight [37]

3.9 Řešiče

Po sestavení a symbolickém zjednodušení soustavy rovnic (kapitola 2.4) nastává proces integrace a zpracování událostí. O to se stará tzv. *solver* (řešič). Tento řešič numericky integruje soustavu diferenciálně-algebraických rovnic. MapleSim umožňuje uživateli vybrat si mezi proměnným řešičem (variable solver) a pevným řešičem (fixed solver). V případě řešiče s proměnnou jsou neustále sledována algebraická omezení, aby se zabránilo odchýlení omezení, které by jinak ovlivnilo přesnost řešení. U pevného typu řešiče jsou algebraická omezení sledována v každém pevném časovém kroku [10].

Během integrace se sledují podmínky nerovnosti, které jsou součástí modelu. Při změně jedné nebo více těchto podmínek se spustí událost. Pokud v případě řešiče s proměnným časovým krokem dojde k takové události, řešič zastaví simulační *engine* a na základě podmínek vyskytlé události vypočítá novou konfiguraci soustavy rovnic. *Solver* poté opět spustí simulační *engine* a pokračuje dále v numerickém řešení, dokud nedojde k další takové události, nebo není dosaženo ukončení simulace [10].

Ke zpracování událostí dochází u obou typů řešičů. Rozdíl spočívá v tom, že *solver* s pevným krokem řeší události v pevně daných časových krocích, zatímco řešič s proměnným časovým krokem upraví krok tak, aby se události zpracovaly přesně v době, kdy k nim během integrace dojde. Uživatel si tedy při výběru typu řešiče volí, jestli bude přizpůsoben přírůstek času, aby byly zachovány tolerance chyb. Pro složitější modely je vhodné použít *stiff solver* pro zkrácení doby simulace [10].

Typ řešiče	Řešič
Fixed solvers	CK45 semi-stiff (výchozí)
	RKF45 non-stiff
	Rosenbrock stiff
Variable solvers	Euler (výchozí)
	Implicit Euler
	RK2 second-order Runge-Kutta solver
	RK3 third-order Runge-Kutta solver
	RK4 fourth-order Runge-Kutta solver

Tab. 9: Typy řešičů v nástroji MapleSim

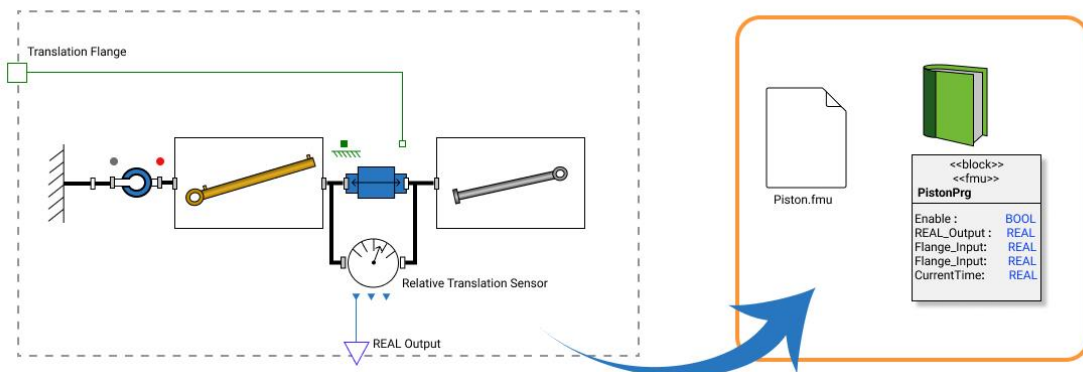
3.10 Functional Mockup Interface (FMI)

V mnoha průmyslových odvětvích prudce roste složitost výrobků. Modelování na systémové úrovni se tak stává stále důležitějším přístupem k inženýrskému navrhování. Při modelování na úrovni systému se všechny součásti systému simulují společně v jednom prostředí. Modely těchto součástí mohou být vyvinuty v různých nástrojích a je potřeba sdílet je napříč platformami. To umožňuje standardizované rozhraní FMI. To definuje formát nezávislý na nástroji pro sdílení a integraci modelů od různých dodavatelů. Jako příklad může posloužit vývoj modelu vozidla: Na softwaru 1 je vyvíjen motor, software 2 zpracovává převodovku, software 3 zpracovává řídicí prvky, na softwaru 4 se vyvíjí brzdy apod. FMI umožní zkombinovat tyto modely do kompletního modelu. FMI standardu lze využít u HIL testování (viz kapitola 1.7) [38; 39].

Z každého modelu nezávisle na vývojovém softwaru je vytvořena FMU knihovna (Functional Mock-Up Unit). Ta je distribuována v jednom souboru s příponou *.fmu*. Tento soubor obsahuje XML soubor obsahující definice všech proměnných a další informace o modelu. Dále FMU soubor obsahuje C-kód dynamického modelu systému. Dále může obsahovat volitelná doplňková data, jako jsou tabulky parametrů, uživatelské rozhraní, dokumentace vyžadovaná modelem atd [39; 40].

Maplesoft pro vytvoření FMI poskytuje *MapleSim Connector for FMI*, který umožňuje sdílet modely vytvořené v MapleSimu s jinými modelovacími nástroji. Speciálně pro Automation Studio od firmy B&R Automation je pro generování FMU archivu k dispozici nástroj *B&R MapleSim Connector* (viz kapitola 3.8.2).

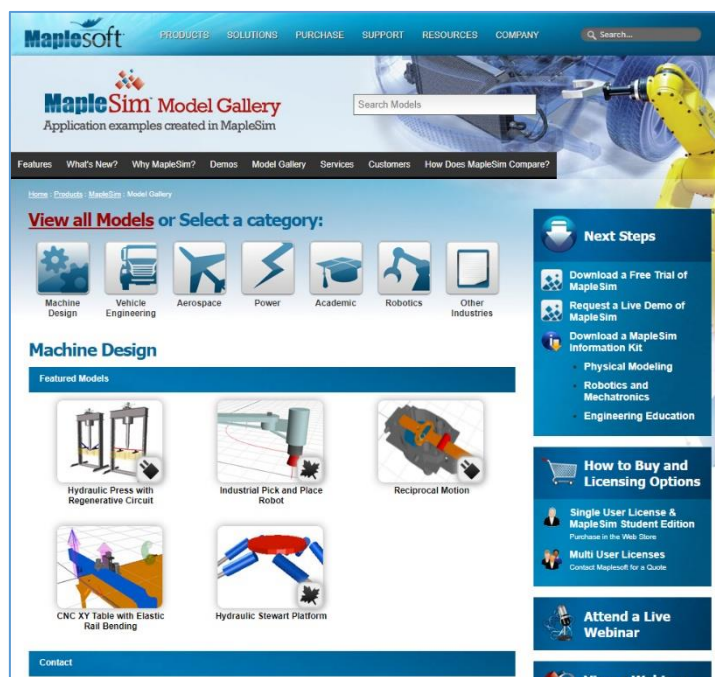
Na vývoji FMI standardu se podíleli výzkumníci z projektu MODELISAR. Cílem tohoto projektu bylo vyvinout modely pomocí jazyka Modelica a integrovat je protokolu řídicího systému AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture, sdružení vyvíjející standardizovanou softwarovou architekturu pro elektronické řídicí jednotky automobilů (ECU)). Projekt MODELISAR byl ukončen v prosinci roku 2011 a FMI je dále vyvíjeno asociací Modelica [38; 41].



Obr. 19: Zjednodušené znázornění převodu subsystému na FMU archiv

3.11 Galerie a příklady modelů

S nainstalovaným softwarem MapleSim může uživatel pro inspiraci nebo lepší pochopení problematiky modelování využít galerii modelů. Ta je zdarma dostupná na webových stránkách Maplesimu [42]. Modely jsou zde rozděleny do kategorií robotiky, letectví, návrhu vozidel, výroby elektriny, návrhu mechanismů a akademické příklady. K vyhledávání příkladů může posloužit vyhledávací pole v nástroji MapleSim (kapitola 2.6 a), které po zadání znaků vyhledá dostupné modely v galerii a odkáže uživatele na webovou stránku, nebo zobrazí příklady stažené již na úložišti.



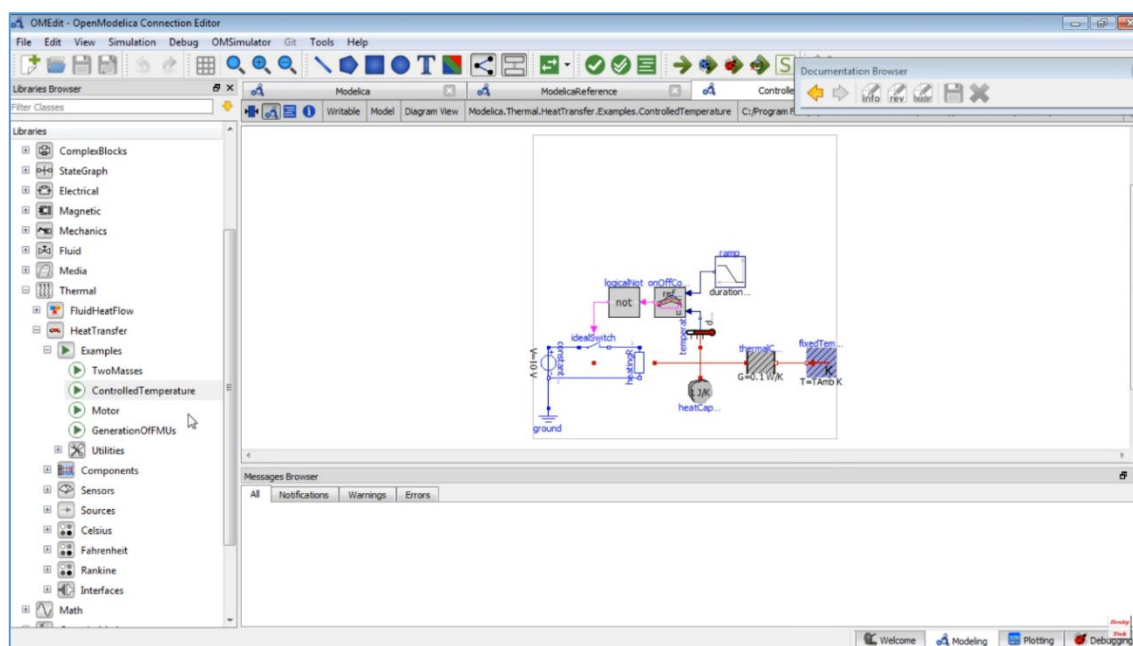
Obr. 20: Galerie modelů [42]

4 DOSTUPNÉ NÁSTROJE PRO MODELOVÁNÍ

V této kapitole jsou zmíněny alternativní nástroje pro modelování, o kterých se literatura nejčastěji zmiňuje a které jsou svými přístupy k modelování podobné nástroji MapleSim.

4.1 OpenModelica

Modelovací a simulační nástroj OpenModelica je open-source software založený na modelovacím jazyku Modelica (viz kapitola 2.5). Jeho vývoj je podporován neziskovou organizací Open Source Modelica Consortium (OSMC). Nástroj nachází své využití v průmyslové i akademické oblasti. Software je zdarma a jeho cílem není konkurovat jiným komerčním nástrojům v oblasti výkonu a kvality, ale rozvoj modelovacího jazyku Modelica. Kromě implementovaných knihoven (včetně multibody) lze do nástroje knihovny importovat a nebo vytvářet vlastní. Výslednou simulaci lze zobrazit i v 3D vizualizaci [43].



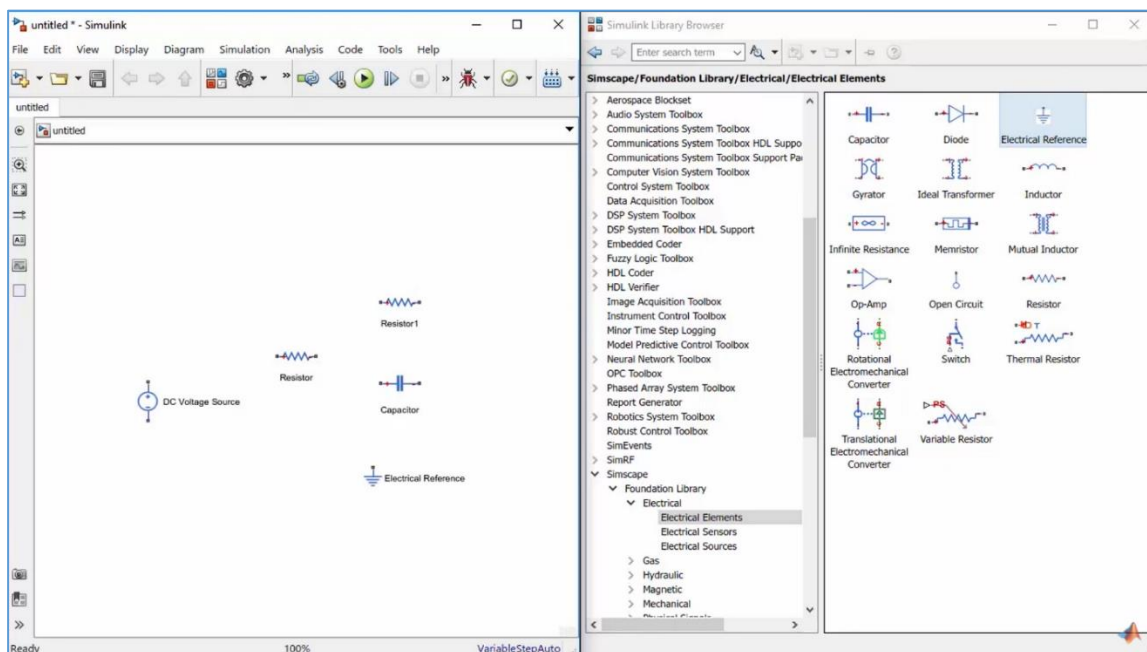
Obr. 21: Modelovací prostředí nástroje OpenModelica [44]

4.2 Simscape a Simulink

Alternativní nástroje pro modelování a simulování fyzikálních systémů poskytuje společnost MathWorks. Jsou jimi Simulink a Simscape. Rozdíl mezi těmito nástroji je v přístupu modelování. Simulink je vhodný pro kauzální modelování systémů (viz kapitola 2.3.1), kdy signál mezi bloky teče jenom jedním směrem. Pro akauzální modelování systému slouží Simscape, který je součástí prostředí Simulinku.

Nástroj Simulink je doplňkem pro výpočetní program Matlab. Součástí Simulinku jsou knihovny, pomocí kterých lze modelovat *multidomain* modely dynamických soustav. Nástroj může být rozšířen o další doplňky z dílny MathWorks, které zjednoduší vytvoření specifictějšího modelu systému. Jedním takovým doplňkem je Simscape.

Simscape disponuje mnoha knihovnami z různých domén (elektronika, hydraulika, mechanika atd.). Díky tomu lze v tomto prostředí vytvářet *multidomain* modely zahrnující multibody systémy vytvořených z importovaných CAD modelů. Komponenty v knihovnách jsou upravitelné, ale na rozdíl od MapleSimu Simscape nevyužívá modelovací jazyk Modelica – komponenty jsou psané v jazyku MATLAB. Pro modelování v Simscape je potřeba prostředí Simulink (viz obr. 22). Vytvořený model může být exportován do kódu v jazyku C, což umožní testovat model například v HIL (viz kapitola 2.7) simulaci.

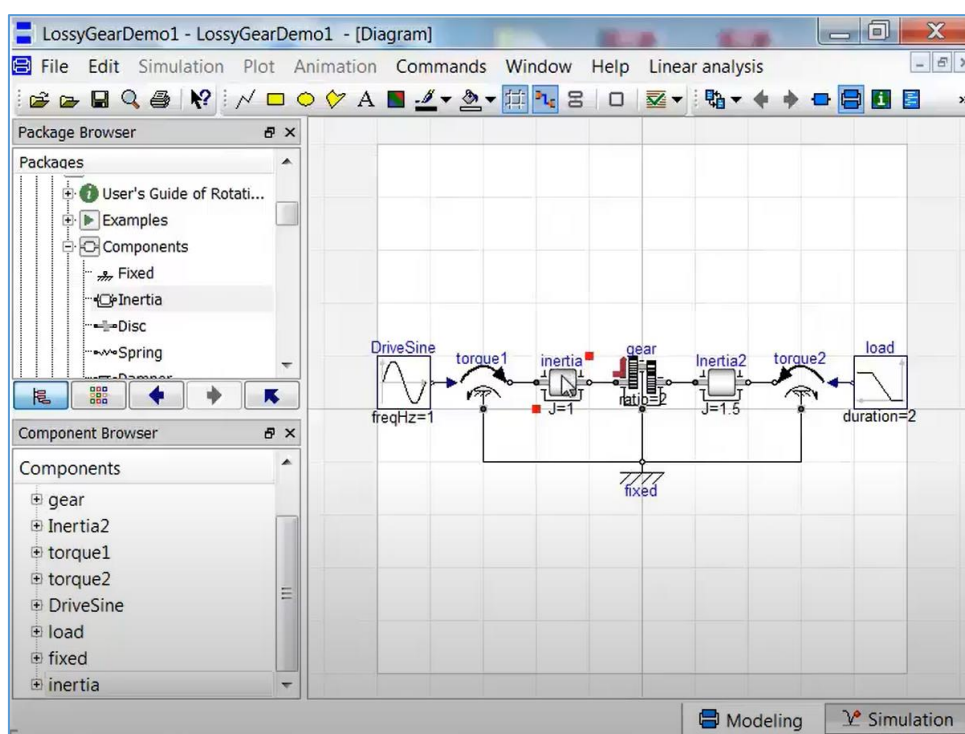


Obr. 22: Komponenty Simscape knihoven v prostředí Simulink [45]

4.3 Dymola

Pojem *Dymola* byl již zmíněn v kapitole 2.5 jako modelovací jazyk a předchůdce jazyku *Modelica*. V současnosti jde o modelovací nástroj vyvíjený společností Dassault Systèmes. *Dymola* plně podporuje modelovací jazyk *Modelica* a uživatel může využívat standardní i vlastní knihovny. Uživatel může provést simulaci přímo v prostředí *Dymola*. Nástroj umožňuje zobrazit výslednou animaci ve 3D a uživatel může analyzovat průběhy požadovaných veličin z grafů. *Dymola* podporuje FMI standard (viz. kapitola 2.5) [46].

Modely jsou v prostředí *Dymola* vyvíjeny stejným způsobem jako u předchozích nástrojů – funkcí *drag and drop* a propojováním příslušných komponent, které mohou být rozděleny do příslušných subsystémů. Modelování v prostředí *Dymola* přináší všechny výhody, které jsou spojení s jazykem *Modelica*.



Obr. 23: Vývojové prostředí Dymola [46]

4.4 Cenové porovnání nástrojů MapleSim a Simscape

Tato podkapitola nabízí jednoduché porovnání základních licencí těchto dvou nástrojů. *Dymola* je ze srovnání vynechána, protože její aktuální cenová nabídka je dostupná pouze na dotaz. Nástroj *OpenModelica* je dostupný zdarma, proto není do srovnání zařazen. *MapleSim* a *Simscape* i jejich modelovací přístupy jsou podobné, hlavní rozdíl spočívá v modelovacím jazyku. Ať už si uživatel zvolí kterýkoliv zmiňovaný nástroj, bude moci využívat výhody spojené s kompatibilitostí mezi ostatními softwary poskytovanými společností vyvíjející zvolený nástroj. Nástroje využívající jazyk Modelica navíc uživateli poskytnou všechny výhody, které jsou s tímto jazykem spojené (viz. kapitola 2.5).

Standartní/komerční licence					
	MapleSim	Maple	MATLAB	Simulink	Simscape
Roční	————	————	800 €	1200 €	800 €
Permanentní	7 774 €	2 769 €	2000 €	3000 €	2000 €
Celkem roční	————		2800 €		
Celkem perm.	10543 €		7000 €		
Studentská licence					
	MapleSim	Maple	MATLAB	Simulink	Simscape
Roční	————	————	35 €		
Permanentní	115 €	115 €	69 €		
Celkem roční	————		35 €		
Celkem perm.	115 €		69 €		

Tab. 10: Cenové srovnání MapleSimu a Simscape [47; 48]

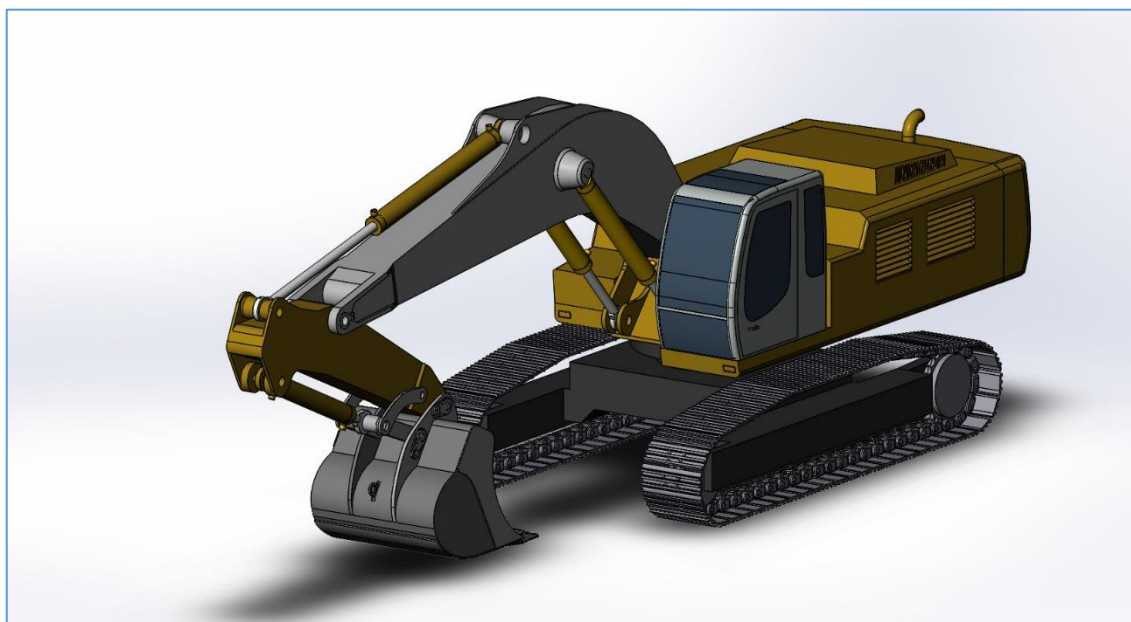
Tabulka 10 porovnává náklady na *single-user* licence. Ceny u produktů společnosti Maplesoft jsou pro verze MapleSim 2021 a Maple 2022. Pro využívání nástroje MapleSim je potřeba mít nainstalován program Maple. Studentská licence pro MapleSim 2021 obsahuje i licenci na produkt Maple 2021 [47].

Samostatná licence Simscape neobsahuje knihovnu *Electrical* ani *Multibody*. Licence k těmto knihovnám musí být přikoupeny k samotné licenci Simscape. K využívání nástroje Simscape jsou potřeba produkty MATLAB a Simulink. Studentská licence MATLAB umožňuje využívat uživateli i nástroj Simscape [48].

5 ZÁKLADNÍ POSTUP PŘI TVORBĚ MODELU V MAPLESIMU

V této kapitole je popsán postup modelování v nástroji MapleSim s využitím add-onu CAD Toolbox (viz. kapitola 3.8.1) a základních knihoven. Modelováno je hydraulické rameno bagru. Výstupem je 3D simulace pohybů ramene a grafy sledovaných veličin. Při modelování jsou využity některé přístupy zmiňované v kapitole 1.

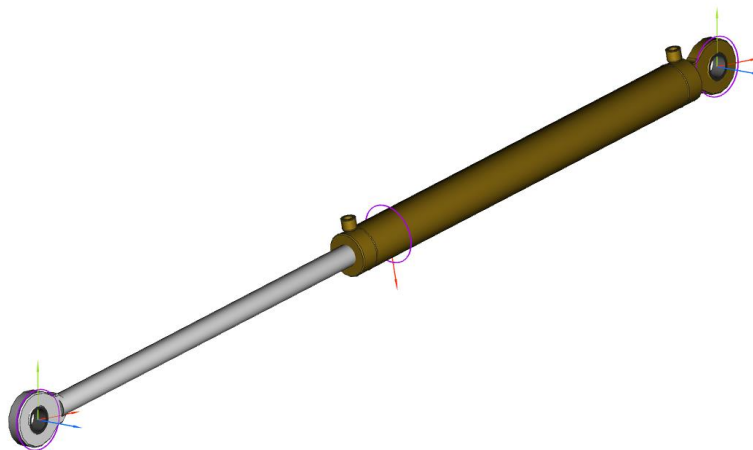
Pro modelování hydraulické soustavy byl použit model bagru Liebherr 954, který byl volně dostupný ve formátu STEP z uvedeného zdroje [49].



Obr. 24: Model bagru Liebherr 954 použitý pro modelování

5.1 Úprava CAD Modelu

Prvním krokem k sestavení modelu systému je úprava importovaného 3D modelu. K tomu poslouží nástroj CAD Toolbox (viz kapitola 3.8.1), který umožňuje upravovat strukturu komponent ve stromu modelu (*model tree*), měnit jejich názvy, barvu a fyzikální vlastnosti (hmotnost, hustota, setrvačnost a materiál). Důležitou funkcí tohoto nástroje je stanovení souřadnic (*coordinates*), pomocí kterých je v pozdější fázi definováno jak se budou komponenty vůči sobě pohybovat a kde budou umístěny. Příklad přiřazených souřadnic je na obr. 25 – pohyb pístu ve válci je definován prostředním souřadnicovým systémem (pohyb v ose Z). CAD model lze upravovat i později během pokročilejší části vývoje modelu systému.



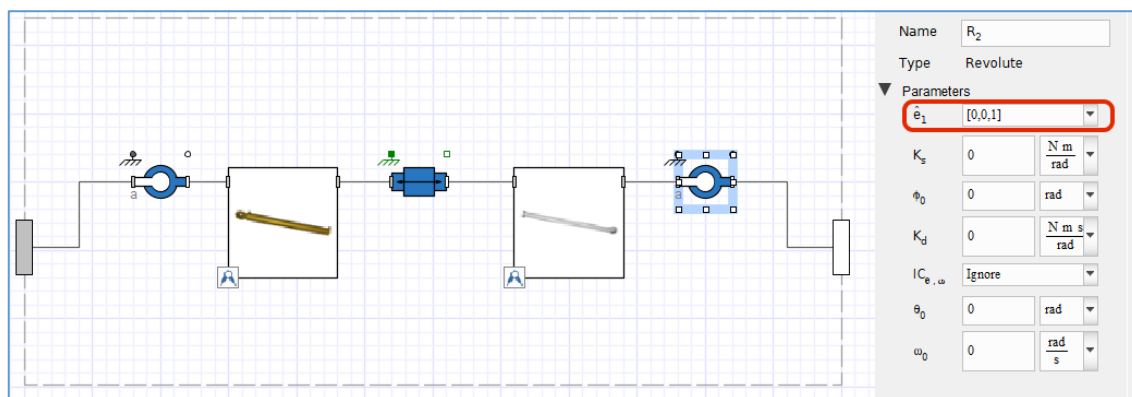
Obr. 25: Definované souřadnice na modelu

5.2 Propojení CAD komponent v MapleSim

Po definování souřadnicových systémů v CAD Toolboxu je potřeba propojit jednotlivé části přímo v modelovacím prostředí MapleSim. Pomocí *drag and drop* jsou komponenty přetaženy ze záložky *local components* do modelovacího prostředí. Pro propojení jednotlivých prvků modelu je v tomto případě využito komponent z knihovny *Multibody* – *Joints and Motions*:

- **Revolute** - umožňuje jeden stupeň volnosti otáčení kolem dané osy
- **Prismatic** - umožňuje jeden translační stupeň volnosti podél dané osy

Pro lepší přehlednost modelu jsou vytvořeny subsystemy pro písty s válci. Na obr. 26 je takový subsystem zobrazen i s výše zmiňovanými komponenty. U *Revolute* je nastaven pohyb kolem *osy Z* a u *Prismatic* je nastaven pohyb v *ose Z*. Stejný postup je použit u celého modelu.

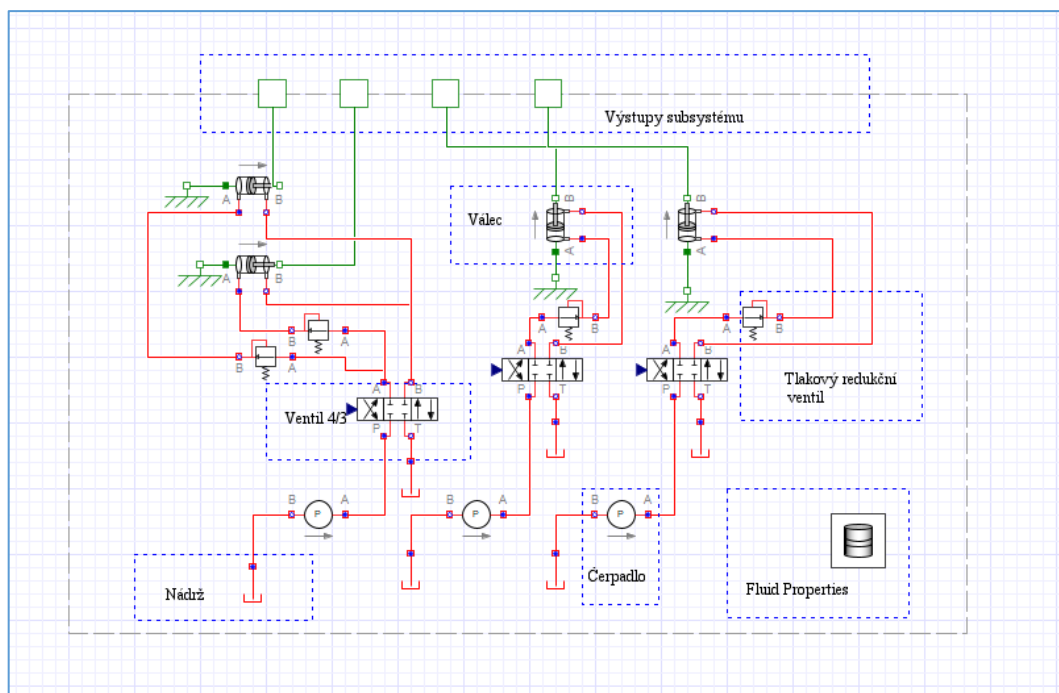


Obr. 26: Subsystem složený z pístu a válce s definovanými osami pohybu

5.3 Hydraulická soustava

Doposud byl model sestaven pouze z multibody komponent. S využitím knihovny *Hydraulics* se do modelu zakomponuje další doména a model se tak stane multidoménový (multidomain, viz kapitola 2.4). Je tedy vytvořen subsystem, který obsahuje hydraulické schéma skládajícího se z ventilů 4/3, tlakových redukčních ventilů a dvojčinných válců. Soustava byla inspirována schématem v článku zabývajícím se systémem řízeným akčními členy s přepínáním čerpadel [50].

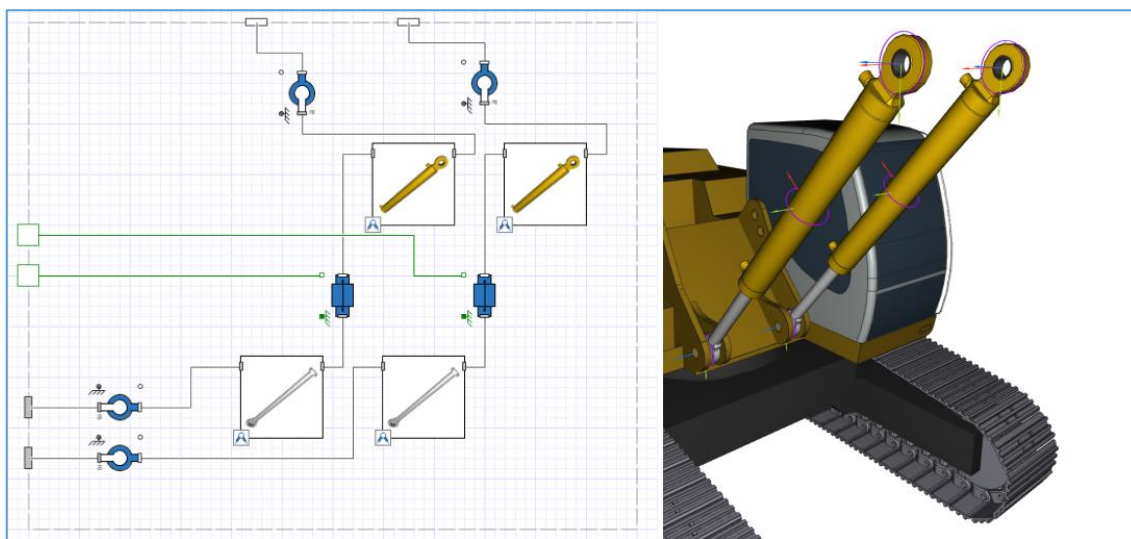
Čerpadla jsou reprezentována komponentou *Fixed Pressure* s nastaveným tlakem 20 MPa. Do schématu jsou přiřazeny hydraulické válce, u kterých jsou nastaveny koncové pozice podle CAD modelu. Počáteční podmínky s_{rel} u válců jsou nastaveny na 0.001 m. Pokud by byla tato podmínka ignorována, píst by ve výchozí poloze „seděl“ přesně na dorazu válce a to by mohlo způsobovat problémy při inicializaci. Do subsystemu je přidána komponenta *Fluid Properties*, která obsahuje vlastnosti kapaliny hydraulického systému a bez ní by simulace nefungovala. Hydraulický systém je popsán na obr. 27 (popis systému byl vytvořen pomocí *Drawing Tools* v MapleSimu).



Obr. 27: Hydraulický systém modelu

5.4 Propojení hydraulické soustavy s multibody soustavou

Vytvořené soustavy je nutné propojit. Zelené výstupy subsystému na obr. 27 jsou hodnoty typu *Translational Flange* (translační „příruba“) a lze je spojit pouze s portem stejného typu. Komponenty *Prismatic* mají port stejného typu a mohou tak být propojeny s hydraulickým systémem. Na obr. 28 je zobrazen subsystém s válci propojenými s hydraulickou soustavou.



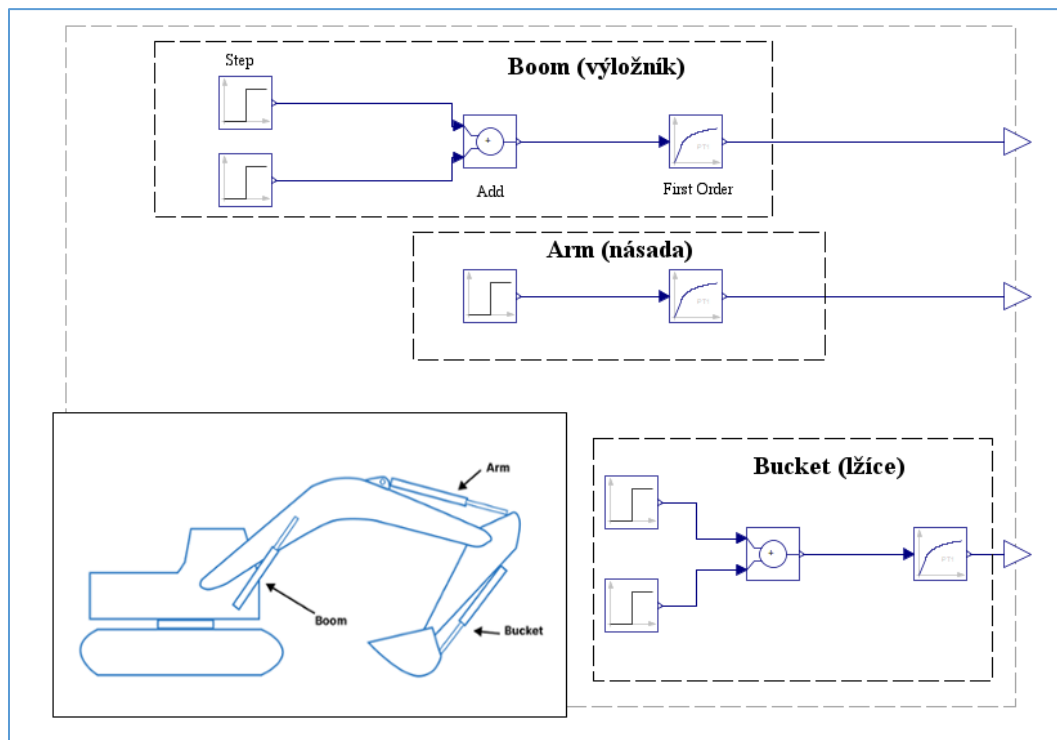
Obr. 28: Hydraulické válce - porovnání 3D modelu s modelem v MapleSim

5.5 Ovládání ventilů

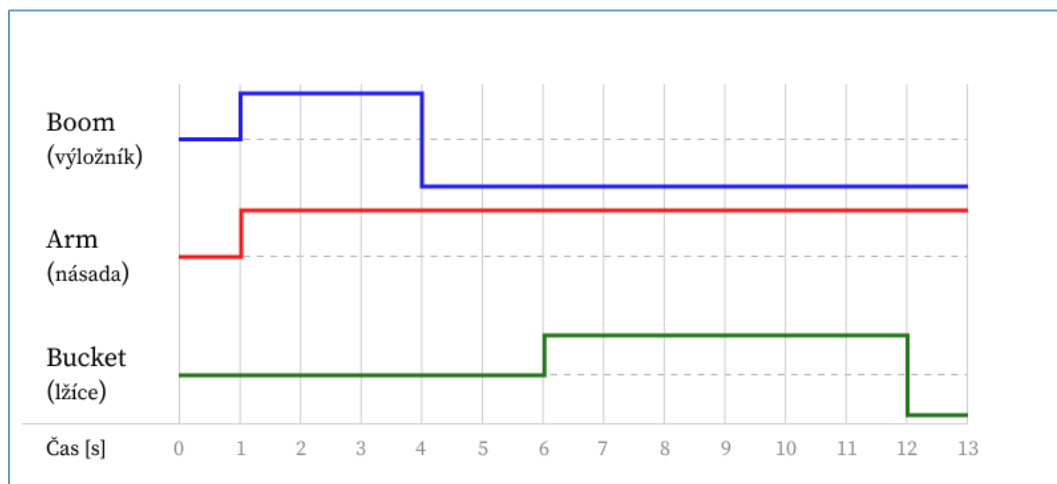
Pro výslednou simulaci modelu je potřeba ovládat ventily v hydraulické soustavě. To je zde provedeno pomocí signálových bloků z knihovny *Signal Blocks*. Využity jsou následující bloky:

- Step – generuje krokový signál typu REAL, nastavuje se výška a počáteční čas
- Add – elementárně sčítá velikost vstupních signálů
- First Order – definuje přechodovou funkci prvního řádu

Jednotlivé rovnice bloků a jejich parametry jsou popsány v Nápovědě MapleSim. Na obrázku 29 je zobrazeno schéma zapojení signálových bloků včetně pojmenování jednotlivých typů bloků. Hydraulické rameno vykonává pouze jednoduchý pohyb představující nabrání zeminy. Signály jsou připojeny k příslušným ventilům.



Obr. 29: Schéma pro ovládání ramene



Obr. 30: Časový diagram ovládání ventilů

6 VLASTNÍ MODEL

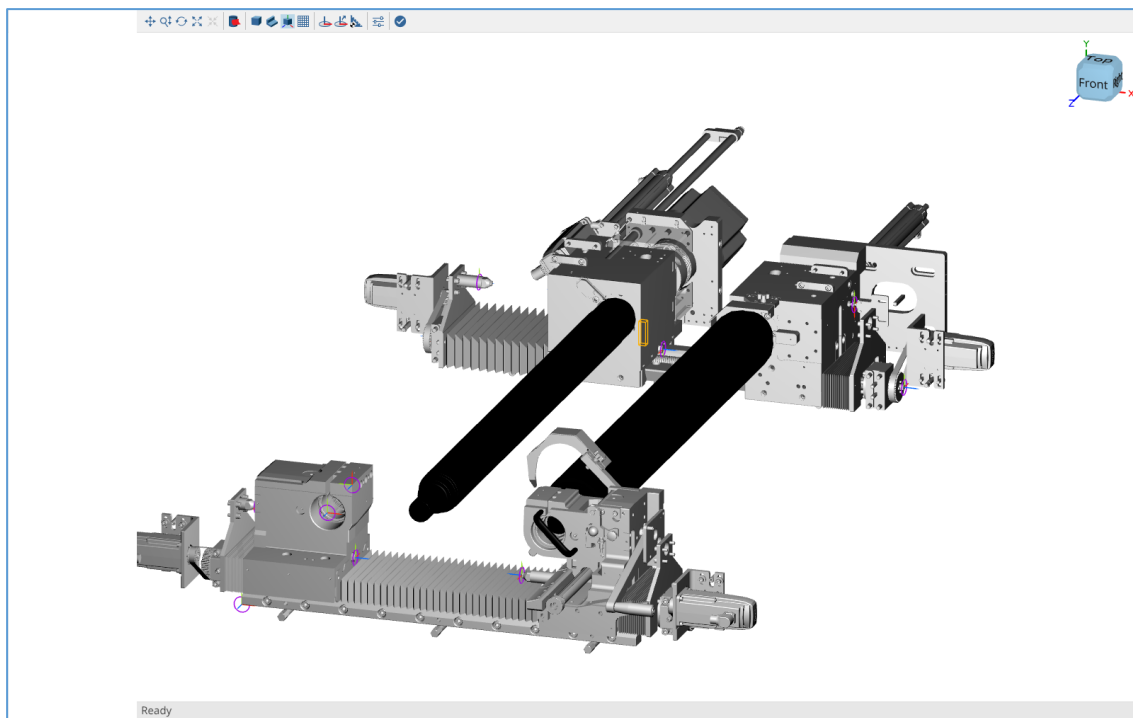
Pro tvorbu vlastního řešení byla vybrána součást flexotiskového stroje – barevník. Modelovány byly pouze základní funkce a cílem bylo otestovat možnosti, které nabízí propojení nástroje MapleSim a Automation Studia. Reálné řízení barevníku je daleko komplexnější a modelování složitějších fyzikálních vlastností barevníku nebylo náplní práce. CAD model a informace k funkčnosti barevníku byly poskytnuty firmou SOMA.

6.1 Využití CAD Toolboxu

Práce s nástrojem CAD Toolbox byla již popsána v kapitole 5.1. V tomto případě byla upravena struktura stromu CAD modelu seskupením určitých částí modelu pomocí příkazu *Create Group*. Seskupeným částem pak byly přiřazeny souřadnicové systémy *coordinates*, pomocí kterých jsou později definovány vztahy mezi vytvořenými skupinami komponent.

Byly vytvořeny základní skupiny – jednotlivé domky, dva rámy (po kterých se domky pohybují) a pohybové šrouby. K levému zadnímu domku byla vytvořena skupina pojmenována „Motor“, která obsahovala komponenty, které konají pohyb v ose válce pro vysunutí a zasunutí válce do protějšího domku. Samotné válce byly již seskupeny v originálním modelu.

Pro menší náročnost simulace byla skryta většina nepotřebných součástí, jako například šrouby, matice, hadičky a jiné malé součástky. U předního válce byl skryt *sleeve*, jelikož byl nahrazen komponentou z knihovny MapleSim. Skrytím prvku se změní moment setrvačnosti a váha komponenty v MapleSimu. Pro lepší rozlišitelnost ve výsledné 3D simulaci byla barva válců změněna na černou.



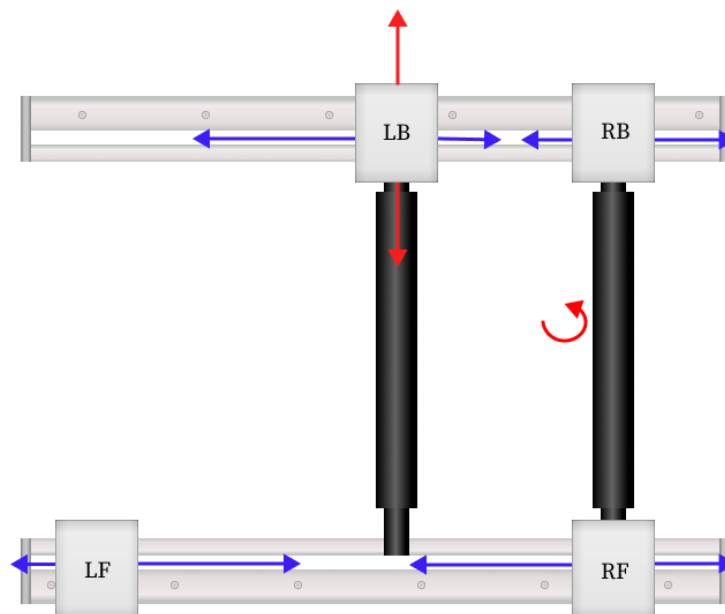
Obr. 31: Snímek upraveného modelu v nástroji CAD Toolbox

6.2 Pohyby modelu

Systém je znázorněn na obrázku č. 32, kde je rozdělen do čtyř domků a válců. Domky označeny podle jejich pozice – *LB* (*left-back*, levý zadní), *LF* (*left-front*, levý přední), *RB* (*right-back*, pravý zadní) a *RF* (*right-front*, pravý přední). Toto označení bylo použito i pro názvy proměnných v modelu a kódu. Pro vysouvání a zasouvání válce se *LB* domek navíc pohybuje ve směru červených šipek.

Levý černý válec na obrázku č. 32 je označován jako „přední“ a válec vpravo je označován jako „zadní“. V modelované sekvenci je podstatné otáčení zadního válce.

Jako v předchozím příkladu, pohyby os jsou řešeny komponentami *Prismatic* (translační pohyb) a *Revolute* (rotační pohyb) z multibody knihovny. Vstupem do těchto komponent je pozice osy, která je výstupem funkčního bloku *MpAxisBasic* (viz kapitola 6.8).



Obr. 32: Znáznornění modelovaného barevníku s popisem domků

6.3 Subsystémy

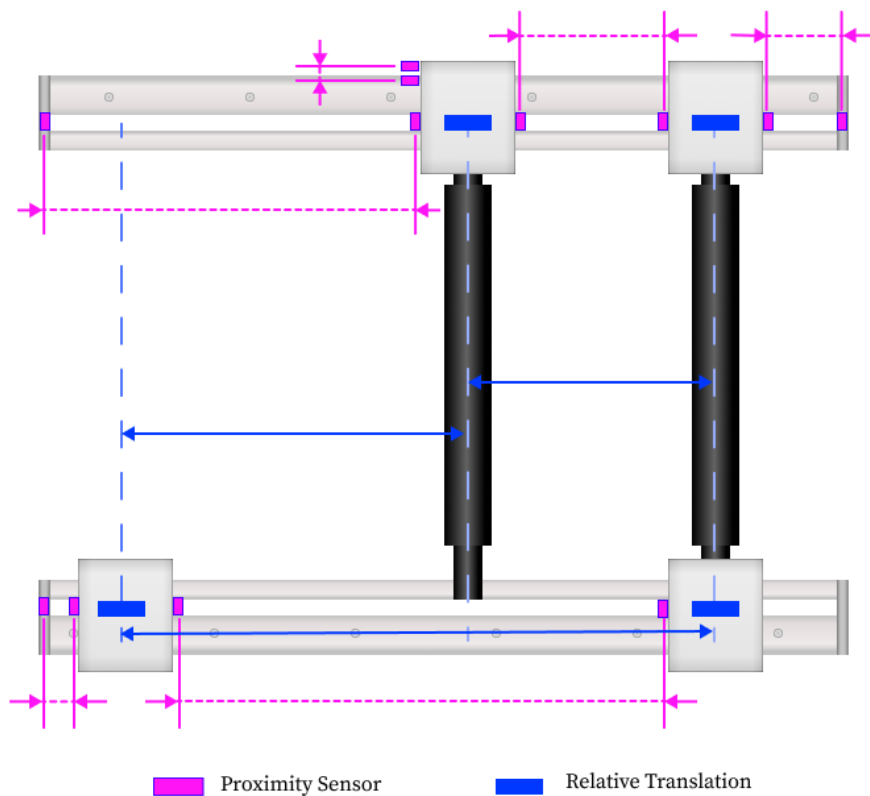
Aby byl model ve vývojovém prostředí MapleSim přehledný, byly vytvořeny subsystémy, které rozdělují model do částí podle jejich fyzického umístění na stroji. Označením příslušných komponent a příkazem *Create Subsystem* nebo klávesovou zkratkou Ctrl+G je subsystém vytvořen. Subsystémům byla nahrána ikona znázorňující co daný subsystém obsahuje.

Celý model barevníku je tvořen v subsystému, aby byly odděleny ovládací signály pro testování simulace v MapleSimu od modelu barevníku, který může být zvlášť exportován jako FMU bez těchto signálů.

6.4 Snímače

Součástí modelovaného systému jsou i snímače poloh a koncové snímače. Umístění těchto snímačů je znázorněno na obr. 33. Místo dorazů jsou použity koncové snímače Proximity z knihovny multibody, u kterých je nastavena prahová vzdálenost 1,2 mm. Pokud je prahová vzdálenost mezi komponentami rovna nebo je menší než nastavená hodnota, změní se výstupní signál komponenty z *false* na *true*. Na obr. 33 jsou proximity snímače znázorněny růžovou barvou.

Polohové snímače *Relative Translation* (na obr. 33 znázorněny modrou barvou) jsou pouze virtuální a na reálném stroji nejsou umístěny. Jejich výstupní hodnotou je vzdálenost mezi definovanými osami, jak je znázorněno na obr. X. Slouží pouze jako zpětná vazba pro řídicí program.



Obr. 33: Umístění snímačů na modelovaném barevníku

6.5 Výměna sleeveu

Do modelu byla zařazena možnost výměny sleeveu na předním válci. Tato událost je reprezentována změnou vnějšího průměru sleeveu, který je v modelu reprezentován komponentou *Cylinder* z knihovny multibody. U sleeveu tak lze nastavit jeho rozměry a hustotu materiálu, což mění hmotnost a moment setrvačnosti celého válce. Původní sleeve v CAD modelu byl skryt.

Se změnou obvodu sleeveu se mění i souřadnice, na které dojíždějí domky. Při příjezdu zadních domků k předním musí být mezi válci zachována mezera 0,5 mm. Dále se mění i souřadnice, na které domky přijíždějí při přesunu k centrálnímu válci. V kódu je tato událost dopočítána z hodnot získaných polohovými snímači (viz kapitola 6.4).

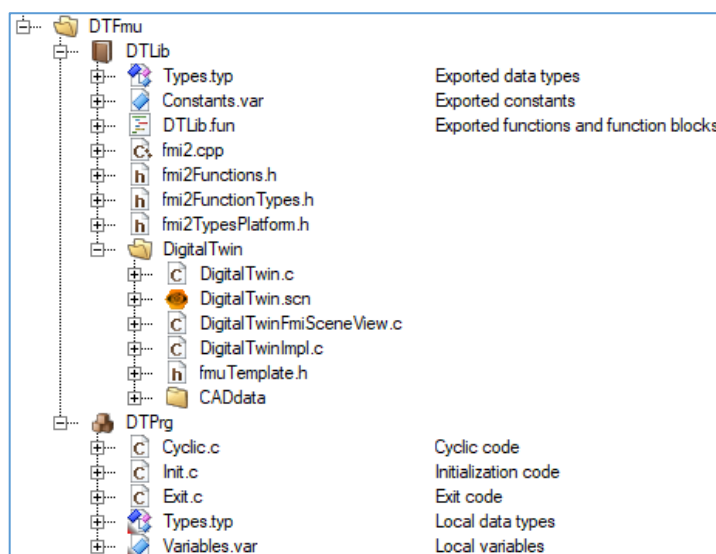
6.6 FMU blok

Vygenerování FMU bloku je důležitou součástí vytvořeného modelu. Byl k tomu použit B&R connector, kterému se věnuje kapitola 3.8.2 (FMI Standartu je věnována kapitola 3.10). V této kapitole je pouze popsáno nastavení generovaného FMU bloku a jeho import do Automation Studia.

Vstupy do FMU bloku jsou pozice (datový typ LREAL) jednotlivých domků a úhel natočení zadního válce. Výstupy z FMU bloku jsou všechny snímače zmiňované v kapitole 6.4, kdy každý polohový senzor snímá hodnotu ve třech osách. Mezi měnitelné parametry byly zařazeny pouze proměnné související se změnou obvodu sleeveu.

Doba cyklu třídy pro Automation Studio je nastavena na 1 ms. Typ řešiče pro FMU blok byl zvolen *Implicit Euler*.

Na obr. 34 je zobrazen importovaný FMU blok v Automation Studiu. Vše je vytvořeno automaticky včetně komentářů. FMU blok byl pojmenován *DigitalTwin*, ale při importu musel být název zkrácen na *DT*, jelikož název *DigitalTwin* byl příliš dlouhý. Program *DTPrg* byl přemístěn do třídy úloh s cyklem trvání 1 ms (Cyclic #1).



Obr. 34: Importovaný FMU blok v Automation Studiu

6.7 Sekvence

Druhou částí práce na modelu bylo vytvoření ukázkové sekvence. Na ní byla otestována základní funkčnost modelu. Sekvence by se dala rozdělit do čtyř částí – *homing*, *výchozí stav*, *výměna sleeveu* a *tisk*. Příloha I. zobrazuje podrobnější stavový diagram této sekvence.

6.8 Řídící program a konfigurace v Automation Studiu

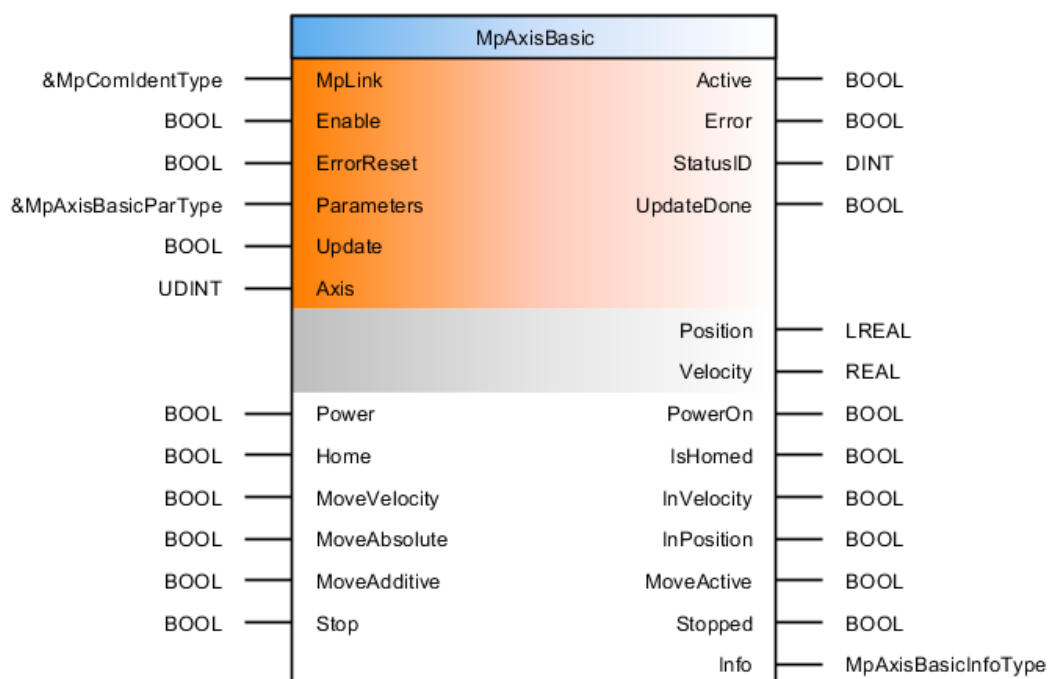
K tvorbě řídicího programu bylo použito Automation Studio V 4.11. Importovaný program FMU blok je automaticky vytvořen v jazyku C. Pro programování sekvence byl zvolen strukturovaný text (jazyk ST) pro jeho jednoduchost. Pomocný podprogram *AxisHandling* byl využíván pro vývoj řídicího programu. Ve výsledné fázi pouze převádí hodnotu polohy z milimetrů na metry.

V podprogramu *AxisControl* je zahrnuta zmiňovaná sekvence. Pro řízení os jsou použity funkční bloky *MpAxisBasic*, které zajišťují všechny základní funkce os. Do parametrů funkčního bloku (*Parameters*, viz obr. 35) jsou načteny zvolené hodnoty pro konečnou polohu, rychlost, zrychlení a směr pohybu osy. Příkazy *MoveVelocity*, *MoveAbsolute* a *MoveAdditive* slouží pro vykonání příslušného pohybu osy.

Na začátku je proveden *homing* os pomocí příkazu *Home*. Nastavení tohoto úkonu se provádí v konfiguraci os. Mód *homingu* byl pro levé domky nastaven jako *Absolute switch*, kde byly jako referenční snímače použity *Proximity* senzory z MapleSimu. Výstupy z FMU bloku jsou datového typu LREAL, hodnota *true* a *false* z *Proximity* senzoru musela být převedena do proměnné typu BOOL. Pro ostatní osy byl *homing* nastaven jako *Default*.

Pro realizaci os v Automation Studiu byla zvolena komponenta *mappMotion* a všechny osy byly vytvořeny jako virtuální (*PureVirtual Axis*), nebyl tedy simulován reálný hardware.

Podprogram *Global* byl použit za účelem obsluhy globálních úloh. Nakonec ovládá odemykání a zamykání válce v domku a uvede simulaci do stavu *ERROR_PARAM* (chyba parametru) v případě, že jsou změněny parametry sleeveu mimo stav *SLV_CHANGING* (výměna sleeveu).



Obr. 35: Schéma funkčního bloku MpAxisBasic [51]

Object Name	Version	Transfer To	Size (bytes)	Date	Source
<CPU>					
Cyclic #1 - [1 ms]					
DTPrg	1.00.0	UserROM	5312	25.04.20...	DTFmu.DTPrg
AxisHandli	1.00.0	UserROM	8472	25.04.20...	AxisHandling
Cyclic #2 - [20 ms]					
AxisContro	1.00.0	UserROM	16436	25.04.20...	AxisControl
Cyclic #3 - [50 ms]					
Cyclic #4 - [100 ms]					
Global	1.00.0	UserROM	3616	25.04.20...	Global
Cyclic #5 - [200 ms]					
Cyclic #6 - [500 ms]					
Cyclic #7 - [1000 ms]					
Cyclic #8 - [10 ms]					

Obr. 36 Podprogramy zařazené do cyklických tříd

6.9 Ovládání simulace v SceneViewer

Pro zobrazení simulace byl použitý nástroj Scene Viewer 4.1.2 z dílny B&R Automation. Okno s modelem se spustí pomocí položky *DigitalTwin.scn* z FMU archivu (obr. 34). Komunikace prostřednictvím PVI je nastavena automaticky a řeší pohyby všech os. K vizualizaci změny obvodu sleeveu je použita komunikace přes OPC UA.

Uvedením proměnné *cmd.PowerOn* do stavu TRUE jsou osy zapnuty. Některé stavy jsou potřeba potvrzovat proměnnou *cmd.Acknow*. Do proměnné *RollPar.FrontSleeve.OutR* uživatel zadává vnější poloměr sleeveu na předním válci (pouze ve stavu *SLV_CHANGING*).

6.10 Zhodnocení a rozšíření

Osobním cílem autora práce bylo vytvořit pro model i ukázkovou sekvenci. Předložené řešení by bylo možné dále zdokonalovat jak na straně Automation Studiu, tak i v MapleSimu. Během programování modelu bylo potřeba seznámit se s komponentou *mappMotion*. Později se však ukázalo, že pro simulaci by mohl být vhodnější starší systém ACP10, který používá více funkčních bloků pro točivý moment a regulaci. To by umožnilo větší využití potenciálu MapleSimu. Dále by aplikace mohla být rozšířena o HMI (*Human-Machine Interface*, rozhraní člověk-stroj) komponentou *mappView*.

Proběhl i pokus o namodelování kontaktu mezi předním a zadním válcem. V MapleSimu byla tato událost vymodelována a simulována podle očekávání. Využity k tomu byly komponenty z knihovny Multibody – Contacts. Při importu do Automation Studia docházelo k chybám, proto výsledný model nebyl o kontakt mezi válci rozšířen.

Nakonec byla většina CAD součástí při exportu skryta z důvodu nutnosti zmenšit velikosti odevzdávaných příloh a optimalizovat výpočetní nároky simulace.

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá modelováním strojů a nástrojem MapleSim. Práce je logicky rozdělena do pěti částí. V první části byla provedena rešerše v oblasti modelování strojů. Jsou v ní popsány základní přístupy, které se při modelování využívají. Vývoj modelu je zde zasazen do kontextu s Průmyslem 4.0. Na závěr první části je zmíněna simulace Hardware-in-the-loop, která je významná pro vývoj strojů a na kterou může být zaměřen vývoj modelu v nástroji MapleSim. Při tvorbě rešeršní části bylo čerpáno ze zahraniční literatury.

Druhá část se zabývá nástrojem MapleSim. Kromě popisu uživatelského rozhraní a knihoven je zde i nastíněno fungování nástroje. V této části je také obsaženo téma FMI standardu, které je významné pro vývoj systému s využitím více platform.

V třetí části je provedeno shrnutí dostupných nástrojů, které využívají podobných přístupu při modelování jako MapleSim. Většina těchto nástrojů využívá modelovací jazyk Modelica.

Ve čtvrté části je popsán základní postup při tvorbě modelu s nástrojem MapleSim. Model byl vybrán tak, aby byl jednoduchý a zároveň na něm šlo popsat co nejvíce přístupů. Jako příklad bylo hydraulické rameno bagru. Pro tvorbu modelu je využito CAD toolboxu, který umožnil import CAD modelu.

V poslední části je realizován vlastní model. Jedná se barevník, který je součástí flexotiskového stroje. Poskytnutý 3D model byl zpracován v nástroji MapleSim a následně exportován do programu Automation Studio, ve kterém byl nad rámec zadání práce vytvořen řídicí program pro model.

MapleSim umožňuje vývoj a analýzu komplexních systémů napříč platformami. Své využití nalézá i v akademické oblasti. Dalo by se říci, že budoucí využitelnost tohoto nástroje pro průmysl je z nemalé části závislá na vývoji modelovacího jazyku Modelica. I přesto MapleSim disponuje řadou nástrojů, které urychlují vývoj modelu.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANU, Maria. Introduction to Modeling and Simulation. In: *Proceedings of the 29th Conference on Winter Simulation*. Atlanta, Georgia, USA: IEEE Computer Society, 1997, s. 7-14. ISBN 978-0-7803-4278-1.
- [2] LIU, Mengnan, Fang SHUILIANG, Huiyue DONG a Cunzhi XU. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*. 2020, **58**. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmsy.2020.06.017
- [3] DURÃO, Luiz, Sebastian HAAG, Reiner ANDERL, Klaus SCHÜTZER a Eduardo ZANCUL. *Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0*. In: . Cham: Springer International Publishing, 2018, s. 204-214. ISBN 978-3-030-01614-2.
- [4] Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use. In: *Gartner* [online]. 2019 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mainstream>
- [5] LUO, Weichao, Tianliang HU, Yingxin YE, Chengrui ZHANG a Yongli WEI. A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2020, **65**, 101974. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>
- [6] Virtual Commissioning with a Model-Driven Digital Twin. In: *Maplesoft* [online]. 2017 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/contact/webforms/Whitepapers/virtual-commissioning-with-digital-twin.aspx>
- [7] LUO, W., T. HU, W. ZHU a F. TAO. Digital twin modeling method for CNC machine tool. In: *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. 2018, s. 1-4. Dostupné z: doi:10.1109/ICNSC.2018.8361285
- [8] SHANONN, Robert E. Introduction to the Art and Science of Simulation. *Winter Simulation Conference*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society Press, 1998, **1998**, 7-14.

- [9] VAN DER ZEE, Durk-Jouke. Approaches for simulation model simplification. *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*. 2017, 4197-4208.
- [10] MAPLESOFT A DIVISION OF WATERLOO MAPLE INC. *MapleSim User's Guide* [online]. 2021 [cit. 2022-05-19]. ISBN 978-1-926902-32-6. Dostupné z: https://www.maplesoft.com/documentation_center/maplesim2021/MapleSimUserGuide.pdf
- [11] ZUPANCIC, Borut, Rihard KARBA, Maja ATANASIJEVIC-KUNC a Josip MUSIĆ. Continuous Systems Modelling Education – Causal or Acausal Approach?. In: *Proceedings of the ITI 2008 30th International Conference on Information Technology Interfaces*. IEEE Computer Society, 2008, s. 803-808. ISBN 978-953-7138-12-7.
- [12] *MapleSim: Technological Superiority in Multi-Domain Physical Modeling and Simulation* [online]. 2010 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/contact/webforms/whitepapers/TechSuperiority.aspx>
- [13] ŽUPANČIČ, Borut a Anton SODJA. Object oriented modelling of a recuperator process in stone wool production. In: *Proceedings of the ITI 2010, 32nd International Conference on Information Technology Interfaces*. 2010, s. 669-674. ISBN 978-953-7138-18-9. ISSN 1330-1012.
- [14] ZUPANČIČ, Borut a Anton SODJA. Advanced Multi-Domain Modelling: Advantages and Dangers. In: *2011 UkSim 13th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. 2011, s. 260-265.
- [15] Modeling and Simulation of Multi-Discipline Systems using Bond Graphs and VHDL-AMS. In: PÊCHEUX, François, Bruno ALLARD, Christophe LALLEMENT, Alain VACHOUX a Hervé MOREL. *Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling and Simulation (ICBGM)* [online]. 2005, s. 149-155 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/37422100_Modeling_and_Simulation_of_Multi-Discipline_Systems_using_Bond_Graphs_and_VHDL-AMS
- [16] HDADAI, Abeer. *MSc Project MSc Bioelectronics and Biosensors Robotic Systems Modelling and Control through Bond Graph and (Virtual Coupling) Port Hamiltonian Framework*. 2015.

- [17] GARRIDO, Jose M. *Performance Modeling of Operating Systems Using Object-Oriented Simulations: A Practical Introduction*. 1st. New York: Kluwer Academic, 2000. ISBN 0-306-46459-4.
- [18] SIMON, Stefan a Steven LIU. An Automated Design Method for Fault Detection and Isolation of Multidomain Systems Based on Object-Oriented Models. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015, **2015**(20), 1236-1248.
- [19] SCHIEHLEN, W. Multibody System Dynamics: Roots and Perspectives. *Multibody System Dynamics*. 1997, **1997**(1), 149–188.
- [20] LI, Ming, Xiang-Yu HAO, Xue-Feng HAN a Hong-Guang JIA. Aircraft Landing Gear Simulation Using Multidomain Modeling Technology. In: *Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences*. Los Vaqueros Circle: IEEE Computer Society, 2011, s. 279-281. ISBN 978-0-7695-4522-6.
- [21] SCHIEHLEN, W. a R. KÜBLER. Modular Simulation in Multibody System Dynamics. *Multibody System Dynamics*. 2, 2000, **2000**(4), 107–127. Dostupné z: doi:10.1023/A:1009810318420
- [22] RÖCK, Sasha. Hardware in the loop simulation of production systems dynamics. *Production Engineering* [online]. 2011, **2011**(5), 329–337 [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11740-011-0302-5>
- [23] OGAN, Ron T. Hardware-in-the-Loop Simulation. *Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle*. London: Springer, 2015, s. 167-173. ISBN 978-1-4471-5633-8. Dostupné také z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4471-5634-5_14
- [24] BACIC, M. On hardware-in-the-loop simulation. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. Seville, Spain: IEEE, 2005, s. 3194-3198. ISBN 0-7803-9567-0. ISSN 0191-2216.
- [25] About Maplesoft. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://www.maplesoft.com/corporate/index.shtml>
- [26] Waterloo Maple Inc. introduces Maplesoft as primary business name. In: *Maplesoft* [online]. 2003 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://www.maplesoft.com/pressroom/releases/2003/maplesoft.shtml>
- [27] About Maplesoft. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/company/about/>

- [28] EDWARDS, Mike. Cybernet Systems Co., Ltd. to acquire Maplesoft in early September 2009. In: *Design Product News* [online]. 2009 [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <http://www.dpncanada.com/Site-Content/More-News/Cybernet-Systems-Co.-Ltd.-to-acquire-Maplesoft-in-early-September-2009.html>
- [29] History of Maple Computer Algebra Software. In: *SYMBOLIC COMPUTATION GROUP* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.scg.uwaterloo.ca/history.shtml>
- [30] Symbolic and Numeric Math. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/products/maple/features/symbolicnumericmath.aspx>
- [31] System Requirements. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-04-07]. Dostupné z: https://www.maplesoft.com/products/system_requirements.aspx
- [32] TUTSOY, Onder, Martin BROWN a Hong WANG. Reinforcement learning algorithm application and multi-body system design by using MapleSim and Modelica. In: *Proceedings The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. Tokyo: IEEE Computer Society, 2012, s. 650-655. ISBN 978-0-9555293-8-2.
- [33] GACHADOIT, N. a R. RENAUD. Modeling and design of an active suspension system with maple and maplesim. In: *2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)*. IEEE, 2012, s. 425-432. ISBN 978-1-4673-4772-3.
- [34] TILLER, Michael. *Introduction to physical modeling with Modelica* [online]. Second. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publisher, 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/b181/_media/courses/a6m33mos/tiller_introductiontophysicalmodelingwithmodelica.pdf
- [35] OTTER, Martin a Hilding ELMQVIST. *Modelica Language, Libraries, Tools, and Conferences*. 2002. Dostupné také z: https://www.dlr.de/rm-neu/Portaldata/52/Resources/bitte_neu_einsortieren/dokumente/m_t/modelica.pdf
- [36] MapleSim CAD Toolbox. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/products/toolboxes/CAD/>

- [37] EtherNet/IP Communication with MapleSim Insight using CODESYS. In: *Youtube* [online]. 2022 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://youtu.be/JyJXosFL88Y>
- [38] GOOSSENS, Paul a Jace ALLEN. Symbolic Techniques for Model Code Optimization: FMI Applications. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.maplesoft.com/contact/webforms/whitepapers/fmiapplications.aspx>
- [39] MapleSim and Functional Mock-up Interface (FMI). In: *BR Automation* [online]. 2020 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/soubory-ke-stazeni/automation-academy/training-modules/modeling-and-simulation/tm292-maplesim-and-functional-mock-up-interface-fmi/>
- [40] Functional Mockup Interface (FMI). In: *Modelica* [online]. 2010 [cit. 2022-03-03]. Dostupné z: https://modelica.org/publications/newsletters/2010-1/index_html#item8
- [41] How to contribute to the development of the FMI standard. In: *FMI Standard* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://fmi-standard.org/about/>
- [42] MapleSim Model Gallery. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: www.maplesoft.com/products/maplesim/ModelGallery/
- [43] Introduction. In: *OpenModelica* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.openmodelica.org/doc/OpenModelicaUsersGuide/latest/introduction.html>
- [44] Modelica Tutorials for Beginners: 7.0 - OpenModelica Basic Operation. In: *Youtube* [online]. 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://youtu.be/SW5Eclf1tRs>
- [45] Physical Modeling Tutorial, Part 1: Introduction to Simscape. In: *Youtube* [online]. 2019 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://youtu.be/liIKeYxa00I>
- [46] An Introduction to Dymola. In: *Youtube* [online]. 2018 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://youtu.be/FN8LlnTwzVE>
- [47] Maplesoft Web Store. In: *Maplesoft* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://webstore.maplesoft.com/>
- [48] Pricing and Licensing. In: *MathWorks* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://ch.mathworks.com/pricing-licensing.html>

- [49] HAAS, Chris. Liebherr R 954. In: *Grabcad* [online]. 2014 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/liebherr-r-954-1>
- [50] BUSQUETS, Enrique a Monika IVANTYSYNOVA. A Multi-Actuator Displacement-Controlled System with Pump Switching - A Study of the Architecture and Actuator-Level Control. *Transactions of the Japanese Fluid Power System Society*. 2015, **8**.
- [51] B&R AUTOMATION. *Automation Help 4.11.295: MpAxisBasic* [software].

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma převedené na vazební graf dle akademické práce	24
Obr. 2: Ukázka Multibody knihovny v nástroji MapleSim	25
Obr. 3: Multibody systém reprezentován datamodelem	26
Obr. 4: modulární modelování a simulace mechatronického systému	27
Obr. 5: Příklad HIL testování jednotky ECU.....	29
Obr. 6: Jednoduchý systém vytvořen jazyku Modelica	35
Obr. 7: Uživatelské prostředí nástroje MapleSim.....	36
Obr. 8: Hlavní panel nástrojů.....	36
Obr. 9: Model Workspace Toolbar	37
Obr. 10: Annotation Toolbar.....	37
Obr. 11: Nastavení Multibody	38
Obr. 12: Konzole.....	39
Obr. 13: Okno s informacemi o diagnostice	39
Obr. 14: Panel palet.....	41
Obr. 15: Pružinový tlumič vytvořený ze signálových bloků	43
Obr. 16: Prostedí nástroje CAD Toolbox	45
Obr. 17: Nastavení FMU generátoru pro B&R Automation Studio	46
Obr. 18: Prostedí nástroje MapleSim Insight	47
Obr. 19: Zjednodušené znázornění převodu subsystému na FMU archiv	50
Obr. 20: Galerie modelů	50
Obr. 21: Modelovací prostředí nástroje OpenModelica.....	51
Obr. 22: Komponenty Simscape knihoven v prostředí Simulink	52
Obr. 23: Vývojové prostředí Dymola	53
Obr. 24: Model bagru Liebherr 954 použitý pro modelování.....	55
Obr. 25: Definované souřadnice na modelu.....	56
Obr. 26: Subsystém složený z pístu a válce s definovanými osami pohybu.....	57
Obr. 27: Hydraulický systém modelu	58
Obr. 28: Hydraulické válce - porovnání 3D modelu s modelem v MapleSim....	59
Obr. 29: Schéma pro ovládání ramene.....	60
Obr. 30: Časový diagram ovládání ventilů	60
Obr. 31: Snímek upraveného modelu v nástroji CAD Toolbox	62

Obr. 32: Znázornění modelovaného barevníku s popisem domků.....	63
Obr. 33: Umístění snímačů na modelovaném barevníku	64
Obr. 34: Importovaný FMU blok v Automation Studiu.....	65
Obr. 35: Schéma funkčního bloku MpAxisBasic	67
Obr. 36 Podprogramy zařazené do cyklických tříd	67

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Výhody jednodušších modelů pro zúčastněné strany	21
Tab. 2: Systémové požadavky MapleSim pro Windows (64 bit)	33
Tab. 3: Systémové požadavky MapleSim pro Linux (64 bit)	33
Tab. 4: Systémové požadavky MapleSim pro Mac	33
Tab. 5: Rozdělení knihovny Signal Blocks.....	42
Tab. 6: Rozdělení knihovny Electrical.....	43
Tab. 7: Rozdělení knihovny 1-D Mechanical	44
Tab. 8: Rozdělení knihovny Multibody	44
Tab. 9: Typy řešičů v nástroji MapleSim.....	48
Tab. 10: Cenové srovnání MapleSimu a Simscape	54

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I. – Stavový diagram

Příloha II. – Blokové schéma barevníku v MapleSimu

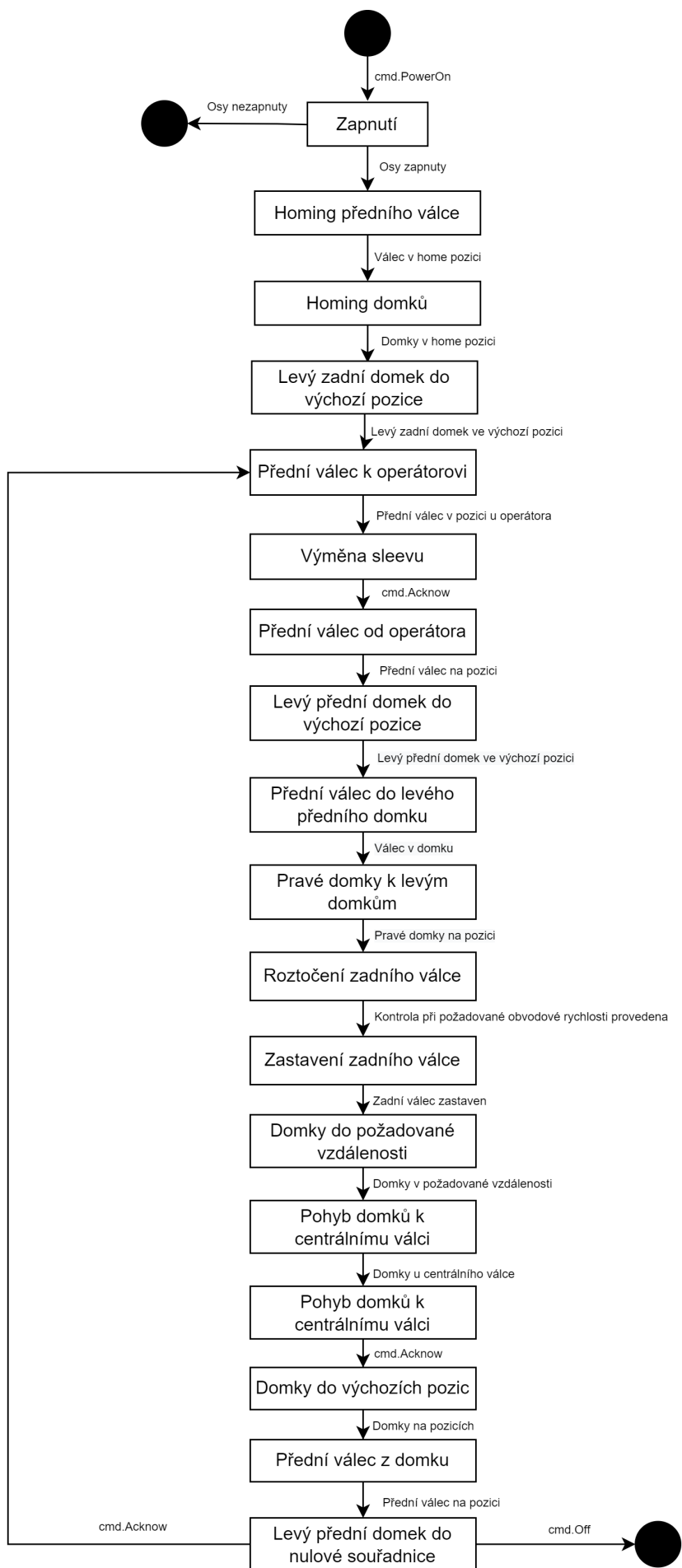
Příloha III. – Levý zadní domek v MapleSimu

ELEKTRONICKÉ PŘÍLOHY

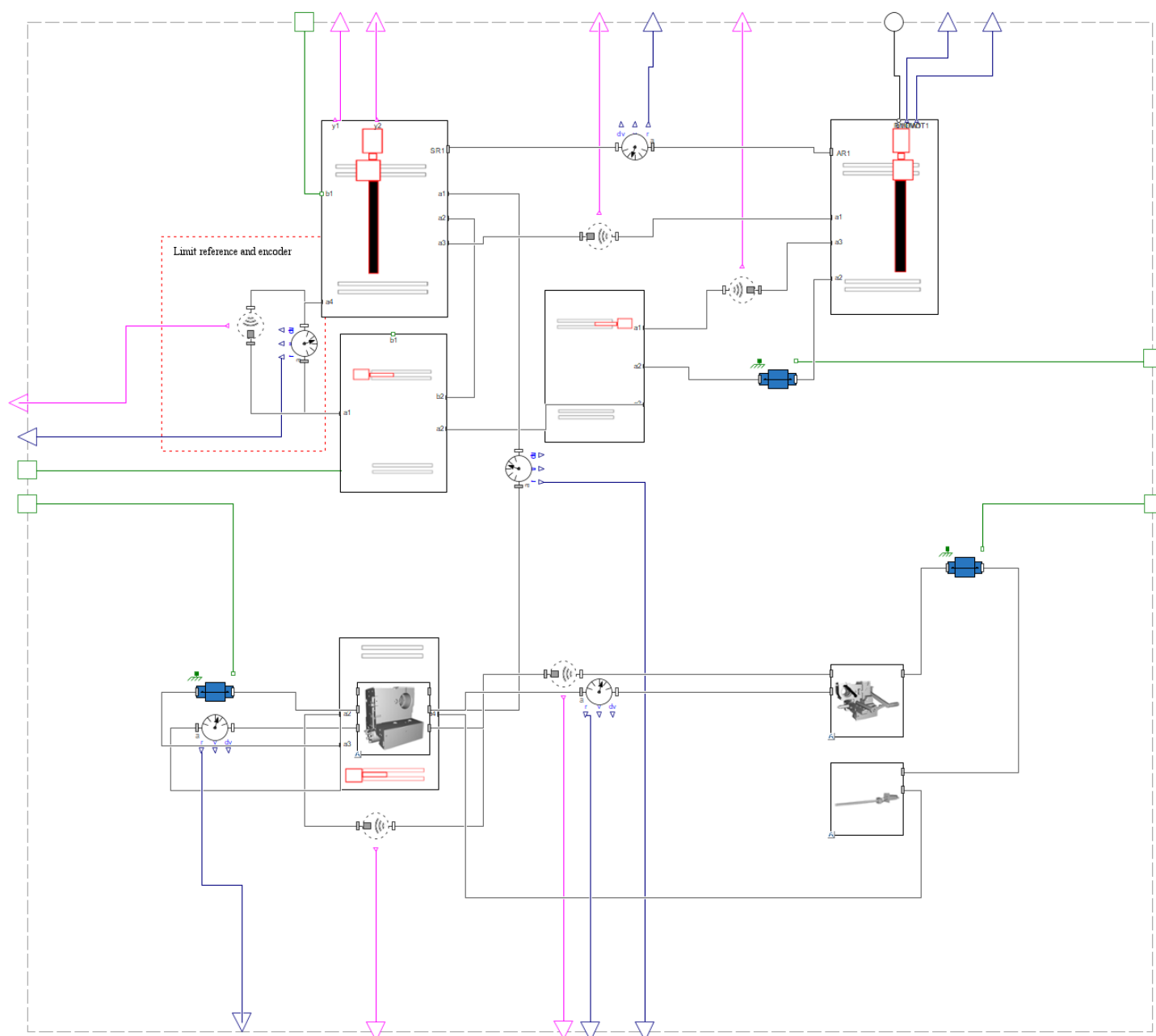
Zip soubor obsahující :

- Model bagru v programu MapleSim
- FMU Blok barevníku
- Řídící program v Automation Studiu

PŘÍLOHA I. - Stavový diagram



PŘÍLOHA II. - Blokové schéma barevníku v MapleSimu



PŘÍLOHA III. - Levý zadní domek v MapleSimu

