

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**Počítačová podpora výpočtů v energetice, nové trendy
v simulacích**

Diplomová práce

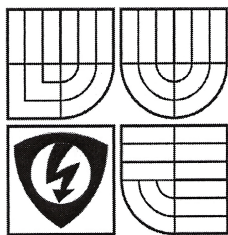
MASTER'S THESIS

Autor práce

AUTHOR

Bc. Tomáš HORÁČEK

Brno 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Elektroenergetika

Student: Horáček Tomáš, Bc.

Ročník: 2

ID: 89137

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Počítačová podpora výpočtů v energetice a nové trendy v simulacích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- Požadavky na počítačovou simulaci
- Současné programové produkty zaměřené na energetiku
- Problematické okruhy a omezení výpočetních algoritmů
- Metody výpočtu ustálených chodů sítí, přechodových jevů, zkratů, harmonická analýza a jejich zpracování na počítači

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 17.12.2007

Termín odevzdání: 28.5.2008

Vedoucí projektu: Ing. Petr Baxant, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš Horáček
Bytem: Dolní Přím 68, 503 16 Dolní Přím
Narozen/a (datum a místo): 21.9.1983, Chlumec nad Cidlinou

(dále jen "autor")

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 60200 Brno 2
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

(dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Počítačová podpora výpočtů v energetice a nové trendy v simulacích

Vedoucí/školitel VŠKP: Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav: Ústav elektroenergetiky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě - počet exemplářů 1
- elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

HORÁČEK, T. *Počítačová podpora výpočtů v energetice a nové trendy v simulacích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Baxant, Ph.D.

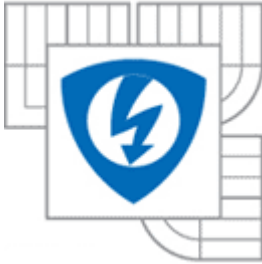
Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zároveň bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Baxantovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Počítačová podpora výpočtů v energetice, nové trendy v simulacích

Bc. Tomáš Horáček

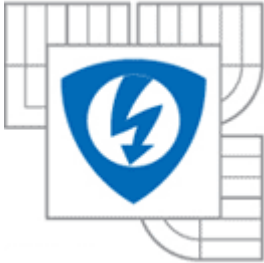
vedoucí: Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2008

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Computer aided calculations for energetics and new trends in simulations

Bc. Tomáš Horáček

Supervisor: Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Brno University of Technology, 2008

Brno

ABSTRAKT

Počítačová podpora výpočtů se v současné době velmi rozvíjí a díky stále výkonnějším počítačům a sofistikovanějším simulátorům je možné modelovat čím dál složitější problémy ve stále větším množství inženýrských oborů. Také v elektroenergetice se simulace a simulační programy využívají čím dál častěji. Používají se při návrhu nebo kontrole sítí a při testování různých provozních stavů včetně poruch.

KLÍČOVÁ SLOVA: Simulace; přenosové sítě; přechodné jevy; elektroenergetika; modelování; ATPDraw; PSCAD; DYNAST; DYMOLA

ABSTRACT

Computer aided calculations are booming nowadays and thanks to more powerful computers and sophisticated simulators we are able to modelling more and more complex problems in much more engineering domains. Also in power engineering are are simulators used more frequently. They are used for or checking transmission lines and in testing different kinds of working states including fails.

KEY WORDS: Simulation; transmissstion lines; transient effects; power engineering; modelling; ATPDraw; PSCAD; DYNAST; DYMOLA

OBSAH

1 Úvod.....	14
2 Základní pojmy.....	15
3 Požadavky na počítačovou simulaci.....	18
4 Programové produkty zaměřené na energetiku.....	20
4.1 ATPDraw.....	20
4.2 DYMOLA.....	21
4.3 DYNAST.....	21
5 Simulační program PSCAD.....	23
5.1 Instalace a první spuštění.....	23
5.2 Pracovní prostředí.....	24
5.2.1 Hlavní menu, nástrojová lišta a lišty se součástkami.....	24
5.2.2 Pracovní a výstupní okno.....	24
5.2.3 Modelovací plocha.....	24
5.3 Ovládání programu a jeho základní vlastnosti.....	25
5.3.1 Přidávání komponent.....	25
5.3.2 Propojování jednotlivých prvků.....	26
5.3.3 Grafy a měřidla.....	26
5.4 Shrnutí a postřehy.....	28
6 Srovnání programu PSCAD s konkurencí.....	29
6.1 Snadnost použití a přehlednost.....	29
6.2 Množství prvků.....	29
6.3 Možnost editace jednotlivých prvků.....	30
6.4 Pořizovací náklady.....	30
6.5 Práce s výstupními daty.....	31
6.6 Vhodnost pro modelování a simulaci v energetice.....	31
6.7 Celkové srovnání.....	32
7 Specifické úlohy modelované v energetice.....	33
7.1 Elektrické stroje.....	33
7.1.1 Generátory a motory.....	33
7.1.2 Transformátory.....	33
7.2 Harmonická analýza.....	33
7.3 Přejížděvé děje.....	34
7.4 Simulace sítě.....	34
7.4.1 Minimalizace ztrát.....	34
7.4.2 Stabilita sítě.....	34
7.4.3 Zemní spojení.....	34
7.4.4 Zkratové poměry.....	35
8 Omezení výpočetních algoritmů.....	36
8.1 Výpočetní algoritmus programu DYMOLA.....	36
8.2 Výpočetní algoritmus programu DYNAST.....	36
8.3 Výpočetní jádro programu PSCAD.....	37
8.4 Výpočetní algoritmus programu ATPDraw.....	38
8.5 Rozdíly mezi EMTDC a EMTP početními jádry.....	38
9 Metody výpočtu vybraných problémů v energetice.....	40
9.1 Ustálený chod sítě.....	40
9.2 Přejížděvé jevy.....	40
9.3 Zkraty.....	41

9.3.1	Metoda souměrných složek.....	41
9.3.2	Obecná metoda výpočtu zkratových proudů.....	41
9.4	Harmonická analýza.....	41
10.	Zpracování vybraného problému na počítači.....	43
10.1	Zadání simulovaného problému.....	43
10.2	Simulace pomocí programu ATPDraw.....	44
10.2.1	Tvorba schématu a zadávání hodnot.....	44
10.2.2	Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů.....	44
10.3	Simulace pomocí programu DYMOLA.....	45
10.3.1	Tvorba schématu a zadávání hodnot.....	45
10.3.2	Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů.....	45
10.4	Simulace pomocí programu DYNAST.....	46
10.4.1	Tvorba schématu a zadávání hodnot.....	46
10.4.2	Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů.....	46
10.5	Simulace pomocí programu PSCAD.....	47
10.5.1	Tvorba schématu a zadávání hodnot.....	47
10.5.2	Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů.....	48
10.6	Přehled nasimulovaných průběhů.....	48
10.6.1	Průběhy fázových napětí před místem zkratu.....	48
10.6.2	Průběhy proudů v jednotlivých fázích před místem zkratu.....	50
10.7	Poznátky z používání daných simulačních programů.....	52
11.	Závěr.....	53
	Použitá literatura.....	54

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 4-1 Hlavní okno programu ATPDraw.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 4-2 Hlavní okno programu Dymola.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 4-3 Hlavní okno programu DYNAST.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 5-1 Pracovní prostředí programu PSCAD.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 5-2 Ukázka grafu Overlay Graph.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 5-3 Ukázka grafu Stacked Polygraph.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5-4 Ukázka grafu XY Plots.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 5-5 Ukázka fázorového diagramu Phasormeters.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 8-1 Simulátor DYNAST [9].....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 8-2 EMTDC jádro [13].....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 10-1 Schéma simulované sítě.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 10-2 Rozmístění vodičů na stožáru.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 10-3 Model sítě v programu ATPDraw.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 10-4 Model sítě v programu DYMOLA.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 10-6 Model sítě v programu PSCAD.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-7 Modelovaný sloup v programu PSCAD.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 10-8 ATPDraw – fázová napětí na konci vedení.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 10-9 DYMOLA – fázová napětí na konci vedení.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 10-10 DYNAST – fázová napětí na konci vedení.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 10-11 PSCAD – fázová napětí na konci vedení.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 10-12 ATPDraw – průběhy fázových proudů.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 10-13 DYMOLA – průběhy fázových proudů.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 10-14 DYNAST – průběhy fázových proudů.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 10-15 PSCAD – průběhy fázových proudů.....</i>	<i>52</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 6-1 Celkové srovnání</i>	32
<i>Tab. 10-1 Parametry soustavy</i>	43
<i>Tab. 10-2 Parametry vedení</i>	43

1 ÚVOD

V dnešní době se bez počítačů již neobejde žádné odvětví nebo obor lidské činnosti. Počítače ovládají drtivou většinu zařízení, se kterými se v každodenním životě setkáváme, tak proč jejich schopnosti nevyužít i pro naše potřeby. Počítače totiž dokáží počítat mnohem rychleji, přesněji a levněji než nejschopnější člověk, také proto se stále častěji používají pro výpočty a simulace v různých odvětvích lidské činnosti.

Ani elektroenergetika není výjimkou a při navrhování nebo kontrole sítí se v hojné míře používají různé modelovací a simulační programy. Počítačová podpora výpočtů umožňuje v relativně krátké době vyzkoušet mnoho variant nastavení počítané sítě a její chování. Díky simulátorům je možné bezpečně zkoušet a testovat různé provozní stavy zařízení a sítí, včetně poruch, bez rizika poškození nebo i zničení skutečného systému. Tímto způsobem tedy počítačové modelování šetří čas i peníze.

Vzhledem k množství a rozmanitosti modelovacích a simulačních programů se zaměřím pouze na několik nejznámějších. Vybral nejen komerční (placené) programy, ale i jejich volně šiřitelné (neplacené) alternativy. Do výběru se přitom dostaly simulátory přímo určené pro modelování v elektroenergetice i univerzální víceoborové simulační programy.

2 ZÁKLADNÍ POJMY

Před vlastním popisem programů a dalším textem je nejprve třeba vysvětlit a definovat nejdůležitější pojmy ohledně modelování a simulací. To je nutné pro vyvarování se případným neshodám s terminologií uváděnou v jiné literatuře.

Model

V běžné řeči se jedná spíše o jakousi předlohu, v simulaci je tento termín používán pro analogii mezi dvěma systémy (modelovaný a modelující). Vztah těchto dvou systémů je dán tím, že ke každému prvku modelovaného systému je přiřazen prvek modelujícího systému, každému prvku je přiřazen určitý atribut a každému atributu je přidělena určitá relace. Můžeme také mluvit o elementárním modelu, který už dále nebudeme dělit, a o globálním modelu, který se skládá z několika elementárních částí. Mezi modely existují jednak části základní, bez kterých výsledný systém nemůže pracovat, tak i části doplňkové, které zlepšují celkovou funkčnost daného systému.

Modelování

Pod pojmem modelování si představujeme činnost, při které získáváme informace o jednom systému prostřednictvím jiného systému – modelu. Při této činnosti při nahrazujeme zkoumaný systém jeho modelem, který svými parametry a chováním odpovídá skutečnému (testovanému) systému.

Modelování provádíme kvůli rychlému a levnému zkoumání různých systémů na základě jejich modelů. Je výhodnější, mnohem rychlejší a v některých případech i jediným bezpečným způsobem jak experimentovat s některými reálnými systémy. Mezi modelování patří tvorba všech druhů modelů (fyzikálních, matematických, statických i dynamických).

Celý proces modelování můžeme shrnout do několika základních kroků:

1. Formulace problému
2. Základní návrh a tvorba modelu
3. Verifikace a validace
4. Simulace a analýza výsledků

Modelový čas

Jedná se o čas, který tvoří časovou osu modelu. V simulacích rozlišujeme, zda se jedná o reálný, zpomalený nebo zrychlený modelový čas. [1]

Reálný čas

Jako reálný čas označujeme čas, ve kterém probíhá skutečný děj v reálném systému, kde časové měřítko strojového času přesně odpovídá s časovému měřítku danému systému ve skutečnosti. Je to čas nezrychlený, nezpomalený, a proto reálným časem můžeme nazvat čas momentálně probíhající. [1]

Strojový čas

Pod tímto pojmem si lze představit čas potřebný pro výpočet programu. Jeho délka je závislá na struktuře (složitosti) modelovaného systému a parametrech použitého programu. Na druhou stranu však nezávisí na hodnotách, kterých nabývá modelový čas. [1]

Simulace

Simulací označujeme techniku, kdy nahrazujeme zkoumaný systém jeho modelem, přičemž vystavením tohoto modelu různým situacím získáváme informace o zkoumaném systému. Tyto situace mohou být realizovány různými vstupními veličinami nebo parametry simulačního modelu. Simulace tak určuje chování skutečných systémů v imaginárním (abstraktním) prostoru a je to vlastně experimentování s modely kvůli určení vlastností reálného systému. Běžnou součástí simulace je i ověření (verifikace) modelu, kdy kontrolujeme, zda se ve známých situacích chová stejně jako skutečný systém.

Simulační běh

Během simulace opakovaně řešíme daný model a provádíme simulační běhy, které jsou dány určitými parametry modelu a podněty z okolí. Během každého simulačního běhu vyhodnocujeme výstupní data ze simulačního modelu, což jsou vlastně jeho reakce na podněty z okolí. Množství simulačních běhů při simulaci závisí na druhu simulačního postupu, abychom získali dostatečné množství informací pro následné vyhodnocování, který pomocí daného modelu simulujeme.

Systém

Systém chápeme jako soubor elementárních částí, různých prvků systému, které mají mezi sebou určité vazby. Protože model je také určitý systém, využíváme této podobnosti při modelování.

Počítačové modelování

Pod tímto pojmem si představujeme vytváření modelů pomocí nějakého, k tomu určeného, programu v počítači. Postup při modelování a vlastnosti modelu přitom závisí na druhu a kvalitách použitého programu. U tohoto druhu modelování můžeme buď přímo pracovat s jednotlivými objekty, nebo lze také pracovat přímo, kdy objekty a jejich chování sami naprogramujeme.

Prvek systému

Prvek systému považujeme za základní a dále již nedělitelnou složku, pomocí které definujeme další části systému. U jednotlivých prvků můžeme také zadávat jejich vzájemné vazby a další parametry určující chování celého modelovaného systému.

Validita modelu

V průběhu simulace neustále porovnáváme známé a získané informace, abychom mohli zhodnotit validitu (platnost) daného modelu. Během ověřování validity se snažíme dokázat, že použitý model odpovídá modelovanému systému. Ve skutečnosti však nemůžeme validitu modelu absolutně prokázat, proto platnost modelu uvažujeme relativně s jistou hladinou spolehlivosti umožňující přijmout výsledky a závěry vyvozené z modelu. Pokud model nemůžeme uznat jako validní (jeho chování neodpovídá originálu), musíme provést modifikace vedoucí k validitě modelu. Tyto modifikace provádíme s přihlédnutím k výsledkům předchozích simulací, může se jednat o úpravu programu nebo změnu některých parametrů modelu.

3 POŽADAVKY NA POČÍTAČOVOU SIMULACI

Vlastnosti počítačového simulačního programu závisí především na použitém programovacím jazyku, ve kterém je napsán výpočetní algoritmus. Obecně lze říci, že požadavky na simulaci vychází z postupů tvorby početních algoritmů a jejich modelů a dají se shrnout do následujících bodů.

Určení modelu a režimu činnosti

Nástroje pro řízení simulace jsou většinou odděleny od samotného popisu modelu zkoumaného systému. Knihovny modelů jsou totiž většinou dané autorem programu, nebo upravené uživatelem, a potom už zbývá vybrat správný model, se kterým bude pokus probíhat. Pokud není režim činnosti simulátoru určen už při popisu modelu, je nutné, aby jej šlo dodatečně upřesnit.

Nastavení počátečních podmínek

Simulační algoritmus musí být schopen umožnit nastavení počátečních hodnot v libovolném místě modelu a zvládnout i jejich rozšíření nebo upravení. Kvůli tomu by měl výpočetní algoritmus obsahovat inicializační fázi (zvláště vyhrazený simulační běh) a po její dokončení by měl umožnit spuštění dalšího simulačního běhu.

Nastavení chování okolí

Při simulování složitých soustav je většinou nutné, aby okolí (okolní systémy) mohly reagovat na chování modelů, aby se simulační experiment mohl odvíjet (větvit) v závislosti na stavu modelů a podobně. Pro tento případ by měl simulační algoritmus mít prostředky k nastavení podmínek, při kterých má k danému větvení dojít a kdy ne. Tuto podmínku lze realizovat například určitou hodnotou v některém místě simulovaného modelu, přičemž k definování těchto větvení se používají různé podmíněné příkazy. [1]

Při modelování jednoduchých soustav většinou není nutné definovat přesnou odezvu okolí, proto se někdy mohou na vstupu použít různé generátory vzorů nebo předem nadefinované a naprogramované vzory.

Zobrazení hodnot proměnných veličin

Simulační program by měl umožnit zobrazení hodnot libovolných proměnných ve stavových okamžicích modelového času. Intervaly mezi jednotlivými výpisy těchto hodnot mohou být konstantní nebo proměnlivé. Simulační algoritmus také může obsahovat příkaz na vypisování hodnot proměnných při každé jejich změně. Tyto vypisované hodnoty lze také v některých simulačních programech nechat ukládat do výstupních souborů, ze kterých je lze kdykoliv znovu načíst.

Se zobrazováním hodnot souvisí také trasování, kdy má uživatel možnost nastavit body pro zastavení programu na libovolné adrese a zobrazit požadované informace. [1]

Konverzační režim

U progresivních počítačových simulačních systémů lze přecházet ze simulačního do konverzačního režimu, ve kterém může uživatel zobrazovat a upravovat různé hodnoty. K přechodu ze simulačního do konverzačního režimu může dojít díky zvláštnímu příkazu nebo po dosažení zvláštního bodu zastavení. Pro zpětný přechod do simulačního režimu musí také existovat zvláštní příkaz. Po tomto návratu musí být možné v simulaci pokračovat nebo danou simulaci znovu začít od začátku. [1]

Chybová hlášení

Během chodu simulace, nebo i při odladování modelované soustavy, mohou vznikat chybové stavy. Simulační program by měl umět tyto stavy detekovat a zaslat uživateli upozornění ve formě chybového hlášení, případně i návrh jak danou chybu odstranit.

Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení výsledků je vlastně srovnání výsledků dosažených při simulaci s požadovanými hodnotami. Toto vyhodnocení se může provádět ručně nebo zpracovávat, k tomu určeným, pomocným programem. Výsledky je přitom možné uvádět ve formě tabulek, grafů, souborů se vstupními a výstupními hodnotami a podobně.

4 PROGRAMOVÉ PRODUKTY ZAMĚŘENÉ NA ENERGETIKU

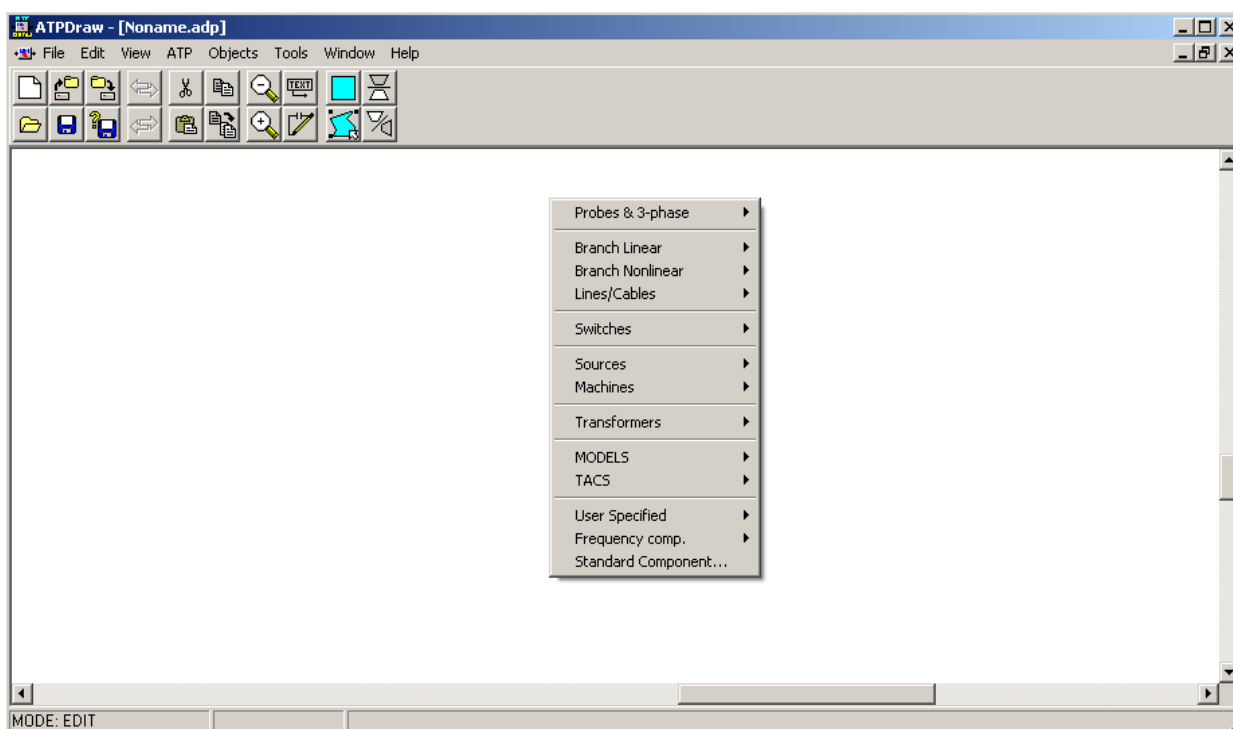
Z velkého množství simulačních programů, které lze použít pro modelování problémů v energetice, jsem vybral několik známých zástupců. Jedná se jak o komerční programy (DYMOLA, PSCAD), tak i o jejich volně šiřitelné (zdarma) konkurenty (ATPDraw, DYNAST, přičemž jsem se více zaměřil na simulační program PSCAD.

4.1 ATPDraw

Prvním vybraným je volně šiřitelný simulační program ATPDraw (Alternative Transient Program). Jedná se o grafické rozhraní pro ATP verzi programu EMTP (Electromagnetic Transients Program) pracující v prostředí MS Windows. Bylo vyvinuto organizací EFI, která se později přejmenovala na SINTEF Energy Research. Vývoj tohoto programu byl financován firmou Bonneville Power Administration se sídlem v USA. Obchodní značka ATPDraw™ je chráněna a náleží organizaci SINTEF Energy Research, sídlem v Norském Trondheimu. [6]

ATPDraw obsahuje mnoho modelů zahrnující točivé stroje, transformátory, bleskojistky, přenosové vedení a kabely a mnoho dalších. S tímto programem je možné simulovat komplexní sítě, řídicí systémy a spínací operace, elektroenergetické příslušenství i zařízení s nelineárními charakteristikami. [6]

Je snadno ovladatelné (způsobem Drag&Drop), objektově orientované a obsahuje většinu nejčastěji používaných komponent potřebných pro modelování a řešení úloh v energetice. Je uživatelsky přívětivý a vhodný nejen pro výukové účely, ale také pro odborníky.



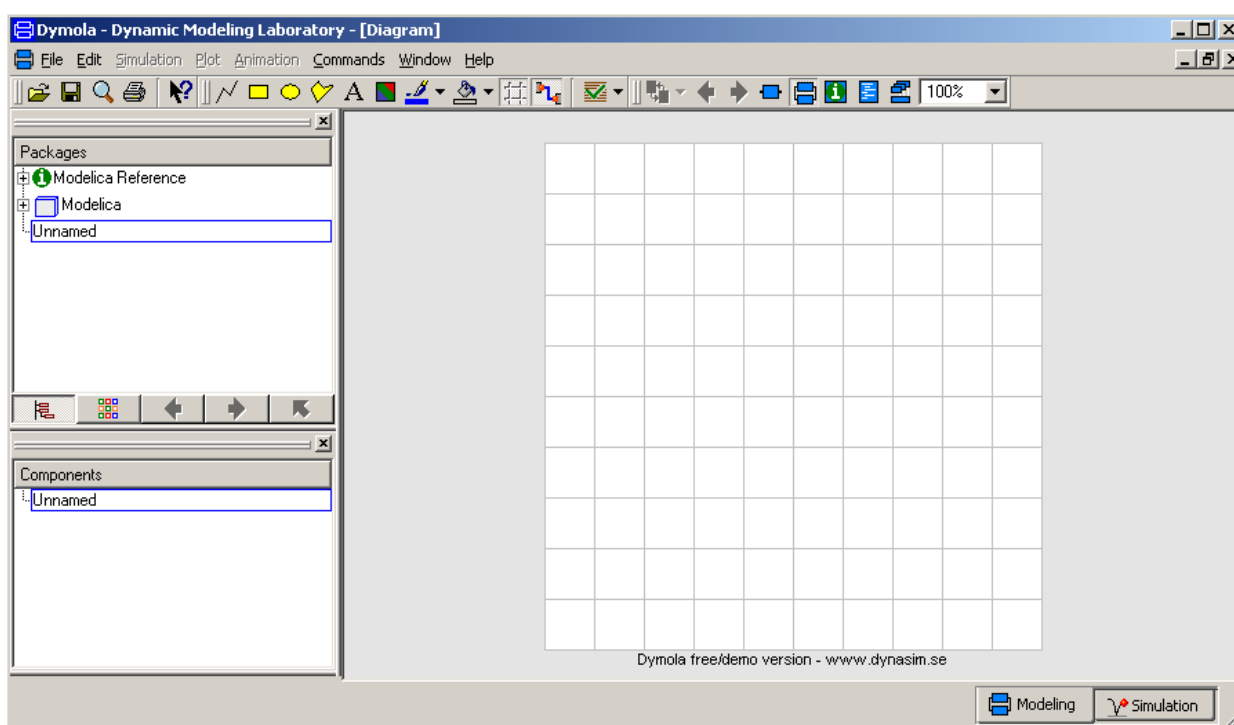
Obr. 4-1 Hlavní okno programu ATPDraw

4.2 DYMOLA

DYMOLA (**D**ynamic **M**odeling **L**aboratory) je kompletní nástroj pro modelování a simulaci komplexních systémů z mnoha inženýrských oblastí. Obsahuje knihovny z mnoha různých oborů, díky kterým lze sestavit dokonalejší modely soustav a dosáhnout při simulacích lepších výsledků více odpovídajících realitě.

Umožňuje modelování dynamických systémů od chemie přes energetiku až po mechaniku, testování řídicích systémů pro integrovaným modelům. Zvyšuje konstrukční produktivitu a snižuje potřebu tvorby skutečných prototypů.

Mezi hlavní výhody DYMOLy patří rychlé sestavení grafických modelů, rychlejší simulování pomocí symbolického preprocesingu, umožňuje uživatelské definování (úpravu a tvorbu) modelů, používá 3D animace pro názornou ukázkou chodu a funkce simulovaného zařízení a simuluje v reálném čase. [12]



Obr. 4-2 Hlavní okno programu Dymola

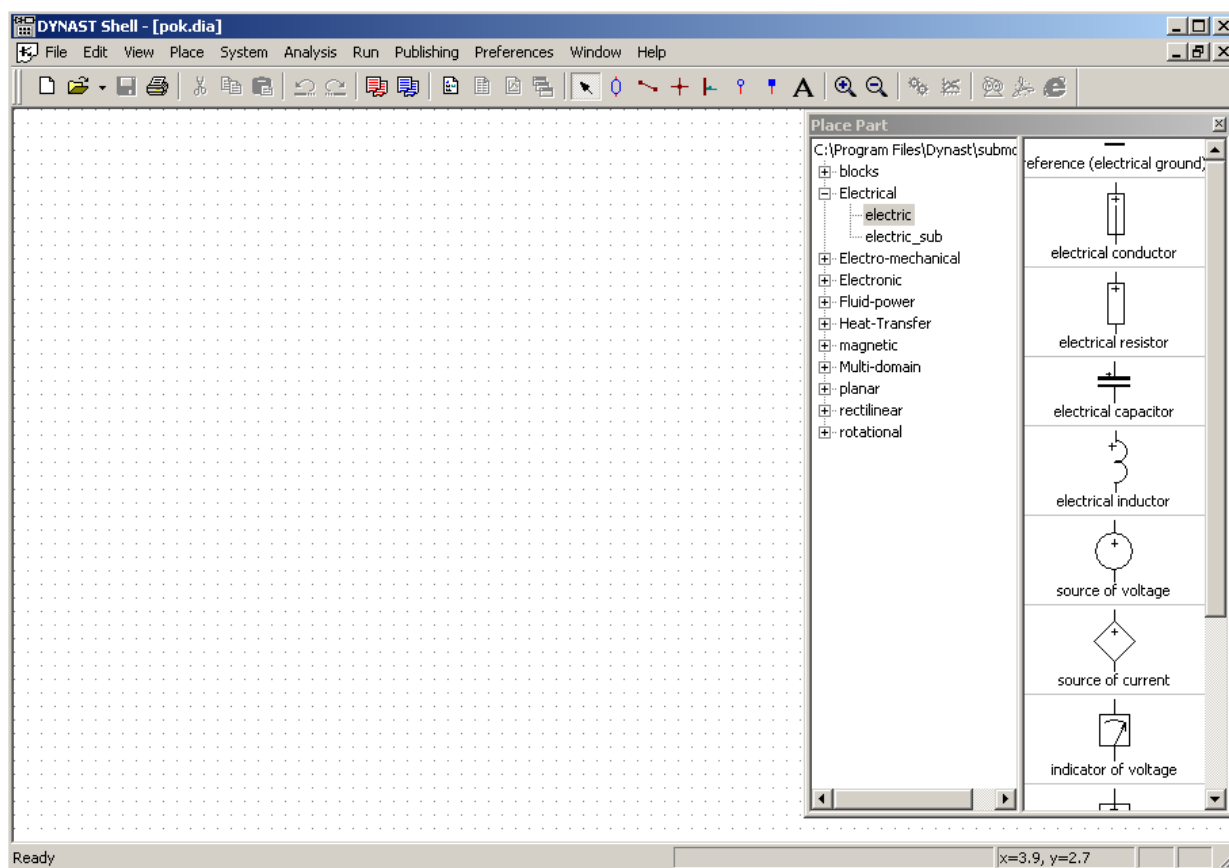
4.3 DYNAST

Posledním z vybraných simulačních programů je DYNAST. Jedná se o všestranný simulační software pro modelování a analýzu lineárních i dynamických systémů s přehledným pracovním prostředím. Podobně jako DYMOLA obsahuje knihovny pro modelování a simulaci v různých oborech a je to vlastně sada nástrojů pro modelování a simulaci.

Dokáže účelně modelovat, simulovat a analyzovat lineární i nelineární dynamické systémy současně. Umožňuje popsat dynamické systémy několika způsoby, které lze mezi sebou libovolně kombinovat:

- **sadou rovnic** – v tomto případě funguje jako víceúčelový řešitel rovnic, který nevyžaduje žádný blokový diagram soustavy
- **blokovým diagramem** – zde Dynast funguje jako klasický simulátor
- **vícepólovým diagramem struktury systému**, který přímo odpovídá skutečnému analyzovanému systému [9]

Tento program nevyžaduje žádné znalosti počítačového programování, používá numerické početní metody a mnoho operací je automatizováno, což také přispívá k jeho uživatelské přívětivosti. [9]



Obr. 4-3 Hlavní okno programu DYNAST

5 SIMULAČNÍ PROGRAM PSCAD

PSCAD (**P**ower **S**ystem **C**omputer **A**ided **D**esign) je grafická nástavba ke známému EMTDC početnímu jádru, která uživateli umožňuje vytvářet různé obvody, simulovat je, vyhodnocovat a spravovat data v uživatelsky přívětivém grafickém prostředí. Umožňuje zobrazovat průběhy sledovaných veličin, přičemž uživatel může měnit nastavení obvodu během simulace a přímo vidět výsledky těchto změn.

Obsahuje obsáhlou databázi s předprogramovanými a otestovanými modely od základních pasivních prvků až po komplexní modelové systémy. Pokud některý model neexistuje, nebo nevyhovuje, je možné vytvořit si vlastní v intuitivním grafickém prostředí pomocí utility "Design Editor". [5]

Rozsah jeho využití je velmi široký a lze jej použít pro mnoho účelů. S úspěchem se používá ve školství při výuce, výzkumu, při navrhování, uvádění do provozu a řízení sítí, a tak podobně.

5.1 Instalace a první spuštění

Pro svůj chod tento program potřebuje počítač s minimálně 256MB operační paměti RAM a procesorem alespoň 500MHz. Pro rychlejší práci ale doporučuji instalovat tento program na výkonnější počítač. Výrobce doporučená konfigurace je 1GB operační paměti RAM a procesor 3GHz.

Doporučené operační systémy pro testovanou verzi 4.2.1. jsou pouze Windows 2000 a Windows XP. Ostatní platformy jako například Windows 95/98, Windows Vista, Macintosh nebo GNU/Linux nejsou v této verzi zatím podporovány. Pro podporu nové verze operačního systému Windows je třeba nainstalovat opravný balíček od výrobce PSCADu.

Před vlastní instalací PSCADu je třeba nainstalovat Fortran Compiler (překladač) pro vytváření a simulaci projektů. Pokud nainstalujete volně dostupnou verzi EGCS/GNU Fortran 77, která stačí pro běžné použití tohoto programu, výrobce upozorňuje na možná omezení při simulování složitějších systémů. Také proto, místo výše zmíněného překladače, je doporučeno nainstalovat komerční varianty překladače jako jsou Digital Visual Fortran, Compaq Visual Fortran nebo Intel Visual Fortran.

Vlastní instalace programu je velmi snadná - stačí pouze souhlasit s licenční smlouvou a podmínkami použití a několikrát kliknout na tlačítko "Next".

Po instalaci se na ploše nevytvoří žádný zástupce pro rychlé načtení programu, odkazy pro spuštění jsou pouze v nabídce START -> Programy -> PSCAD a tam stačí vybrat Vaši licenci. Po spuštění je třeba opět souhlasit s příslušnou licenci.

5.2 Pracovní prostředí

Pracovní prostředí je velmi jednoduché a skládá se z několika základních částí. Jedná se o hlavní menu, hlavní nástrojovou lištu, pracovní okno (Workspace), lišty se součástkami a výstupní okno.

5.2.1 Hlavní menu, nástrojová lišta a lišty se součástkami

Tyto tři základní části pracovního prostředí není třeba dlouze popisovat. V hlavním menu naleznete položky pro nastavení pracovního prostředí, nastavení simulace, možnosti zobrazení, položky pro načtení a ukládání projektů a podobně.

Hlavní nástrojová lišta obsahuje nejběžnější tlačítka pro zrychlení práce jako jsou “Nový projekt“, “Uložit“, “Tisk“ a podobně. Ke stejným funkcím se však lze dostat i pomocí hlavního menu, jen mnohem pomaleji.

Lišty se součástkami umožňují rychlý přístup k nejběžnějším obvodovým prvkům při modelování obvodu. Ostatní obvodové prvky je nutné vybírat přímo z hlavní knihovny.

5.2.2 Pracovní a výstupní okno

Díky pracovnímu oknu (Workspace) máte přehled nad všemi projekty a jejich načtenými knihovnami. Mimo to umožňuje organizovat datové soubory, zobrazovat zařízení, vybírat komponenty a provádět i další operace v přehledném a snadno ovladatelném prostředí. V pracovním okně lze pomocí záložek zobrazit čtyři další sekce: Projects, Runtime TLines/Cables, Files.

Runtime (Provozní sekce) slouží k práci s provozními objekty jako jsou grafy, výstupní kanály a podobně. Při práci můžeme používat různé druhy zobrazení. Lze hierarchicky zobrazit všechny provozní objekty (View Modules), seřadit je do odpovídajících skupin (View Groups) a zobrazit seznam rádiových spojení (View radio Links). Bez ohledu na nastavení zobrazení, každý objekt můžeme ovládat přímo jednoduchým “dvojklikem“ myši.

Sekce **TLines/Cables** je zvláště určená pro uspořádání venkovního přenosového vedení a kabelových vedení. Každá položka v seznamu představuje jednotlivé vedení v navrženém projektu.

Files poskytuje celkový přehled nad všemi soubory ve složce s projektem jako jsou data z překladače a výstupní data a podobně. Musím podotknout, že tyto tři sekce (Runtime, TLines/Cables a Files) jsou platné pouze pro momentálně aktivní projekt.

Výstupní okno slouží pro zpětnou vazbu a řešení problémů při simulacích, zobrazuje varování a chybová hlášení při běhu simulačního programu.

5.2.3 Modelovací plocha

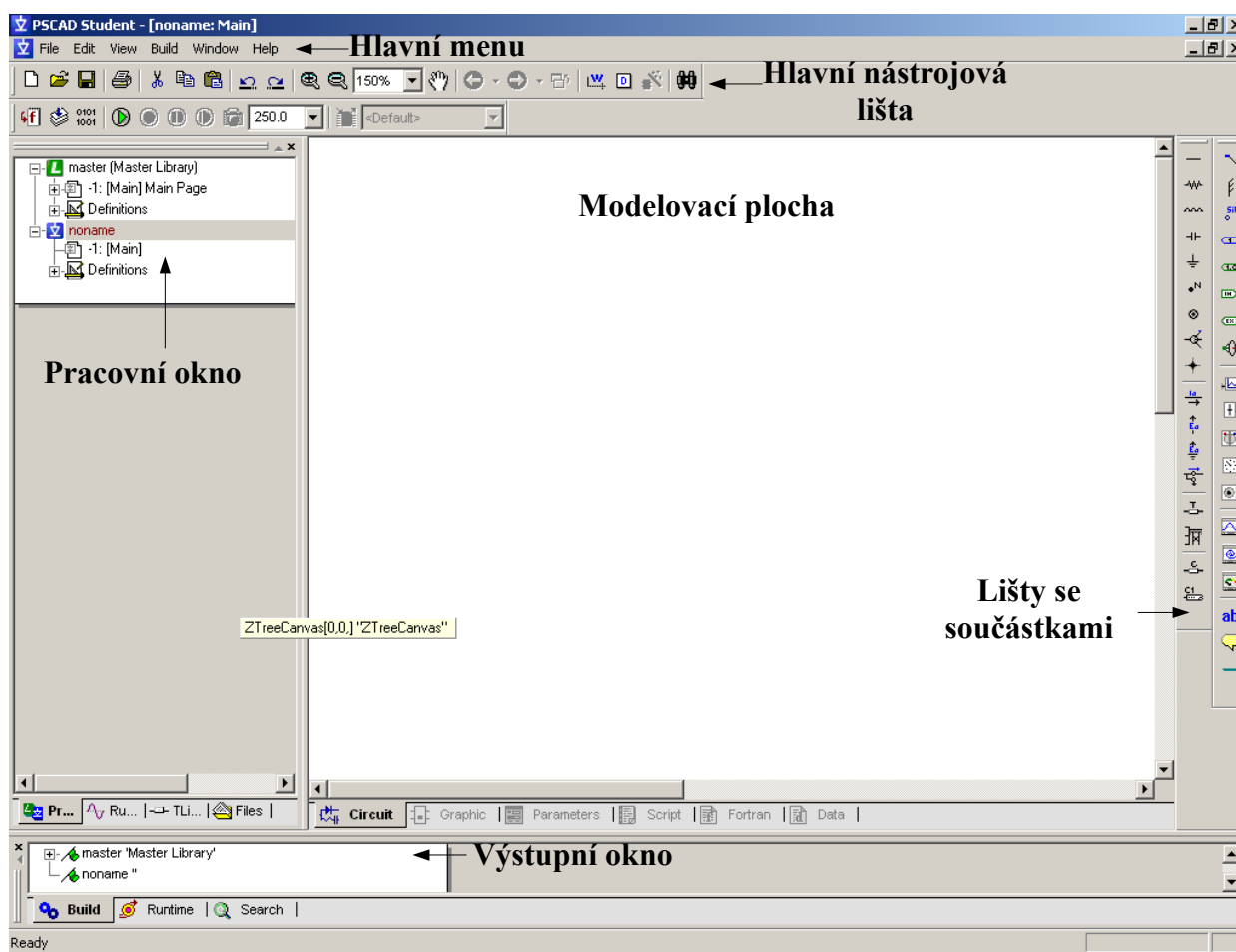
Modelovací plocha je nejdůležitější část pracovního prostředí tohoto programu a kde se navrhuje naprostá většina projektů. Kvůli přehlednosti je opět rozdělena do šesti podřazených oken (záložek).

Záložky **Graphics**, **Parameters** a **Script** jsou aktivní pouze při editaci a úpravě některého z parametrů libovolného prvku. **Graphics** slouží k editaci vzhledu komponent, **Parameters** k nastavení parametrů a **Script** pro úpravu definičního kódu.

Circuit je první okno, které se otevře po načtení projektu a kde se navrhují všechny simulované obvody.

Záložka **Fortran** umožňuje nahlédnout do souboru překladače, který odpovídá momentálně načtenému modulu.

Okno **Data** slouží k nahlédnutí do vstupních dat pro aktuálně načtený modul.



Obr. 5-1 Pracovní prostředí programu PSCAD

5.3 Ovládání programu a jeho základní vlastnosti

V této kapitole se zmíním o způsobu ovládání programu PSCAD, některých základních operacích a jeho vlastnostech.

5.3.1 Přidávání komponent

K přidání součástky (komponenty) do projektu lze provést dvěma způsoby. Prvním z nich je výběr potřebného prvku z lišty se součástkami a přesunutím na modelovací plochu. Tento

způsob je sice velmi rychlý, ale není vždy nejvhodnější. Lišta se součástkami totiž obsahuje pouze některé základní prvky, které ve většině modelovaných případech nestačí.

Z tohoto důvodu je proto vhodnější používat přímý výběr z hlavní knihovny umístěné v pracovním okně. Z této knihovny můžeme vybrané součástky, pomocí funkce “Copy“, kopírovat do projektu nebo otevřít sekci “Definitions“ a komponenty způsobem Drag&Drop (uchop a pusť) přesouvat na modelovací plochu.

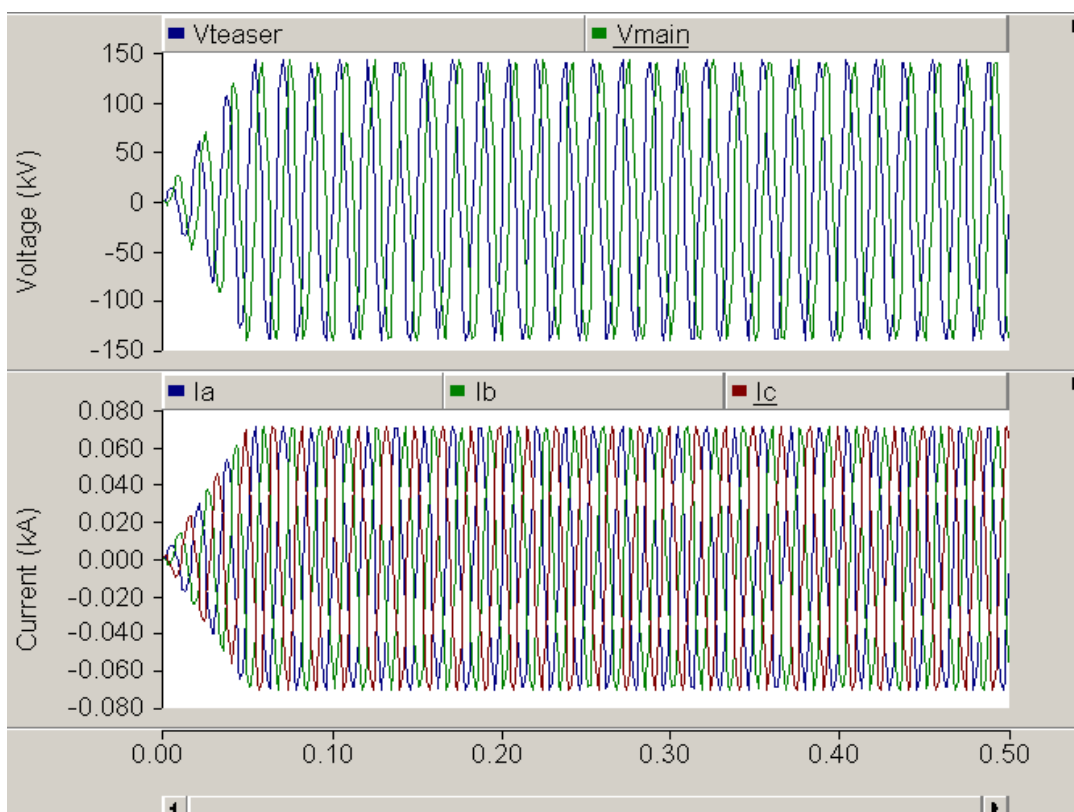
5.3.2 Propojování jednotlivých prvků

Vytváření propojených mezi prvky je řešeno netradičně pomocí dalšího prvku – Wire (drát). Toto řešení je netradiční v tom směru, že u většiny konkurenčních modelovacích programů stačí kliknout myší na uzel součástky a táhnout k dalšímu uzlu. V programu PSCAD je však nutné nejprve vybrat komponentu Wire, tu položit na daný prvek a poté roztáhnout k dalšímu prvku. Zalomení se provádí přidáním Wire Vertex (vrcholu drátu) a následným tažením v potřebném směru. Toto zalomení propojovacího drátu je možné pouze v úhlu 90°.

5.3.3 Grafy a měřidla

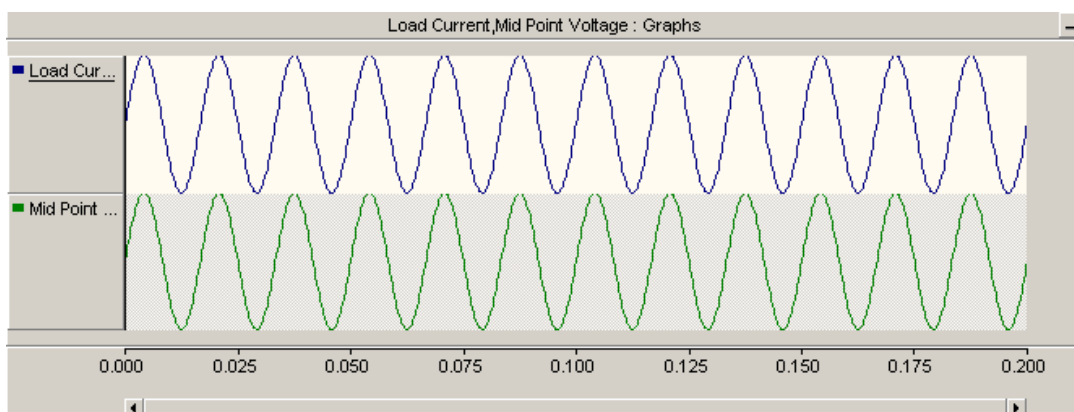
Grafický výstup dat ve formě grafu je velmi důležitý prvek při každé simulaci, díky kterému si můžeme udělat okamžitou představu o chování obvodu. Simulační program PSCAD umožňuje vytvářet několik základních druhů grafů (Overlay Graph, Stacked Polygraf, XY Plots a Phasometers). Měřidla sledovaných veličin jsou také neméně důležité při simulaci.

Overlay Graph je nejběžnější způsob vykreslování grafů v PSCADu, který umožňuje zobrazení více průběhů v jednom okně i zobrazení několika oken s grafy nad sebou.



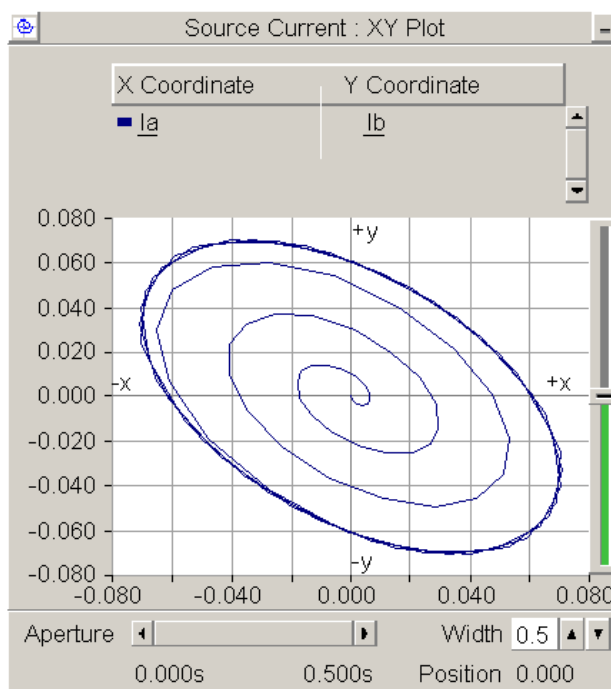
Obr. 5-2 Ukázka grafu Overlay Graph

Stacked Polygraph se používá pro zobrazení více průběhů naráz, kde každý průběh má svou vlastní část okna s vlastní sítí, a které jsou seřazeny jeden nad druhým.



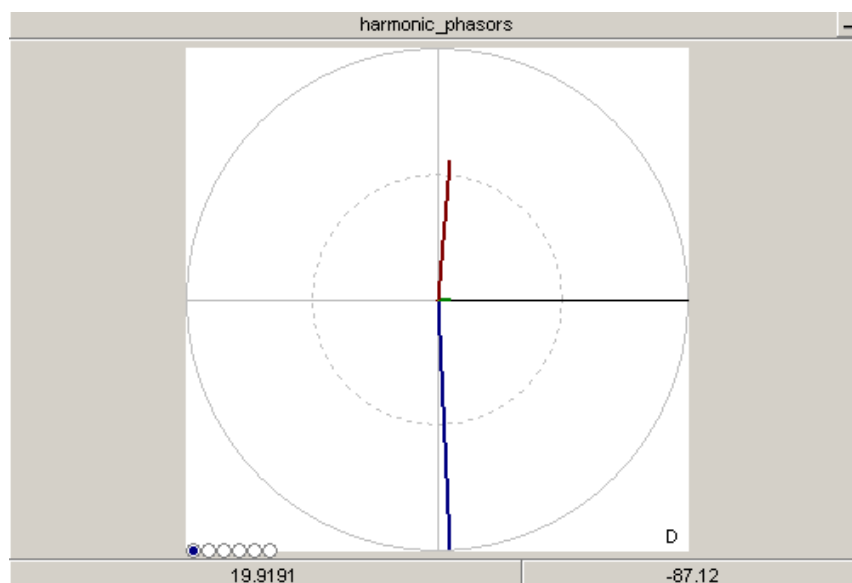
Obr. 5-3 Ukázka grafu Stacked Polygraph

XY Plots slouží pro porovnání jednotlivých průběhů (signálů) v osách X a Y, přičemž oba signály mají stejné časové měřítko.



Obr. 5-4 Ukázka grafu XY Plots

Phasormeters je speciální typ grafu pro vytváření fázorových diagramů (maximálně však šest fázorů v jednom diagramu) v polárních souřadnicích, které se dynamicky mění po čas běhu simulace.



Obr. 5-5 Ukázka fázorového diagramu Phasometers

Meters (měřidla) slouží, stejně jako grafy, pro zobrazení výstupních signálů z odpovídajících kanálů.

5.4 Shrnutí a postřehy

Simulační program PSCAD je velmi mocný nástroj pouze pro modelování v energetice, pro ostatní inženýrské okruhy není primárně konstruován. Tato specializace je pro energetiku nesporně výhodná a nezatěžuje uživatele při práci starostí o ostatními obory.

Jeho hlavní výhodou je, již výše zmiňovaná, specializace na jeden obor, díky čemuž obsahuje knihovny modelů pouze pro energetiku. Tyto knihovny jsou rozsáhlé a obsahují mnoho vhodných prvků. Pokud některý prvek přesto nevyhovuje, je možné upravit stávající nebo si vytvořit vlastní. Ovládání programu je z velké části velmi intuitivní, pouze některé činnosti jsou zde řešeny jinak, než je běžně u konkurence zvykem.

Mezi nevýhody bych rád zařadil to, že okna s grafy jsou společně s modelovaným obvodem na pracovní ploše. Kvůli lepší přehlednosti bych preferoval grafy v samostatné záložce nebo okně. Ani jejich samotná tvorba není v PSCADu příliš snadná. Pro zobrazení jediného průběhu je totiž nutné nejprve vložit na pracovní plochu okno grafu, do něj vložit některý z typů grafů, poté si načíst potřebná data na výstupním kanálu měřidla a nakonec je vložit do grafu.

Dále mi vadilo, že se při přesouvání objektů ve schématu automaticky neposouvaly propoje mezi prvky a tím se přerušil obvod. Jako další, dle mého názoru ne příliš praktickou vlastností PSCADu je to, že pro umístění a správnou funkci mnoha komponent je nutné vložit do schématu další modely. Například pro vložení měřidla do obvodu a získání jeho naměřených dat, je nutné vložit do schématu další dva prvky.

6 SROVNÁNÍ PROGRAMU PSCAD S KONKURENCÍ

Nejprve si musíme definovat hlavní vlastnosti a podmínky, podle kterých budeme jednotlivé simulační programy porovnávat. Srovnání bude spočívat v bodovém hodnocení vybraných vlastností v rozmezí 1 až 5 bodů. kdy 1 bod znamená nevyhovující a 5 bodů perfektní. Porovnávat budu snadnost použití, množství modelovacích prvků, možnost editace těchto prvků, možnosti práce s výstupními daty pořizovací náklady a vhodnost pro modelování v energetice. Jednotlivé sledované požadavky mají samozřejmě různou váhu důležitosti, proto jsem u vybraných kritérií přiděloval „extra body“ opět v rozmezí 1 až 5.

6.1 Snadnost použití a přehlednost

První z hodnocených kritérií je snadnost použití, pod kterou spadá přehlednost pracovního prostředí, uživatelská přívětivost a z toho plynoucí nároky na uživatele.

Zde jednoznačně kraluje program DYNAST, protože jeho ovládání, i uživatelské prostředí, je velmi jednoduché, a proto se hodí zejména pro začátečníky.

Na dalším místě se umístil simulační program PSCAD, což ale neznamená, že by jeho ovládání nebylo snadné. Za první dva nejsnáze ovladatelné programy se dostal proto, že umístění oken s grafy přímo na pracovní plochu s modelovaným obvodem, není příliš šťastné a pro přehlednost nejlepší řešení.

Co se ovládání týče, tak třetím nejlepším programem je ATPDraw. Modelování problémů je s ním velmi jednoduché, ale množství nastavitelných položek jej může činit méně přehledným. Dále chybí aktuální informace a hlášení chyb během simulace, a proto je hledání chyb při ladění modelovaného obvodu velmi obtížné.

Překvapivě se, ve srovnání uživatelské přívětivosti, nejméně přívětivý z této čtveřice modelovací program DYMOLA. Pracovní prostředí sice na první pohled vypadá jednoduše, ale vlastní práce s tímto programem není zdaleka tak jednoduchá jako u konkurence.

6.2 Množství prvků

Druhou sledovanou vlastností je množství modelovacích prvků, která souvisí s možnostmi simulování různých úloh. Hodnocení této vlastnosti je, dle mého názoru, spíše lákadlem na zákazníky. Je zřejmé, že čím je větší množství prvků (i z různých odvětví) v knihovně, tím jsou větší možnosti při modelování, na druhou stranu se tím program prodraží a vyhledání správného prvku může být pro uživatele obtížnější.

Zde je jasným favoritem simulační program DYMOLA, který obsahuje velmi mnoho prvků nejen z energetiky, ale i z dalších inženýrských odvětví.

Dále nejvíce prvků obsahuje PSCAD, který má také rozsáhlou knihovnu, ale pouze se součástkami vhodnými pro energetiku. Podobně rozsáhlé knihovny má i DYNAST, jenže ten na rozdíl od PSCADu zasahuje do několika inženýrských oborů.

Knihovnou s nejméně prvky disponuje program ATPDraw, nicméně na jeho schopnosti modelovat a simulovat problémy v energetice nemá tato skutečnost podstatný vliv. Jeho modely jsou totiž velmi univerzální, kdy pro jeden typ prvku stačí pouze jedna komponenta, u které měníme potřebné parametry.

6.3 Možnost editace jednotlivých prvků

Třetím požadavkem na simulační program je možnost editace jednotlivých prvků a tvorba nových komponent. Editací prvků není myšleno nastavení jejich parametrů (proměnných hodnot), ale úprava těchto prvků. Každý z hodnocených programů tvorbu a editaci nových prvků umožňuje, obrovské rozdíly jsou ve způsobu a obtížnosti této činnosti.

Nejsnadnější editaci a tvorbu nových prvků umožňuje ATPDraw, kde je tato možnost snadno přístupná a velmi intuitivní. Grafická editace vzhledu modelu je přitom přístupná přímo v okně, kde nastavujeme parametry komponenty.

Druhou pozici získala DYMOLA, kde tvorba komponent, dle mého názoru, není tak jednoduchá jako u ATPDraw, ale na druhou stranu je snazší než u zbývajících programů.

Dále se umístil DYNAST, kde je tato činnost možná pouze s určitou znalostí programovacího jazyku, protože jsem nenalezl grafický editor pro tvorbu komponent.

Na posledním místě se umístil, možná trochu neprávem, program PSCAD, který tvorbu nových modelů umožňuje, nicméně se mi nepodařilo tohoto průvodce spustit.

6.4 Pořizovací náklady

Dalším sledovaným kritériem jsou pořizovací náklady na simulační program, které mohou ovlivnit rozhodování menší firmy.

Zde je bezkonkurenční simulační program DYNAST, který je k dispozici ke stažení na internetu a zcela zdarma. Na druhou stranu je pro funkci bezplatné verze tohoto programu nutné připojení k internetu, protože hlavní početní jádro je umístěno na vzdáleném serveru. Tato skutečnost však není zásadní nevýhoda, protože v současnosti není připojení k internetu žádný problém. Pro Off-line modelování je nutné použít omezený Dynast Lite či Student Solver, nebo profesionální verzi (Dynast Profi Solver), jehož cenu se mi ovšem nepodařilo zjistit.

Simulační program ATPDraw je také k dispozici zdarma pro všechny, kteří se nepokoušeli prodávat některý z programů pro simulaci přechodových jevů.[6]

Pro plné využití všech vlastností programu PSCAD je třeba, kromě řádného zakoupení licence, ještě investovat finance do nákupu některé z komerčních variant překladače FORTRAN. Naneštěstí se mi neozval nikdo ze sales department výrobce tohoto programu s cenou za licenci, přesto odhaduji, že bude cena nižší než u programu DYMOLA.

Suverénně nejvyšší pořizovací náklady jsou na simulační program DYMOLA, který pro vzdělávací účely stojí 1600 euro a pro komerční účely (dle zaměření) až 6400euro.

6.5 Práce s výstupními daty

Čtvrtá sledovaná položka je možnost práce s výstupními daty pro další zpracování. Pod tímto pojmem si lze představit práci s grafy, možnost jejich exportu do obrázku a možnost výstupu výsledků do externího souboru.

Práce s výsledky je nejlepší v programu DYMOLA, s průběhy veličin v grafech s snadno pracuje a je možné jej exportovat jako obrázek. Simulace může mít náhled ve 3D animaci a výsledky simulace je možné uložit do textového souboru pro další zpracování. Modelovaný obvod je možné také uložit ve formě obrázku.

DYNAST v tomto ohledu také příliš nezaostává, protože grafy lze také exportovat do obrázku a i práce je s nimi snadná. Vymodelovaný obvod lze také vyexportovat do obrázku. Výsledky lze uložit do textového nebo postscriptového souboru pro další zpracování.

O překvapení se postaral simulační program PSCAD, který neumožňuje exportovat vymodelovaný obvod do obrázku, což bych u takto vyspělé aplikace očekával. Práce s grafy je snadná, ale pro uložení grafu do obrázku doporučuji co nejvíce zvětšit okno grafu a až poté jej uložit. Jinak bude mít vyexportovaný obrázek nízkou kvalitu (nízké rozlišení). Výsledky simulace se dají uložit do textového souboru pro další zpracování.

Simulační program ATPDraw také umožňuje uložit vymodelovaný obvod do obrázku, nicméně tento obrázek je příliš malý (má nízké rozlišení) a jeho výstupní velikost se mi nepodařilo v programu nastavit. Grafy s průběhy sledovaných veličin se musí vytvářet pomocí externího programu (například XYPlot), který je pro tuto činnost přímo určen. Výstupní data a výsledky se ukládají do speciálního souboru. Celková práce s grafy je ale velmi omezená, proto v tomto srovnání získal nejméně bodů.

Ve srovnání práce s výstupními nezískal žádný simulační program maximální počet bodů, protože buď byla práce s grafy ne příliš snadná, a nebo jejich měly omezené možnosti jejich nastavení (například nemožnost volby měřítka os, a podobně).

6.6 Vhodnost pro modelování a simulaci v energetice

Nejdůležitějším požadavkem je vhodnost pro modelování a simulaci v energetice. To znamená zda je daný simulační program zaměřený na modelování v energetice nebo přizpůsobený pro řešení problémů z této oblasti.

Zde mají jasně navrch modelovací programy ATPDraw a PSCAD, které jsou zaměřeny na simulaci problémů v energetice. Obsahují totiž přímo specializované modely, které v ostatních sledovaných programech chybí, nebo jsou řešeny velmi obecně.

Simulační programy DYNAST a DYMOLA jsou (s jistými omezeními) také vhodné pro modelování problémů v energetice. Nicméně bych je doporučil spíše pro modelování částí sítě nebo jednodušší příklady. Nejsou totiž zaměřeny pouze na tuto inženýrskou oblast, proto v přímém srovnání se specializovanými programy ztrácí.

6.7 Celkové srovnání

V této kapitole je stručné tabulkové srovnání všech hodnocených programů podle výše uvedených kritérií.

Nejlépe z tohoto srovnání simulačních programů pro elektroenergetiku vychází PSCAD, který získal největší počet bodů. S mírnou bodovou ztrátou následuje ATPDraw, DYNAST a na posledním místě se umístil simulační program DYMOLA. Dle očekávání tak z tohoto testu vychází nejlépe programy zaměřené na simulování problémů v elektroenergetice.

Tab. 6-1 Celkové srovnání

Hodnocená vlastnost	ATPDraw	DYMOLA	DYNAST	PSCAD
Snadnost použití a přehlednost	3/5	2/5	5/5	4/5
Množství prvků	3/5	5/5	4/5	4/5
Možnost editace a tvorba prvků	9/10	8/10	7/10	6/10
Požizovací náklady	4/5	2/5	5/5	4/5
Práce s výstupními daty	2/5	4/5	4/5	4/5
Vhodnost pro simulace v energetice	10/10	5/10	5/10	10/10
Celkový součet	31/40	27/40	30/40	32/40

7 SPECIFICKÉ ÚLOHY MODELOVANÉ V ENERGETICE

Elektroenergetika, stejně jako jiná odborná zaměření, klade na simulační programy specifické požadavky. Tyto požadavky jsou dány skutečnými situacemi, které mohou v energetice nastat, přičemž s některými těmito situacemi se seznámíme v této kapitole. V praxi většinou není reálně možné (kvůli složitosti) simulovat a řešit kompletně celý systém najednou, proto se dělí na menší a řešitelné části.

7.1 Elektrické stroje

Elektrických strojů je velké množství, proto zde zmíním pouze několik základních. Při konstruování se dnes výhradně pracuje na počítačích, protože následná výroba zkušebního modelu by byla příliš drahá a případná konstrukční chyba by se špatně opravovala.

7.1.1 Generátory a motory

Modelování elektrických točivých strojů vyžaduje brát v úvahu nejen elektrickou část, ale i mechanickou, přičemž jejich výpočet je další samostatnou částí návrhu a simulace. Dále musíme počítat s objemovými roztažnostmi některých částí, s hmotností a setrvačností rotačních částí, s rezonančními ději a podobně. Konstrukce těchto strojů je tedy velmi složitá, a proto je dostatečně kvalitní testování před uvedením do výroby nezbytné. Validace modelů se provádí na strojích menších výkonů.

7.1.2 Transformátory

Při simulaci transformátoru se vychází z jeho náhradního schématu (modelu), ke kterému přiřadíme dané parametry. Při výpočtech poté kontrolujeme, zda při provozu nebo poruše nedojde k přetížení a následnému poškození transformátoru. Můžeme také zkoumat jeho vliv na chod sítě. Pokud z nějakého důvodu model selže, použijeme jiný model odpovídající jinému reálnému transformátoru.

7.2 Harmonická analýza

Při napájení nelineárních zátěží mohou vznikat vyšší harmonické, které mají negativní dopad na ostatní spotřebiče v síti. Dalšími zdroji rušení mohou být spínací pochody, elektromagnetická pole jiných přístrojů nebo i přechodné děje. Negativním dopadem přitom myslíme rušení v síti. To způsobuje přetěžování kondenzátorů v kompenzačních bateriích, přehřívání jader transformátorů, deformaci napětí, může způsobit špatnou funkci ochran a podobně.

Při simulaci musíme vytvořit modely jednotlivých prvků a poté sledujeme odezvy časově závislých veličin v obvodu. Z vyšších harmonických sledujeme hlavně 3. harmonickou, která v trojfázových obvodech způsobuje nadměrné zatížení středního vodiče.

7.3 Přejchodové děje

Příčin přechodných jevů je celá řada, přičemž mohou trvat v rozmezí milisekund až řádově desítky sekund. Během simulací řešíme problematiku zapínání a vypínání částí sítě, připojování a odpojování zdrojů nebo zátěží a podobně. Mezi přechodné děje patří i nepředvídatelné jevy jako je porušení izolace nebo úder blesku.

Jednoduché modely se řeší pomocí diferenciálních rovnic, složitější varianty už ale pomocí maticového počtu a Laplaceovy transformace, což klade vyšší nároky na počítačové modelování. Modely těchto jevů validujeme na základě hodnot změřených u skutečných přechodových jevů.

7.4 Simulace sítě

Simulacemi sítě se snažíme optimálně navrhnout a optimalizovat konstrukční prvky takovým způsobem, aby vyhovovaly požadovaným požadavkům a byly co nejlevnější. Obvykle přitom vycházíme ze zjednodušených modelů trojfázových sítí a jednotlivé prvky popisujeme jejich charakteristickými vlastnostmi. Při simulování se snažíme sledovat a obsáhnout následující problematiku.

7.4.1 Minimalizace ztrát

Snížování ztrát souvisí s optimalizací chodu sítě a také s dimenzováním přenosového vedení. Ztráty na vedení můžeme snížit změnou (zvýšením) průřezu vedení, zvýšením izolačních odporů a podobně. Při počítačovém modelování a simulaci potom hledáme ideální poměr mezi snížením ztrát a investičními náklady při zachování jmenovitých parametrů požadovaných odběratelem.

7.4.2 Stabilita sítě

V elektrizační síti znamená stabilita stálost hlavních parametrů jako je konstantní napětí, frekvence a podobně. Velký vliv na stabilitu mají výkyvy v odběru energie, které se snaží pokrýt zdroje výkonu. Nároky na stabilitu rostou s významností (velikostí) zdrojů a odběrů, protože výpadek významného zdroje nemusí být možné nahradit malými pomocnými zdroji a může dojít k lavinovitému zhroucení soustavy. Za stabilní považujeme systém, ve kterém tyto výkyvy nevyvolají změnu jmenovitých hodnot hlavních sledovaných parametrů z povolené tolerance. Pomocí počítačových simulací je možné studovat reakce skutečné sítě na možné výpadky a z těchto zkušeností můžeme sestavit nápravné postupy.

7.4.3 Zemní spojení

V sítích s izolovaným uzlem nebo v kompenzovaných sítích, kde je uzel spojen se zemí přes zhášecí tlumivku nebo pomocí zhášecího transformátoru, vzniká při spojení vodiče fáze se zemí zemní spojení. Přitom toto nežádoucí spojení nezpůsobí zkratový proud, ale pouze malý proud kapacitního charakteru, a proto také nevybaví zkratové ochrany. Zjištění místa zemního

spojení je také velmi obtížné, proto se při simulacích snažíme zjistit, jak se síť chová při zemním spojení na různých místech.

7.4.4 Zkratové poměry

Zkratem v elektrizační síti rozumíme elektromagnetický přechodný děj, kdy dojde k náhlému zmenšení impedance mezi vodiči (nebo vodičem a zemí v síti s přímo uzemněným uzlem) v některé části elektrizační soustavy. Obvykle při tom dochází k výraznému zvýšení protékajícího proudu nad maximální dovolené hodnoty, což by (bez zásahu ochran) mohlo vést k poškození dané části sítě. Právě kvůli možnému poškození sítě není přímé experimentování a studování zkratů vhodné, a proto je simulace na počítači nejvhodnějším a většinou i jediným řešením. Další výhodou počítačové simulace zkratů v libovolném místě a při jakémkoliv nastavení sítě. Snažíme se přitom o získání informací pro správné nastavení ochran tak, aby se minimalizovaly škody a odpojila se pouze postižená část vedení.

8 OMEZENÍ VÝPOČETNÍCH ALGORITMŮ

Každý simulační program používá vlastní výpočetní algoritmus, který má své výhody, nevýhody nebo limity. Tyto informace však každý výrobce simulačního programu nezveřejňuje a pokud ano, tak s velkou neochotou. Pokud se mi nepodařilo tyto informace získat, tak jsem vypsals základní informace o daném výpočetním jádře.

8.1 Výpočetní algoritmus programu DYMOLA

Dymola používá novou modelovací metodiku založenou na objektovém modelování a rovnicích. Jeho početní jádro automaticky převádí rovnice do blokového diagramu bez nutnosti zásahu uživatele. Používá knihovny a početní jádro MODELICA, které bylo vyvinuto neziskovou organizací The Modelica Association.

Jedná se o objektově orientovaný, víceborový modelovací jazyk pro modelování komplexních systémů, které se mohou skládat z mechanických, elektrických, tepelných a mnoha dalších komponent. [14]

MODELICA je spíše modelovací jazyk než opravdový programovací jazyk. Její modely jsou matematicky popsány diferenciálními, algebraickými a diskrétními rovnicemi. Přestože má MODELICA nástroje pro automatické popsání modelu, nestandardní proměnné musí být řešeny ručně. Na druhou stranu struktura jádra MODELICA umožňuje manipulaci s obrovskými modely čítajícími i více než sto tisíc rovnic. [15]

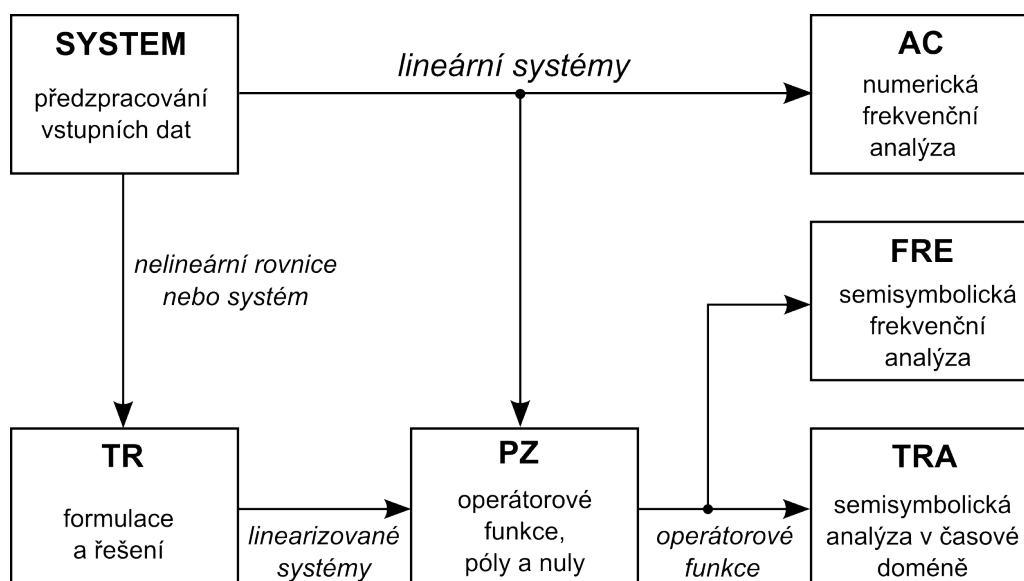
Dodatečně podporuje pole se syntaxí podobné té, která je použita v MATLABu. Pole mohou být základní data nebo obecně modely komponent. Unikátní vlastností jádra MODELICA je schopnost uvažovat s vlivy, které mohou na daném zařízení v praxi hrát významnou roli, například tření a ohřev ložisek, rázy a podobně. [15]

8.2 Výpočetní algoritmus programu DYNAST

Základní jádro simulačního programu DYNAST se skládá ze dvou hlavních částí-simulátoru DYNAST (DYNAST Solver) a integrovaného uživatelského prostředí DYNHELL. Toto prostředí se instaluje na počítač, zatímco vlastní řešící jádro (DYNAST Solver) běží na serveru tvůrců. Bez připojení k internetu je možné využívat pouze omezenou variantu solveru.

Jeho jádro umožňuje řešení nelineárních diferenciálních i algebraických rovnic, které mohou být zadány přímo v textové formě bez nutnosti je nejprve konvertovat do blokových diagramů. Díky této implicitní formě rovnic a jejich okamžitému řešení, není třeba brát ohled na strukturu rovnic a jejich třídění. Pořadí diferenciálních rovnic je možné měnit i během jejich řešení. [16]

Simulátor DYNAST se skládá z několika částí, které mezi sebou sdílejí společná data a platí mezi nimi vazby patrné z Obr. 8-1. Každá sekce má na starosti specifické úlohy.



Obr. 8-1 Simulátor DYNAST [9]

SYSTEM čte v popisu modelu, který je ve tvaru sady algebro-diferenciálních rovnic, blokových diagramů, multipólových diagramů nebo v kombinaci těchto možností.

TR řeší systémy nelineárních rovnic, analyzuje nelineární diagramy a automaticky provádí linearizaci těchto nelineárních systémů.

O operátorové funkce se stará sekce **PZ**, která dále analyzuje linearizované systémy pocházející z bloku TR.

Zbývající bloky se starají o přímou numerickou frekvenční analýzu (**AC**), vyhodnocení frekvenční charakteristiky (**FRE**) a semisymbolickou i numerickou frekvenční analýzu v časové doméně (**TRA**).

8.3 Výpočetní jádro programu PSCAD

Simulační program PSCAD využívá známý EMTDC (Electromagnetic Transients včetně části DC) výpočetní jádro, které je z větší části napsané v programovacím jazyku Fortran. Toto jádro sestavuje a řeší diferenciální rovnice pro elektromagnetické i elektromechanické systémy v časové oblasti a jeho struktura umožňuje znázornění kontrolních systémů. [13]

EMTDC je nejvhodnější pro simulování elektrických systémů a sledování jejich okamžité odezvy (sledování elektromagnetických přechodových jevů).

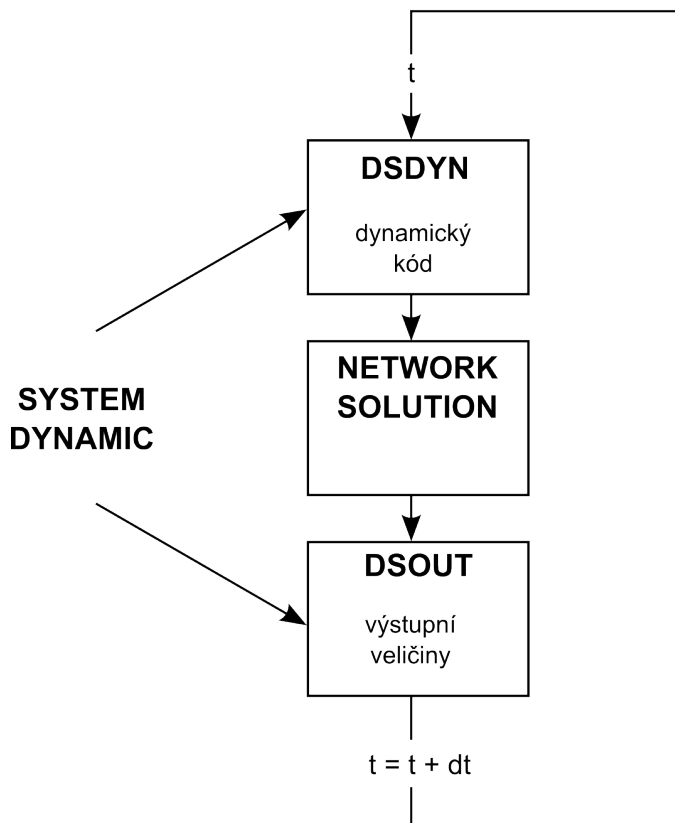
Jeho jádro je strukturováno společně s hlavním programem, který řídí veškeré vstupně-výstupní aktivity, síťové řešení (Network Solution) a rozhraní pro uživatelem nadefinované komponenty. Na Obr. 8-2 je naznačena jeho zjednodušená struktura s vyznačenými základními moduly.

Sekce System dynamics

Výsledky jsou počítány na základě pevných časových kroků použitím lichoběžníkového integračního pravidla. Lichoběžníkové integrační pravidlo přepočítává induktivní a kapacitní

diferenciální rovnice na odpovídající admitance a proudové zdroje. Takto získané výsledky jsou řešeny jako okamžité hodnoty v čase, ale také mohou být překonvertovány na fázory a použity v komplexní rovině. [13]

Další částí tohoto jádra jsou podprogramy **DSDYN** a **DSOUT**, které mohou být použity před nebo i po vyřešení sekce **NETWORK SOLUTION** (řeší elektrické sítě). Díky tomu se mohou uživatelé vyvarovat zpoždění časových kroků. [13]



Obr. 8-2 EMTDC jádro [13]

8.4 Výpočetní algoritmus programu ATPDraw

Tento simulační program je napsán v programovacím jazyku Borland Delphi 2.0 a využívá EMTP početní jádro. Toto jádro je velmi podobné tomu, které využívá i simulační program PSCAD, a proto není nutné jej znovu popisovat.

8.5 Rozdíly mezi EMTDC a EMTP početními jádry

Obě dvě jádra vycházejí ze stejného základu a pracují na stejných principech sepsaných v roce 1969 Hermannem Dommelem, ale EMTDC bylo vyvíjeno nezávisle na ostatních. Celkově vzato, prakticky všechny systémové modely a postupy použité v EMTP jádrech jsou dostupné i v EMTDC. Zde jsou uvedené některé hlavní výhody EMTDC. [13]

- mnoho sériových a paralelních prvků je matematicky spojeno (například RLC obvody) pro snížení počtu uzlů a větví obvodu

- obsahuje algoritmus pro zrychlení rozkladu matic
- neomezuje jak mají být prvky v obvodu kombinovány, uživatel může použít jakýkoliv počet prvků sériově nebo paralelně
- použité přepínače a zdroje mohou být ideální (s nulovým odporem) nebo i skutečné (kde uživatel může zadávat hodnoty odporu)
- využívá výhody překladače Fortran 90/95, který umožňuje dynamicky přidělovat paměť na začátku každého běhu simulace
- modely přenosových a kabelových vedení jsou v EMTDC dokonalejší

9 METODY VÝPOČTU VYBRANÝCH PROBLÉMŮ V ENERGETICE

V této kapitole se budu věnovat stručnému popisu metod výpočtu u vybraných problémů v energetice, se kterými se lze běžně setkat.

9.1 Ustálený chod sítě

Pod pojmem ustálený chod sítě si představujeme takový provozní stav, při kterém v síti neprobíhají žádné přechodné děje. V reálné síti přitom tento stav nikdy nemůže nastat, protože v vždy dochází ke kolísání efektivních hodnot napětí a proudu. Tyto změny však neuvažujeme, protože se mění pomalu. Ve většině případů nás zajímá rozdělení napětí a proudů v síti při mezních podmínkách ustáleného stavu (například ve stavu maximálního nebo minimálního zatížení spotřebiče, spotřebitele nebo celé sítě). [4]

Při samotném výpočtu záleží, zda se jedná o síť NN (VN) nebo o VVN (ZVN). Hlavní rozdíl při výpočtu je dán rozdílnými zjednodušujícími předpoklady u různých napěťových hladin.

Sítě NN a VN řešíme pomocí jejího náhradního jednofázového schématu s provozními parametry. Napětí a proudy ve zbývajících fázích jsou potom stejné, případně zpožděné o 1/3 nebo 2/3 periody. Poté vypočítáme příslušný úbytek napětí, nebo velikost ztrát, na této celkové impedanci a srovnáme s dovolenými hodnotami.

K výpočtu se hodí všechny metody řešení lineárních obvodů jako je metoda smyčkových proudů, uzlových napětí, superpozice, Théveninova věta a transfigurace. O vhodnosti použití některé z těchto metod posuzujeme podle počtu neznámých, které musíme v obvodu vyčíslit podle způsobu zadání zdrojů a spotřebičů. [4]

Se sítěmi s napětím VVN a ZVN při řešení ustáleného chodu sítě pracujeme jako s vedeními s rozloženými parametry, případně je také můžeme nahradit příslušným náhradním schématem ve tvaru dvojbranu.

Při řešení pomocí vedení s rozloženými parametry se dostaneme k soustavě dvou lineárních parciálních diferenciálních rovnic pro napětí a proud v závislosti na čase a místě na vedení, které nazýváme telegrafní rovnice.

Pokud budeme tyto sítě řešit pomocí náhradních dvojbranů, budeme při výpočtu řešit takzvané výkonové rovnice sítě, což jsou kvadratické komplexní rovnice. Jejich přesné řešení je přitom velmi obtížné, proto se řeší přibližně pomocí několika iteračních metod. Tyto metody se liší hlavně v množství početních operací nutných k získání požadované přesnosti výsledku a veličinou, která je v průběhu výpočtu srovnávána s požadovanou přesností.

9.2 Přechodné jevy

Přechodných jevů je celá řada a dají se rozdělit na tři hlavní skupiny. Vlnové, elektromagnetické a elektromechanické přechodné jevy. V některé literatuře se také dělí podle

doby působnosti na rychlé, středně rychlé a pomalé přechodné jevy. Některé z těchto jevů přitom řešíme pomocí diferenciálních rovnic, jiné už využitím Laplaceovy transformace a matic. Mezi jedny z nejvýznamnějších přechodných jevů patří také zkratky, které jsou popsány v následující kapitole.

9.3 Zkratky

Při výpočtech zkratů se, stejně jako u výpočtu ustáleného chodu sítě, uvažují určitá zjednodušení proto, aby obvod zkratového proudu utvořil lineární schéma. Metod výpočtu je několik, zde však zmíním pouze dvě – metodu souměrných složek a obecnou metodu.

9.3.1 Metoda souměrných složek

Hlavní podstatou výpočetního postupu u metody souměrných složek je transfigurace náhradních schémat sousledné, zpětné a nulové (netočivé) složkové soustavy a určení příslušných zkratových impedancí pro dané místo zkratu. Tyto jednotlivé impedance se získají postupným zjednodušováním náhradního obvodu. Z nich se poté určí celková výpočtová impedance, ze které se poté vypočítají hodnoty zkratových proudů.

9.3.2 Obecná metoda výpočtu zkratových proudů

Tato metoda se používá v případech složitějších sítí, kde by byl výpočet celkové výpočtové impedance postupným zjednodušováním byl příliš pracný nebo kde by tento postup nešel dobře zobecnit.

Obecná metoda výpočtu zkratových proudů je proto založena na Théveninově větě a metodě uzlových napětí. V náhradním jednofázovém schématu zobrazujeme zkratové spojení v daném uzlu se zemí pomocí větve s nulovou impedancí, přitom nás zajímá pouze proud touto jedinou větví – zkratový proud. Při aplikaci Théveninovy věty na tento obvod nahradíme celou soustavu jediným náhradním napěťovým zdrojem a k němu v sérii zapojenou impedancí zkratové spojky a náhradní impedancí obvodu. Impedance zkratové spojky závisí na druhu zkratu (při kovovém zkratu je tato impedance nulová), náhradní impedance obvodu odpovídá impedanci obvodu před vznikem zkratu a určíme ji pomocí admitanční uzlové matice.

9.4 Harmonická analýza

Harmonická analýza obecně slouží k popisu signálů ve frekvenční oblasti a lze ji provádět několika možnými způsoby – numericky, graficky, matematicky, případně měřením na harmonických analyzátoch. Při výpočtech se obvykle používá Fourierova rozvoje.

Numerická metoda spočívá v rozdělení periody průběhu neznámého signálu na množství stejně velikých dílků. Přitom platí, že na čím více dílků daný průběh signálu rozdělíme, tím přesnější výsledek získáme, ale také tím obtížnější bude výpočet. [18]

První krok grafické metody také spočívá na rozdělení periody neznámého průběhu na

množství dílků, ale dále příslušné okamžité hodnoty průběhu vynášíme ve formě fázorů. Spojením koncového bodu takto vzniklého obrazce a počátku souřadnic a tím nám vznikne výsledný vektor, který poté promítneme do XY souřadnicového systému. Pro určení n-té harmonické, musíme tento fázor vynášet pod n-násobným úhlem. [17]

Matematická metoda je založena na integrování základních rovnic pro stejnosměrnou, sinovou a cosinovou složku. Při výpočtu se dále používají různá zjednodušení pomocí sudé a liché funkce a tak podobně.

10. ZPRACOVÁNÍ VYBRANÉHO PROBLÉMU NA POČÍTAČI

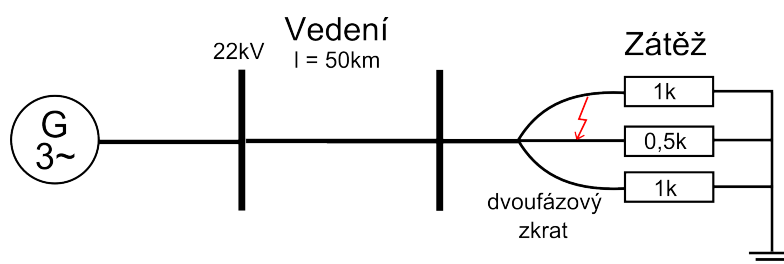
Z problémů, které se běžně v energetice vyskytují, jsem si vybral výpočet zkratového proudu, který se postupně pokusím zpracovat ve všech zmíněných simulačních programech. Zadání a parametry simulované sítě jsem záměrně vybral co nejjednodušší, protože se má jednat o modelovou úlohu pro srovnání vybraných programů.

10.1 Zadání simulovaného problému

Jako simulovaný problém jsem si zvolil část jednoduché trojfázové sítě 22kV, která napájí nesymetrickou odporovou zátěž. Na této zátěži pak v čase $t = 0,1s$ vznikne dokonalý kovový dvoufázový zkrat. Soustava má následující parametry:

Tab. 10-1 Parametry soustavy

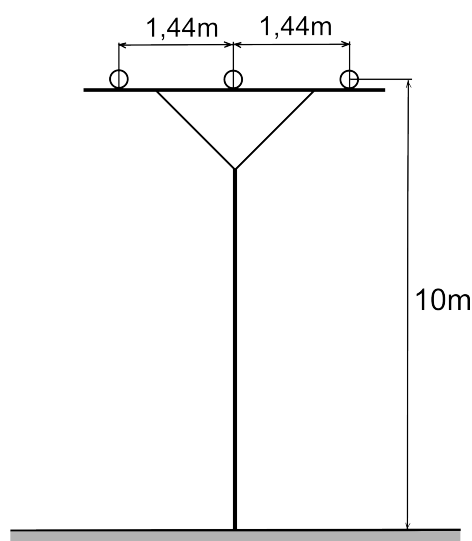
Sdružené napětí zdroje	Výkon zdroje	Zátěž fáze A	Zátěž fáze B	Zátěž fáze C
22kV	50MVA	1000 Ω	500 Ω	1000 Ω



Obr. 10-1 Schéma simulované sítě

Tab. 10-2 Parametry vedení

Typ	Délka	Měrný odpor vedení	Měrný odpor země	Vnější poloměr lana	Poloměr ocelové duše lana	Výška stožáru	Rozteč lan
AlFe6	50km	0,122 $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	100 $\Omega \cdot \text{m}$	0,5625cm	0,352cm	10m	1,44m



Obr. 10-2 Rozmístění vodičů na stožáru

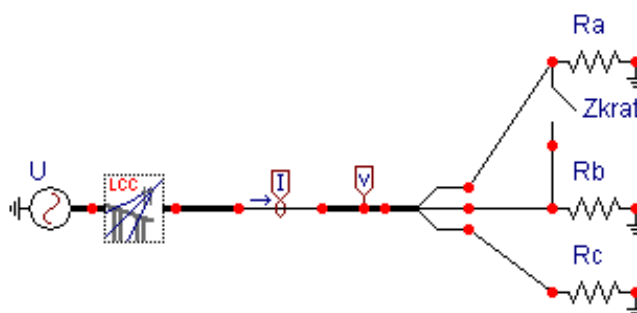
10.2 Simulace pomocí programu ATPDraw

Prvním programem, ve kterém si ukážeme nasimulovanou úlohu, je ATPDraw. Jedná se o simulační program přímo specializovaný pro modelování v energetice, proto by v něm mělo být snadné danou úlohu nasimulovat.

10.2.1 Tvorba schématu a zadávání hodnot

Schéma jsem v tomto simulačním programu, kvůli zvolenému druhu zkratu, vytvářel jako kombinaci jednopólového a trojpólového zapojení.

Při tvorbě dané sítě jsem použil jednopólový model trojfázového zdroje, u kterého jsem zadal velikost napětí, frekvenci a fázový posuv. Trochu překvapivě se zde zadává maximální (amplitudová) hodnota fázového napětí, takže jsem zadanou sdruženou efektivní hodnotu musel přepočítat. Také se zde nedají nastavit některé vnitřní parametry zdroje (například vnitřní odpor, indukčnost a podobně), takže pro simulaci reálných zdrojů je třeba sestavit jeho náhradní schéma. Pro návrh vedení jsem použil komponentu LCC, ve které jsem zvolil model venkovního vedení (Overhead Line), typ Bergeron a doplnil potřebné parametry. Dvoufázový zkrat jsem realizoval pomocí obyčejného spínače, u kterého jsem pouze nastavil čas sepnutí.



Obr. 10-3 Model sítě v programu ATPDraw

10.2.2 Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů

V nastavení simulace jsem vyplnil dobu jejího trvání na 0,25s a časový krok simulace na 1E-5. Všechny zbývající parametry jsem ponechal beze změn.

Tvorba grafů je v ATPDraw kapitola sama pro sebe. Vzhledem k tomu, že tento simulační program neobsahuje žádný integrovaný nástroj ke grafickému zobrazení výsledků, je proto nutné použít externí aplikaci. K tomuto účelu jsem použil program PlotXY, což je jeden z několika programů pro tvorbu grafů, které se spolu s ATPDraw používají.

Pro získání proměnných jsem musel přidat do simulovaného obvodu příslušné modely měřících přístrojů a v jejich nastavení zvolit, aby zaznamenávaly hodnoty ve všech třech fázích. Po dokončení simulace ATPDraw sám uloží výsledné hodnoty do externího souboru, který se poté otevře v programu PlotXY. V něm již pro zobrazení průběhů již stačí pouze jednoduše vybrat požadované proměnné a zobrazit průběhy stiskem tlačítka "Plot". Velmi mne překvapilo omezené nastavení výsledných grafů. Není zde například možné nastavit měřítka os, které může být v některých případech zobrazeno velmi nelogicky, barvy jednotlivých průběhů nebo styl mřížky.

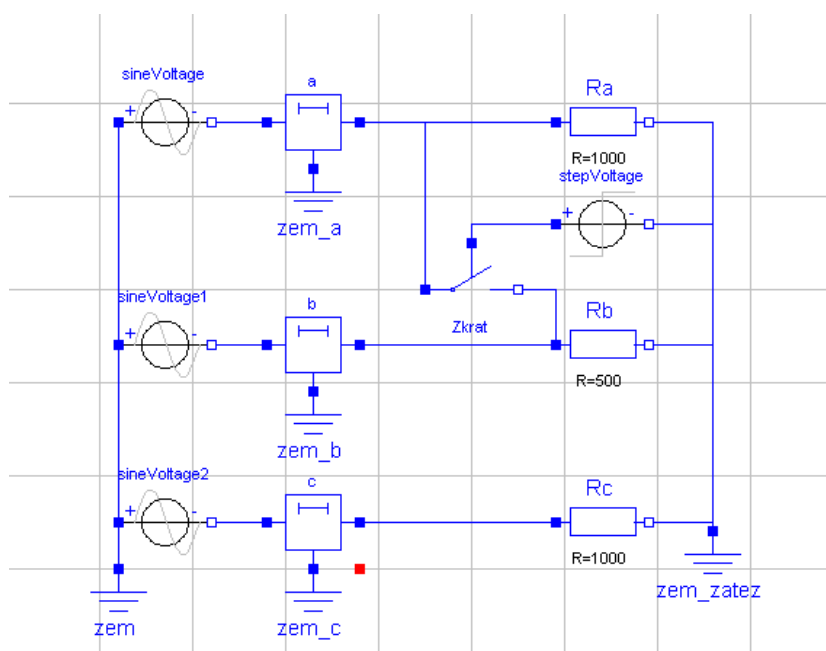
10.3 Simulace pomocí programu DYMOLA

Simulační program DYMOLA je dalším z univerzálních simulátorů zmíněných v této práci. Vzhledem ke svému mezioborovému zaměření tedy není přímo určen pro modelování v elektroenergetice, nicméně jeho knihovny obsahují potřebné základní knihovny.

10.3.1 Tvorba schématu a zadávání hodnot

Schéma jsem v tomto simulačním programu musel vytvářet pomocí jednofázových modelů potřebných prvků. Knihovna DYMOLy sice obsahuje potřebný trojfázový model zdroje, nicméně se jedná pouze o jeho jednopólové znázornění, pro které bych již nenašel potřebný jednopólový model vedení.

Trojfázový zdroj jsem tudíž vytvářel pomocí tří jednofázových zdrojů, u kterých jsem také nastavil potřebnou velikost napětí a fázový posuv. U napětí jsem opět musel zadat jako jeho amplitudovou fázovou hodnotu. U jednotlivých zdrojů zde také (podobně jako u ATPDraw) nelze přímo zadat jejich vnitřní hodnoty. Vedení jsem vytvořil pomocí modelu "oLine", ve kterém jsem nastavil potřebné parametry. Jelikož u modelu vypínače nelze v DYMOLe nastavit čas sepnutí, musel jsem dvoufázový zkrat realizovat pomocí řízeného vypínače, kterému impuls pro sepnutí dává zdroj skokového napětí.



Obr. 10-4 Model sítě v programu DYMOLA

10.3.2 Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů

Také u DYMOLy jsem v nastavení zadával pouze dobu trvání simulace. Zbývající parametry jsem ponechal beze změn.

Tvorba grafů a jejich zobrazení je v tomto simulačním programu velmi snadná. Pro všechny sledované parametry nebylo potřeba do schématu zadávat žádné měřicí prvky. Po spuštění vlastní simulace obvodu se totiž v levé části pracovního okna zobrazí stromový seznam všech zobrazitelných proměnných, které se po označení myši okamžitě zobrazí v grafu. Podle mého názoru je tento způsob nejlépe použitelný a nejsnazší ze všech sledovaných simulačních programů. Bohužel ani zde není možné nastavit měřítka os ani barvy průběhů, což bych u tohoto simulačního programu očekával.

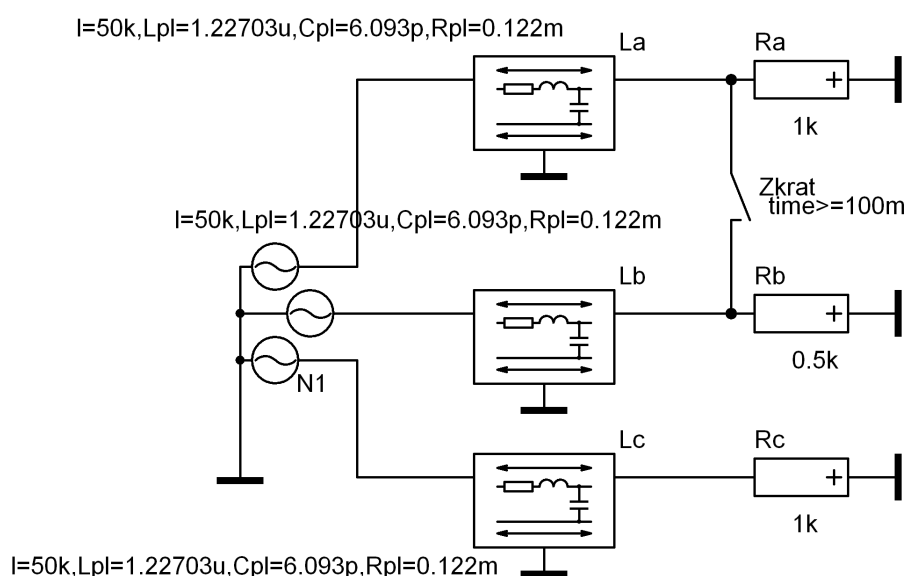
10.4 Simulace pomocí programu DYNAST

Simulátor DYNAST sice není primárně určen pro modelování problémů v elektroenergetice, nicméně jej lze s jistými omezeními použít i v tomto odvětví.

10.4.1 Tvorba schématu a zadávání hodnot

V knihovně DYNASTu nejsou žádné jednopólové modely vícefázových prvků, proto jsem musel obvod sestavovat jako trojpólový.

Při tvorbě schématu jsem použil model trojfázového zdroje, u kterého jsem nastavil efektivní hodnotu fázového napětí. Překvapivě je u něho možné nastavit vnitřní parametry zdroje, které u předchozích dvou simulačních programů nelze, na druhou stranu však není možné (v případě nutnosti) nastavit fázový posun napětí. Vedení jsem realizoval pomocí modelu ztrátového vedení Galerkin, u kterého jsem vypočítal a zadal potřebné parametry. Dvoufázový zkrat jsem zde opět realizoval pomocí vypínače (Ideal Switch), u kterého jsem nastavil čas sepnutí.



Obr. 10-5 Model sítě v programu DYNAST

10.4.2 Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů

Pro tuto simulaci jsem v DYNASTu zvolil nelineární analýzu (Nonlinear Analysis), kde jsem nastavil režim analýzy na Transient s časem trvání od 0 do 0,25s. Dále jsem zde musel vybrat parametry, které se po dokončení simulace zobrazí v grafech (Desired Results). Jako zajímavost bych rád zmínil fakt, že pro zobrazení všech potřebných veličin nebylo nutné zadávat do obvodu žádná měřidla, protože DYNAST v tomto ohledu pracuje podobně jako DYMOLA.

Po vlastním spuštění simulace stačí vybrat, které zvolené vypočítané proměnné chceme zobrazit. Přestože zde také nelze nastavit měřítka os, podobně jako je tomu u programu PlotXY v ATPDraw, je odstupňování jejich rastru v DYNASTu mnohem přehlednější a i celková práce je s nimi snazší.

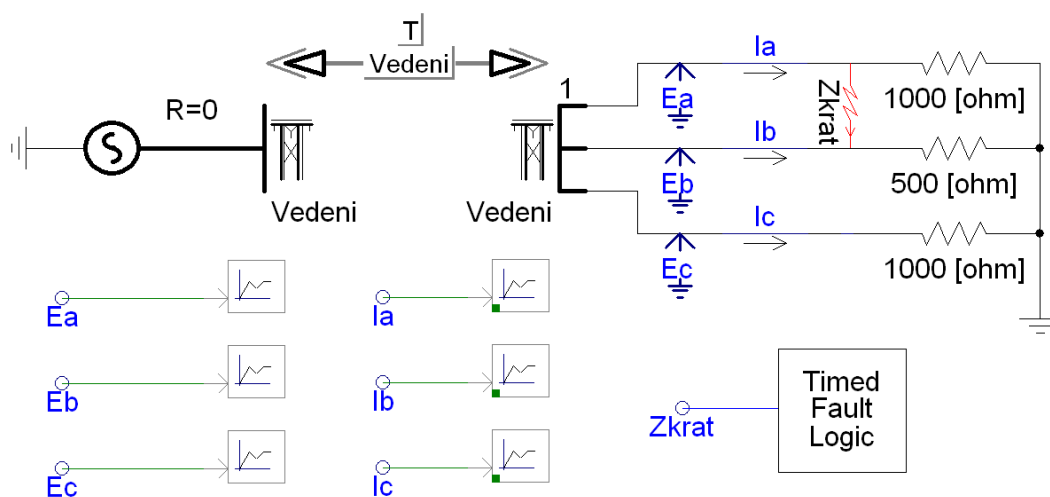
10.5 Simulace pomocí programu PSCAD

Simulační program PSCAD je jedním ze simulačních programů přímo specializovaných na modelování problémů v energetice.

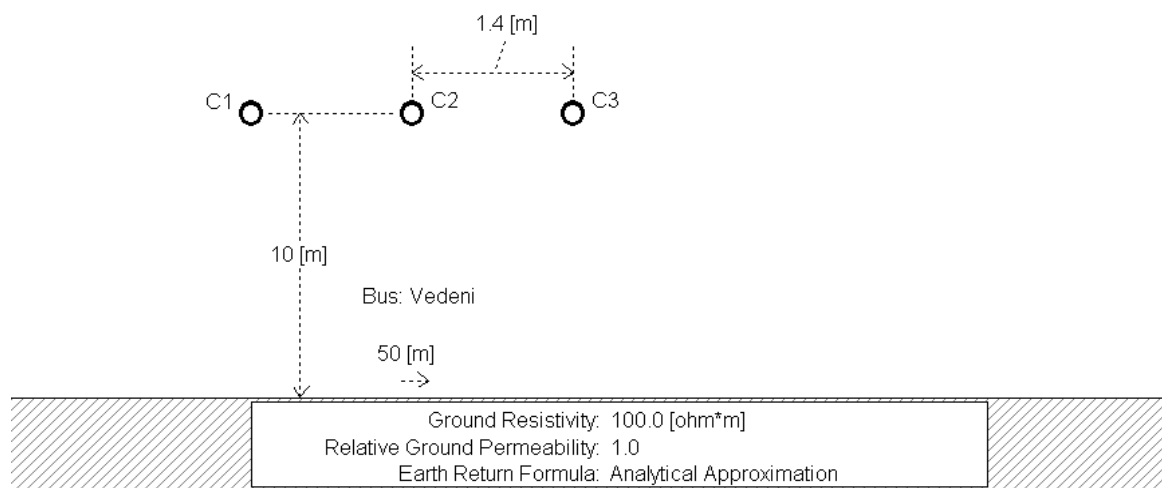
10.5.1 Tvorba schématu a zadávání hodnot

Schéma jsem vytvářel jako kombinaci trojpolových a jednopólových komponent pomocí předdefinovaných, přímo specializovaných modelů. Ty stačilo pouze najít v hlavní knihovně, zkopírovat je na pracovní plochu, propojit a nastavit potřebné parametry.

Zadávání parametrů komponent je snadné a překvapivě se většina hodnot nezadáva v základních jednotkách, ale v násobných (kV, km, a podobně). Také při nastavování zdroje se u napětí zadává jeho sdružená hodnota, což je v porovnání s ostatními vybranými simulátory příjemná změna. Dále je u něho možné nastavit snad všechny možné parametry reálného zdroje. Většina prvků vyřešena "jednourovňově" (celé jsou umístěny na hlavní pracovní ploše), pouze při modelování vedení jsem se musel přesunout o úroveň hlouběji, kde bylo nutné a vytvořit model sloupu a nadefinovat jeho parametry. Zkrat jsem v tomto programu realizoval pomocí speciální komponenty "Fault", kvůli které jsem musel do schématu přidat ještě logiku časování (Timed Fault Logic).



Obr. 10-6 Model sítě v programu PSCAD



Obr. 10-7 Modelovaný sloup v programu PSCAD

10.5.2 Nastavení simulace, tvorba a zobrazení grafů

V nastavení simulace jsem opět nastavoval pouze dobu trvání simulace, nastavení dalších parametrů nebylo zapotřebí.

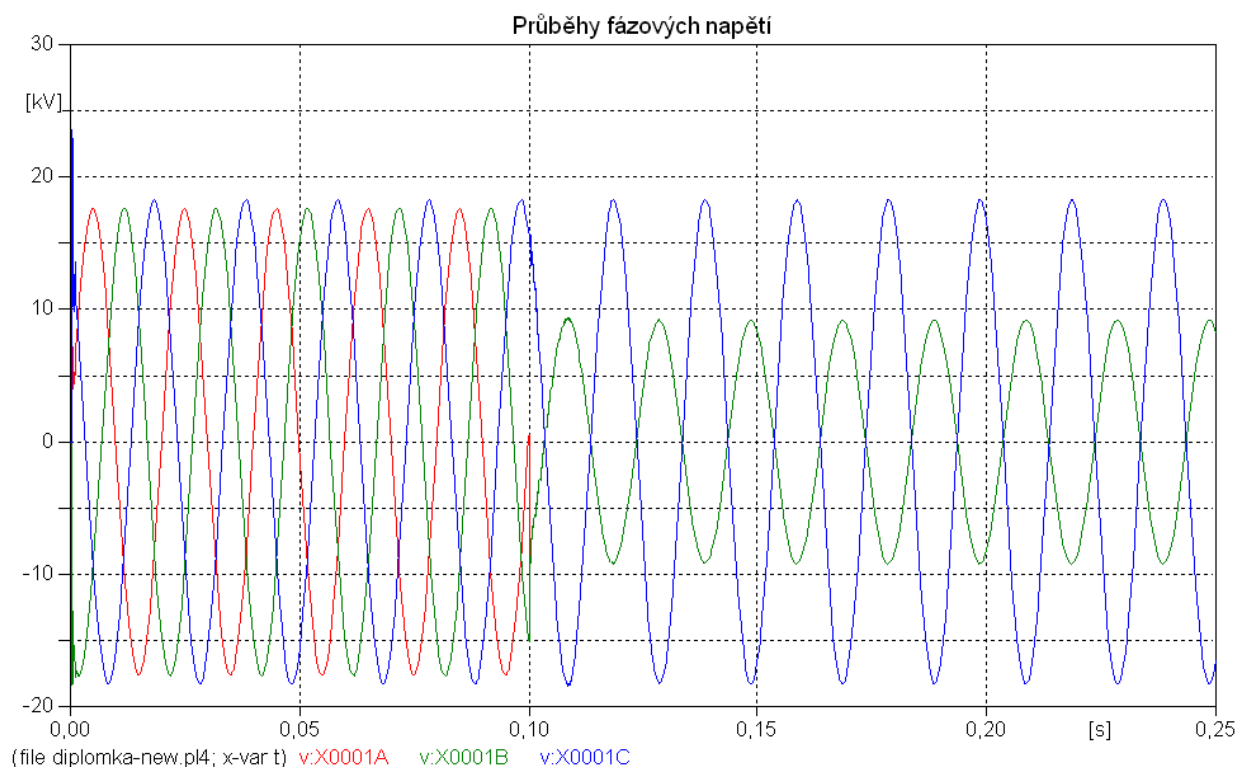
Tento simulační program vyžaduje pro zobrazení proměnných připojení měřidla k danému prvku, dále také umístění datového štítku (Data Label) a k němu připojení výstupního kanálu (Output Channel). To znamená, že pro jednu sledovanou veličinu je třeba umístit do schématu tři prvky. Podle mého názoru je tento způsob zbytečně složitý a při vyhodnocování více veličin i velmi zdlouhavý. Tímto ovšem složitosti ohledně zobrazení nekončí, protože vkládání grafů je také velmi zdlouhavé (viz. kapitola 5.4). PSCAD také u grafů vyexportovaných do obrázku nezobrazuje název a popis osy X. Na druhou stranu musím ocenit, že další práce s grafy je na velmi dobré úrovni a jako u jediného z vybraných simulačních programů je možné nastavovat měřítka os a mnoho dalších parametrů.

10.6 Přehled nasimulovaných průběhů

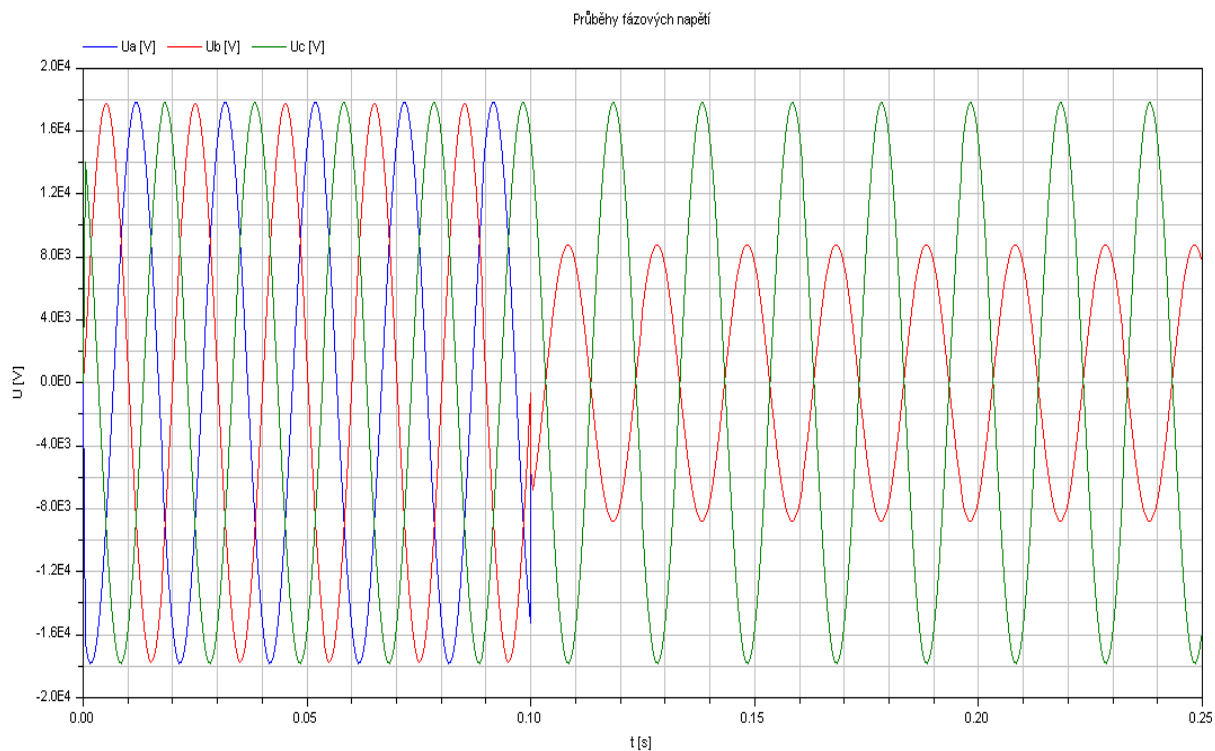
V této kapitole jsou zobrazeny průběhy sledovaných veličin daného obvodu v závislosti na čase získané pomocí jednotlivých simulačních programů.

10.6.1 Průběhy fázových napětí před místem zkratu

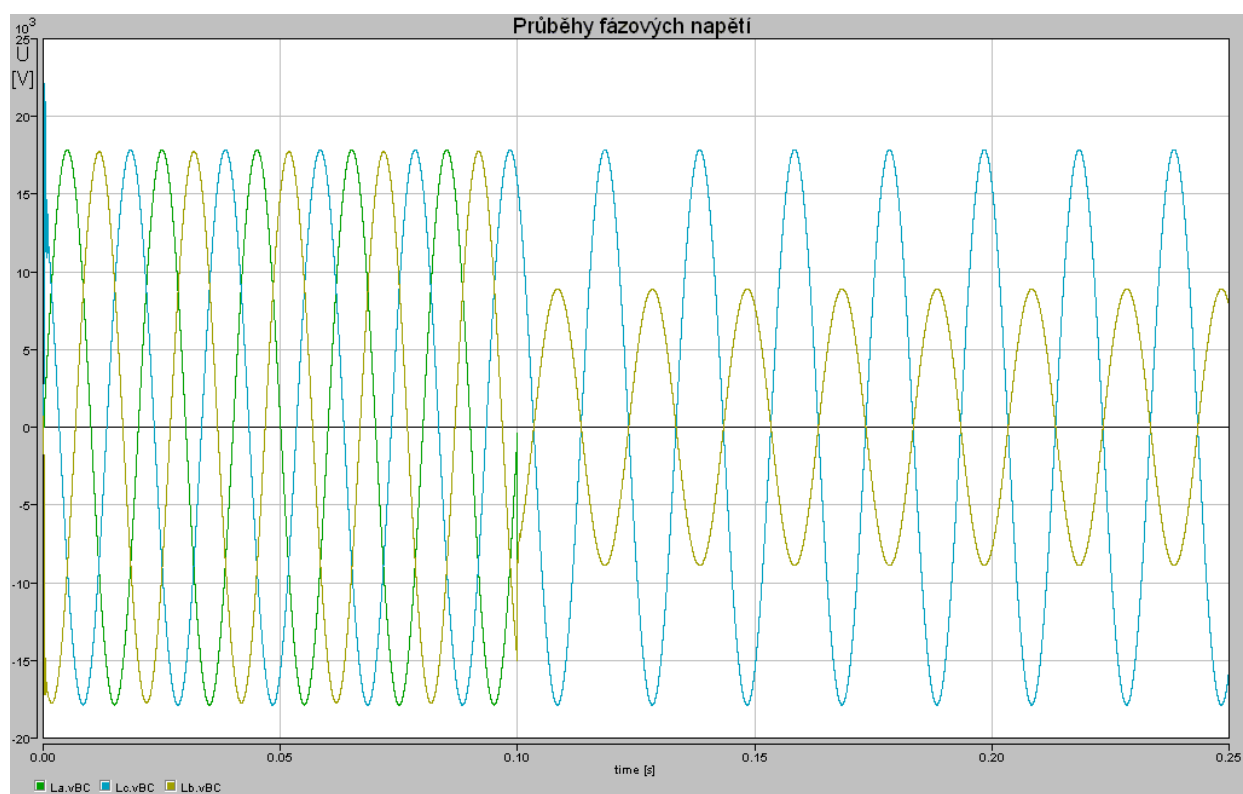
První skupina grafů ukazuje průběhy fázových napětí na konci vedení. Z průběhů je patrné, že se při daném dvoufázovém zkratu velmi změní napětí v postižených fázích. Výrazně totiž poklesne a je poté shodné co do velikosti i fáze. Na druhou stranu však napětí ve zdravé fázi zůstává prakticky beze změny.



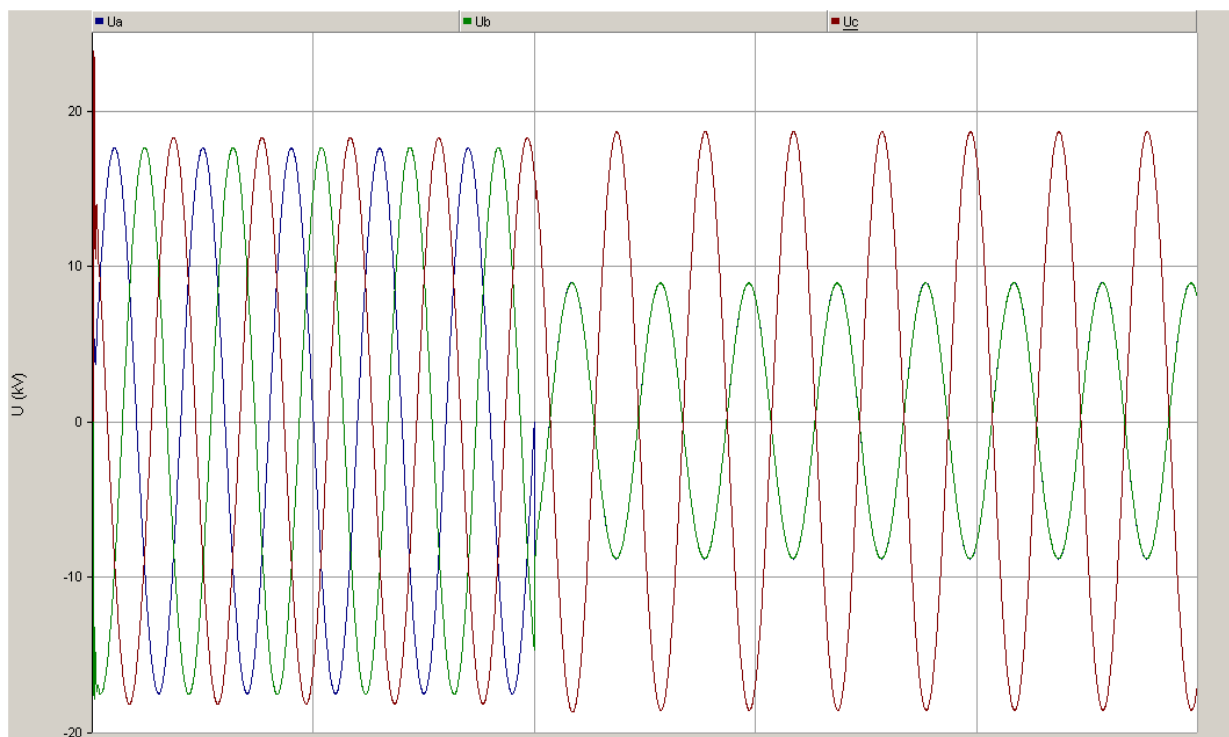
Obr. 10-8 ATPDraw – fázová napětí na konci vedení



Obr. 10-9 DYMOLA – fázová napětí na konci vedení



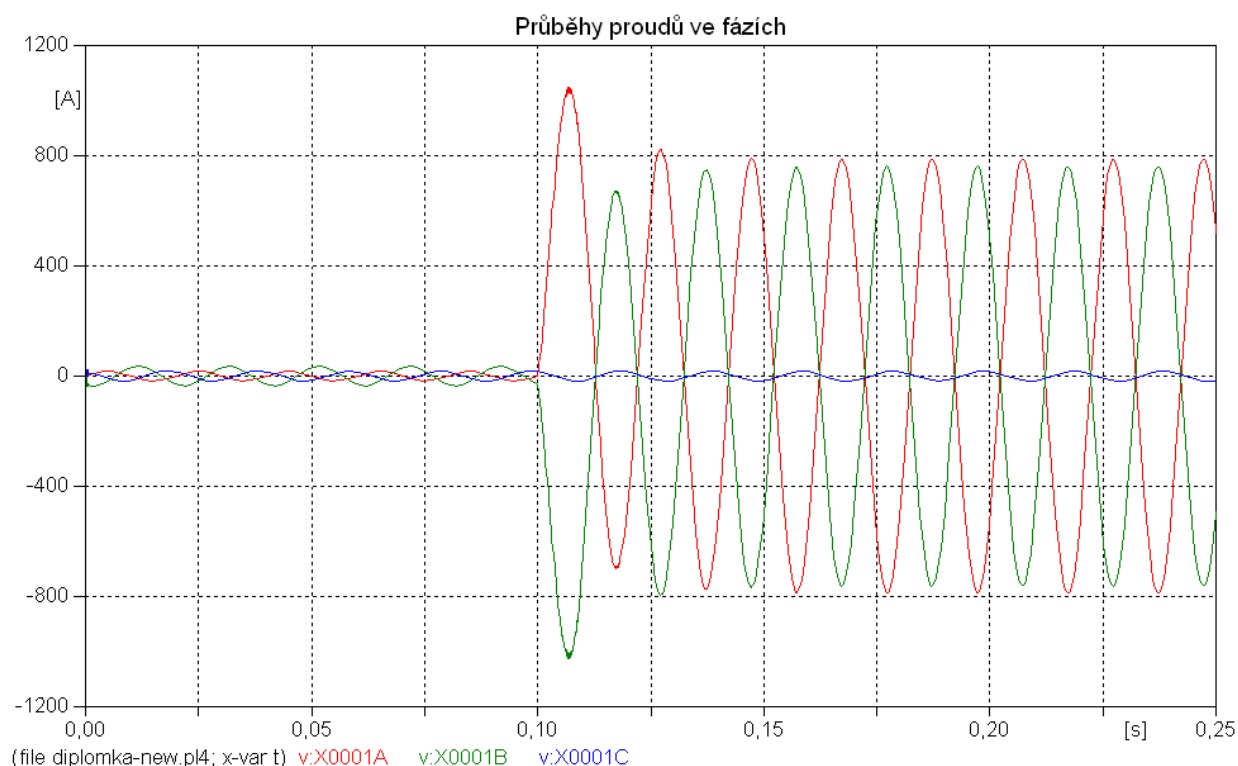
Obr. 10-10 DYNAST – fázová napětí na konci vedení



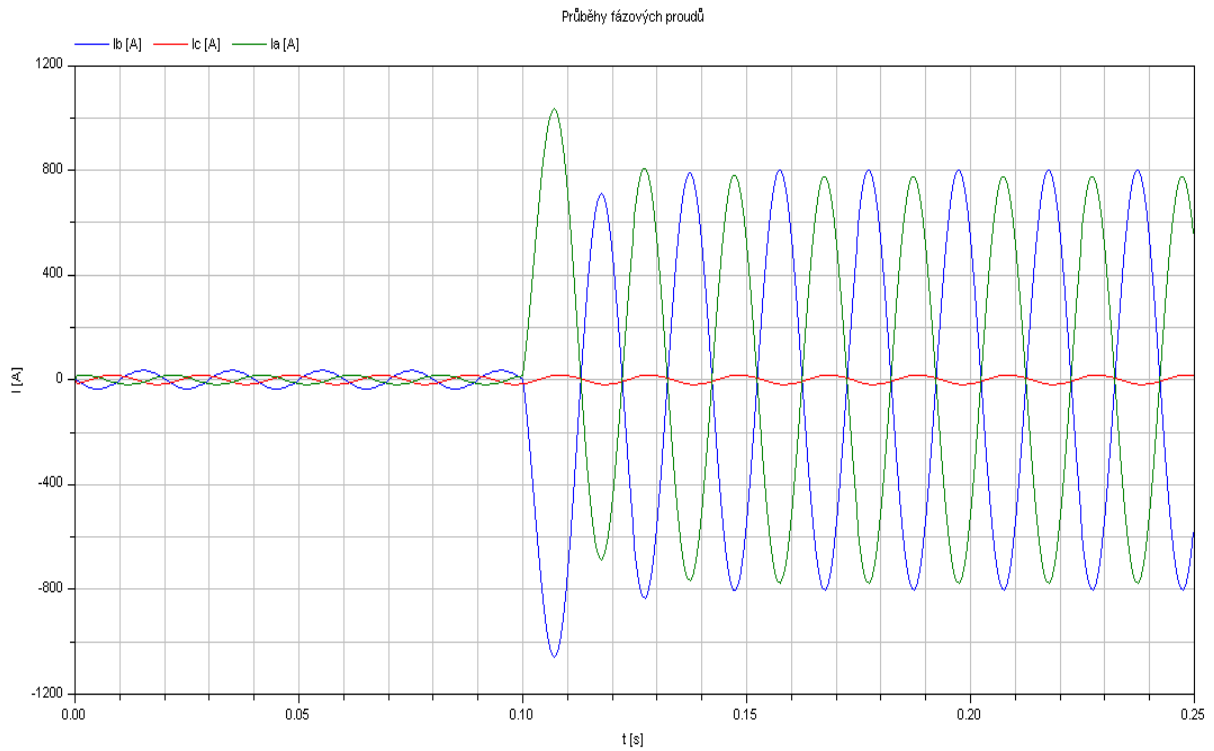
Obr. 10-11 PSCAD – fázová napětí na konci vedení

10.6.2 Průběhy proudů v jednotlivých fázích před místem zkratu

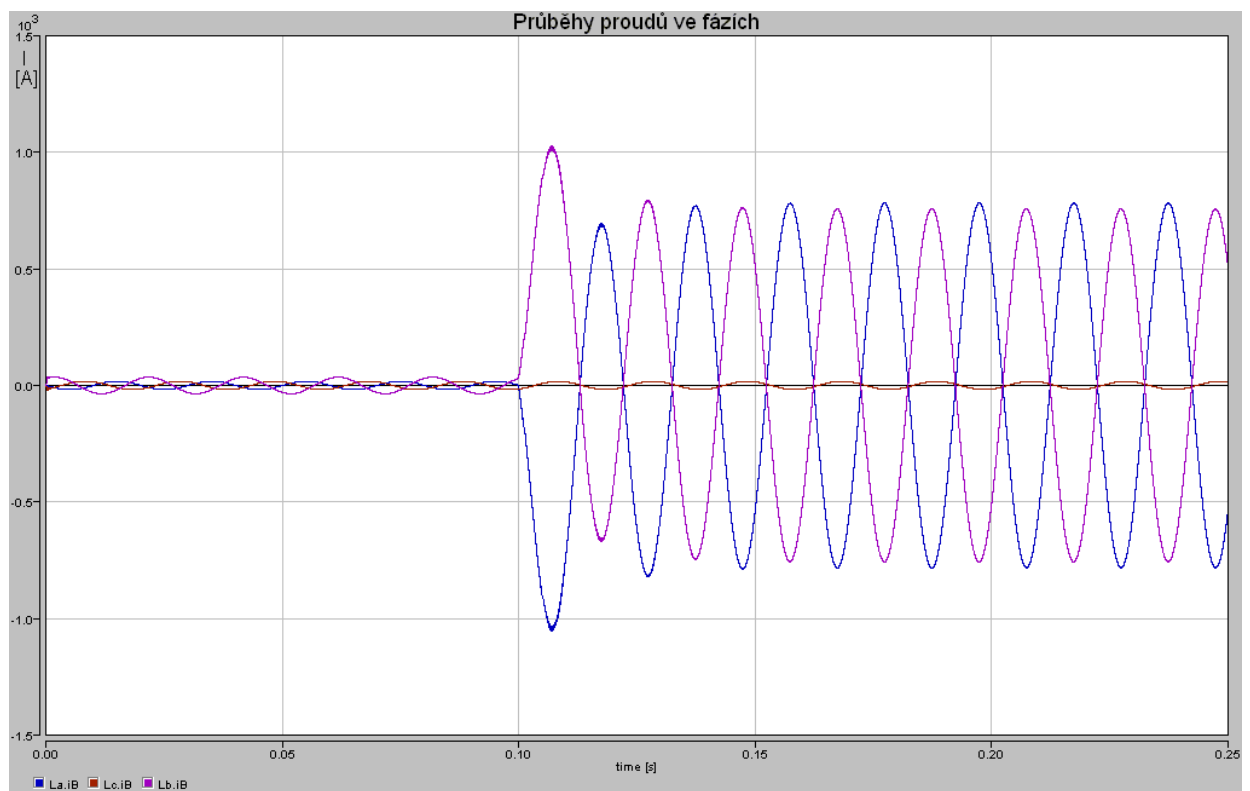
Na následující sérii grafů je vidět, jak se změní fázové proudy při dvoufázovém zkratu. Proudů postižených fází při zkratu nejprve rapidně vzrostou a poté se ustálí na určité hodnotě, zatímco proud zdravé fáze zůstává po celou dobu simulace beze změn.



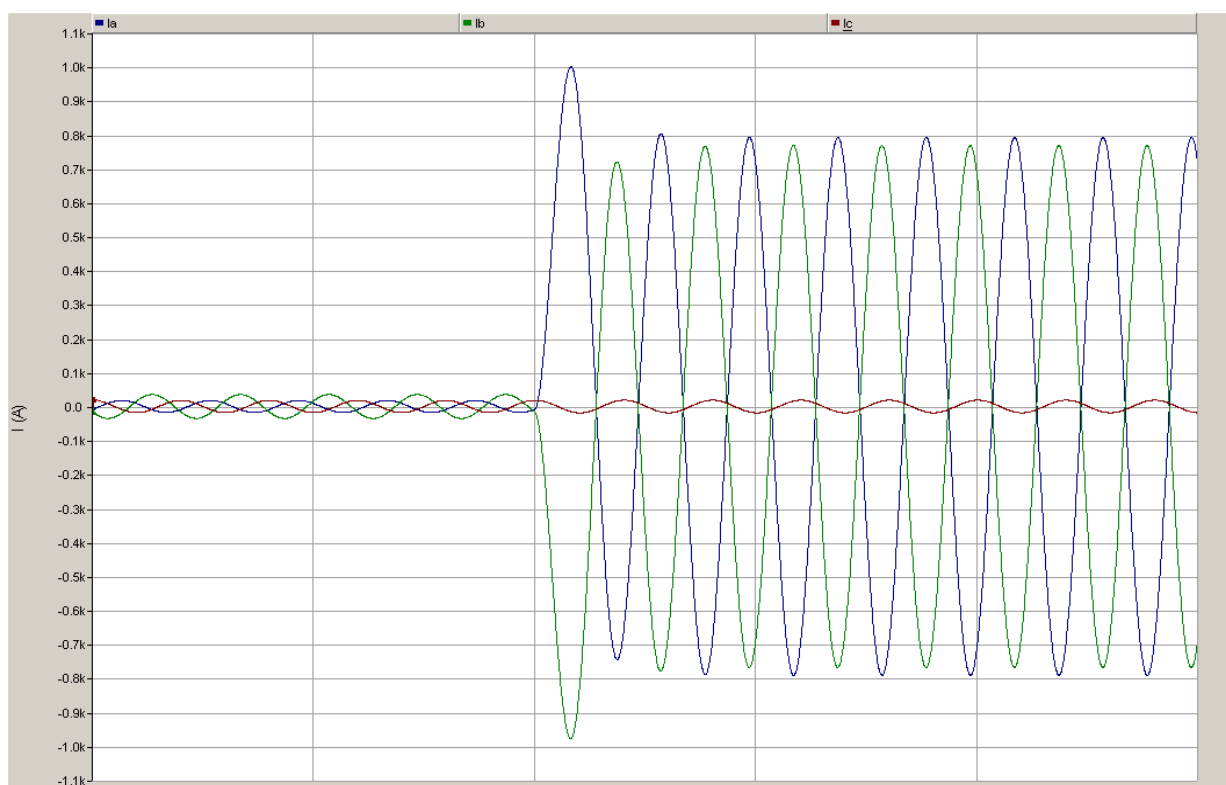
Obr. 10-12 ATPDraw – průběhy fázových proudů



Obr. 10-13 DYMOLA – průběhy fázových proudů



Obr. 10-14 DYNAST – průběhy fázových proudů



Obr. 10-15 PSCAD – průběhy fázových proudů

10.7 Poznátky z používání daných simulačních programů

V této kapitole shrnu zkušenosti, které jsem získal prací v těchto simulačních programech při modelování zvoleného problému.

Sestavení obvodu je ve všech simulačních programech poměrně snadné, pouze je třeba respektovat různé způsoby vkládání a propojování prvků. Některé programy totiž nedokáží automaticky upravovat propojení při přesunu některých prvků ve schématu (PSCAD), nebo vyžadují více trpělivosti při propojování komponent (ATPDraw), případně neumožňují rotaci komponent (DYMOLA). Dále je třeba hlídat, v jakých jednotkách a v jakém tvaru se zadávají parametry jednotlivých prvků. Každý simulační program má totiž vlastní, od ostatních nepatrně odlišné, požadavky na jednotky proměnných. Tvorba grafických výstupů je ve všech daných simulačních programech snadná, rozdíly jsou pouze v možnosti úprav grafů. Pokud je v simulovaném obvodu nějaká chyba, simulace nejde spustit a program zobrazí varování. Nejlépe je v tomto ohledu zpracován PSCAD, který rovnou vypíše o jaký problém se jedná, případně i ukáže prvek, na kterém k chybě došlo. Zbývající programy pouze ohlásí, že se stala během simulace chyba.

Dle mého názoru je pro modelování v elektroenergetice nejvýhodnější použít přímo specializované simulační programy ATPDraw a PSCAD. S DYNASTem a DYMOLou jsem sice dokázal danou úlohu odsimulovat, nicméně si myslím, že při modelování složitějších problémů v elektroenergetice nejsou tyto dva programy vhodné.

11. ZÁVĚR

V této práci jsem se věnoval simulačním programům použitelným v elektroenergetice a simulaci. Nejprve jsem pro tuto práci definoval základní pojmy a terminologii, která se používá v této inženýrské oblasti a také jsem vypracoval některé obecné požadavky na počítačovou simulaci.

Vybral jsem několik současných programových modulů, které je možné použít pro simulace v energetice. Vybral jsem jak přímo specializované simulátory, tak i univerzální programy použitelné i v jiných oborech. Konkrétně se jedná o programy ATPDraw, DYNAST, DYMOLA a PSCAD. Ve výběru se tak objevily dva komerční (DYMOLA a PSCAD) a dva volně šiřitelné simulátory (ATPDraw a DYNAST). Většinu z těchto programů jsem stručně popsal a více se věnoval popisu PSCADu, u kterého jsem sepsal některé postřehy zjištěné během jeho používání.

Ten jsem poté srovnal s ostatními simulátory podle několika kritérií s různou bodovou vahou. I přes některé nedostatky vyšel z tohoto srovnání vítězně PSCAD, následovaný programem ATPDraw. Zbývající dva simulační programy jsou sice v některých ohledech lepší než PSCAD nebo ATPDraw, nicméně v klíčových oblastech zaostávají. Pokud bych měl definovat ideální simulační program pro použití v elektroenergetice, pravděpodobně by to byla kombinace všech čtyřech zmíněných simulátorů.

Také jsem vyjmenoval a stručně popsal některé ze specifických úloh, které se mohou modelovat v elektroenergetice. Poté jsem se pokusil vypracovat omezení výpočetních algoritmů vybraných simulačních programů, nicméně jsem je musel popsat pouze obecně. Tyto informace se totiž nedají získat v žádném veřejném informačním zdroji a nechtějí je zveřejňovat ani výrobci. Když jsem chtěl tyto údaje zjistit na zákaznické podpoře jednotlivých simulačních programů, tak mě buď odkázali na obecné informace v nápovědě, nebo mi neodpověděli vůbec.

Stručně jsem popsal obecný postup výpočtu u několika specifických problémů v energetice. Dále jsem jeden z nich namodeloval na počítači. Navrhl jsem proto jednoduchou síť, na které jsem postupně ve všech čtyřech programech odsimuloval dvoufázový zkrat. Uvedl jsem jakým způsobem jsem v jednotlivých simulátorech modeloval daný obvod a zmínil jsem i poznatky získané při pracovním postupu. Získané údaje jsem poté pro ukázkou výsledků zobrazil v grafech.

Tato práce by také mohla být přínosná při výběru vhodného simulačního programu pro modelování problémů v elektroenergetice. Na zvolené programy jsem totiž pohlížel nejen z technického hlediska (který program má nejlepší vlastnosti pro elektroenergetiku), ale i z uživatelského, kdy jsem posuzoval snadnost ovládání. Může se také hodit jako ukáзка různých přístupů potřebných při práci s těmito simulačními programy.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BAXANT, P. Počítačové modelování a simulace, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2003, 33 stran
- [2] Křivý, I., Kindler, E. Simulace a modelování, Ostravská univerzita, Přírodovědecká fakulta, Ostrava 2001, 146 stran
- [3] Rábová, Z., Češka, M., Zendulka, J. Modelování a simulace, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechnická, SNTL Praha 1982, 338 stran
- [4] Blažek, V., Skala, P. Distribuce elektrické energetice, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno 2004, 140 stran
- [5] Manitoba Research Centre, PSCAD Users Guide V4.2.pdf, 531stran
- [6] Prikler, L., Høidalen, H. Kr. ATPDraw User's Manual, ATPDWPDF.pdf, Trondheim, Norway 1998, 193 stran
- [7] <http://www.emtp.org/>
- [8] <http://www.nayakcorp.com/whatisPSCAD.htm>
- [9] <http://icosym-nt.cvut.cz/dyn/manual/>
- [10] <http://homen.vsb.cz/~mah30/pokrocily/html/4vedeni.html>
- [11] http://www.fi.muni.cz/~xpelane/IV109/jaro07/slidy/meze_rustu.pdf
- [12] Dynamsim AB, Dymola User's manual, Dymola5Manual.pdf, 302 stran
- [13] Manitoba Research Centre, PSCAD On-Line Help systém
- [14] <http://en.wikipedia.org/wiki/Modelica>
- [15] <http://www.modelica.org/documents/ModelicaOverview14.pdf>
- [16] <http://journal.fluid.power.net/issue7/software7.html>
- [17] <http://www.cesak.com/download.php?id=222>
- [18] <http://www.sweb.cz/slaboproud/elt2/stranky1/elt048.htm>
- [19] Závodný, M., Paar, M., ATP, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechnická, Brno 2006, 26 stran