

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky

Ing. Martin ZLOMEK

**VLIV NÁHLÝCH POKLESŮ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ NA CHOD
INDUKČNÍHO STROJE**

VOLTAGE SAGS EFFECTS ON INDUCTION MACHINE OPERATION

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.
Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Datum obhajoby: 10.2.2005

KLÍČOVÁ SLOVA

Indukční stroj, poklesy napětí, elektromagnetická kompatibilita, Matlab/Simulink.

KEY WORDS

Induction machine, voltage sags, electromagnetic compatibility, Matlab/Simulink

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Vědecké oddělení FEKT VUT v Brně, Údolní 53, 602 00 Brno.

Obsah

O autorovi	4
Seznam symbolů	5
1 ÚVOD	6
2 ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
3 MODEL STROJE PRO USTÁLENÝ STAV	7
3.1 Optimalizace modelu indukčního stroje	10
3.2 Výpočet parametrů modelu a experimentální ověření přesnosti modelu.....	11
4 SIMULACE VLIVU POKLESU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ NA CHOD INDUKČNÍHO STROJE.....	12
4.1 Volba modelu stroje pro řešení přechodných dějů.....	12
4.2 Implementace modelu do prostředí simulink.....	13
4.3 Výpočet citlivostních charakteristik stroje.....	14
4.3.1 <i>Symetrický 3f pokles</i>	17
4.4 Použití vypočtených charakteristik	20
5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU POKLESU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ NA CHOD STROJE.....	20
5.1 Použité experimentální zařízení	20
5.2 Parametry měřených poklesů napětí	23
5.3 Vyhodnocení experimentálního měření	23
5.3.1 <i>Symetrický 3f pokles</i>	23
5.3.2 <i>Zhodnocení výsledků měření</i>	24
6 ZÁVĚR.....	26
7 LITERATURA.....	27
Abstract.....	30

O autorovi

Martin Zlomek se narodil v roce 1977 v Uherském Hradišti. V roce 1996 ukončil Střední průmyslovou školu elektrotechnickou v Uherském Hradišti. V letech 1996 až 2001 vystudoval magisterský studijní program oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika na VUT v Brně, Fakultě elektrotechniky a informatiky. Od roku 2001 je studentem doktorského studijního programu na VUT v Brně, Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, v oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika.

V průběhu doktorského studia participoval na výuce numerických cvičení v předmětech Teoretická elektrotechnika I a Teoretická elektrotechnika II. Výuce laboratorních cvičení v předmětech Měření v elektrotechnice a Elektrotechnika 1. Je spoluautorem jednoho titulu skript.

V odborné oblasti je autorem nebo spoluautorem 13 publikací, z nichž 2 byly prezentovány na mezinárodních konferencích. V letech 2003 až 2004 získal grant Marie Curie Fellowships a strávil jeden rok na studijní stáži při University of Nottingham, Power Electronics, Machines and Control Group, Velká Británie.

Seznam symbolů

R_1	odpor fáze statoru stroje
L_s	rozptylová indukčnost fáze statoru stroje
X_s	rozptylová reaktance fáze statoru stroje
L_m	statická magnetizační indukčnost stroje
L	dynamická magnetizační indukčnost stroje
X_m	statická magnetizační reaktance stroje
R_{fe}	odpor reprezentující ztráty v železe stroje
L_{r1}	rozptylová indukčnost první větve rotoru stroje
X_{r1}	rozptylová reaktance první větve rotoru stroje
L_{r2}	rozptylová indukčnost druhé větve rotoru stroje
X_{r2}	rozptylová reaktance druhé větve rotoru stroje
R_{r1}	odpor první větve rotoru stroje
R_{r2}	odpor druhé větve rotoru stroje
s	skluz stroje
U_1	efektivní hodnota fázového napětí stroje
\underline{U}_1	fázor efektivní hodnoty fázového napětí stroje
$I_{1..4}$	smyčkový proud náhradního schématu stroje
$\underline{I}_{1..4}$	fázor smyčkového proudu náhradního schématu stroje
I_m	efektivní hodnota magnetizačního proudu stroje
$a_{m1..3}$	parametry spojitě nelineární aproximační funkce
$A_{m1..3}$	parametry lineární lomené aproximační funkce
Ψ_m	spřažený magnetizační tok stroje
I_{1V}	vypočtená efektivní hodnota proudu fáze statoru stroje
I_{1M}	změřená efektivní hodnota proudu fáze statoru stroje
M_V	vypočtená hodnota ustáleného momentu stroje
M_M	změřená hodnota momentu stroje
$\cos\varphi_V$	vypočtená hodnota účinníku stroje
$\cos\varphi_M$	změřená hodnota účinníku stroje
a, b, c	váhové koeficienty účelové funkce
E	hodnota účelové funkce
e	výsledná hodnota účelové funkce
p	hodnota penalizační funkce
x	hodnota hledaného parametru modelu
\underline{v}_1	vektor efektivní hodnoty napětí fáze statoru
$\underline{i}_{1..4}$	vektor efektivní hodnoty smyčkového proudu modelu stroje
\underline{i}_m	vektor efektivní hodnoty magnetizačního proudu
$\underline{\Psi}_{1..4}$	vektor efektivní hodnoty spřaženého toku modelu stroje
$\underline{\Psi}_m$	vektor efektivní hodnoty spřaženého magnetizačního toku
T	okamžitá hodnota momentu stroje
T_1	zatěžovací moment stroje
p_d	počet pólových dvojic
ω_m	mechanická úhlová rychlost
ω	elektrická úhlová rychlost
i_m	okamžitá hodnota efektivní hodnoty magnetizačního proudu stroje
Ψ_m	okamžitá hodnota efektivní hodnoty magnetizačního toku stroje
i_{md}	okamžitá hodnota d složky vektoru magnetizačního proudu stroje
i_{mq}	okamžitá hodnota q složky vektoru magnetizačního proudu stroje

1 ÚVOD

Elektromagnetická kompatibilita je jednou z důležitých disciplín, kterou je nutno uvažovat v procesu návrhu elektrických zařízení. Elektrické zařízení by mělo být odolné vůči rušení a zároveň rušení neprodukovat. Rušením se většinou myslí rušivé elektromagnetické pole produkované elektrickým zařízením. Rušení může být vytvořeno také náhlým poklesem napětí v distribuční síti. Elektrická zařízení napájená z distribuční sítě musí být odolná vůči náhlým podpětím i přepětím v síti. Míru odolnosti elektronických zařízení (počítače, spotřební elektronika atd.) vůči přepětím a podpětím v distribuční síti stanovuje norma IEC 61000-4-11 [23]. Pokud není elektronické zařízení dostatečně odolné vůči náhlým poklesům a přepětím v distribuční síti, může dojít k poruchovým stavům nebo trvalému poškození.

Z distribuční sítě jsou napájena nejenom elektronická zařízení, ale také elektrické stroje. Práce se zabývá analýzou vlivu náhlého poklesu napájecího napětí na chod indukčního stroje. Předpokládáme, že indukční stroj je napájen přímo z distribuční sítě. Následkem náhlého poklesu napájecího napětí dojde ke vzniku přechodného děje. Během poklesu a zpětného zotavení síťového napětí se ve stroji projeví přechodný děj proudu a tím i momentu na hřídeli. Proudové špičky mohou aktivovat jistící prvky stroje, momentové špičky jsou po hřídeli stroje přeneseny na poháněnou mechanickou část a mohou ji poškodit. Následkem poklesu napájecího napětí dojde také k přechodnému poklesu otáček stroje.

Modelováním vlivu náhlého poklesu napájecího napětí na chod indukčního stroje se zabývá např. [2], [3]. Jedná se o výsledky simulací. Experimentální ověření výsledků není často uvedeno. Experimentální měření je náročné, je zapotřebí mít k dispozici dostatečně výkonný zdroj, který napájí indukční stroj a zároveň je schopen generovat náhlý pokles napětí v jedné nebo více fázích napájení stroje. Náhlý pokles napájecího napětí by měl být dostatečně strmý a mělo by být možno měnit okamžik poklesu, velikost poklesu a dobu trvání poklesu. V práci byl k tomu účelu s velkou výhodou použit polovodičový, plně programovatelný, třífázový zdroj firmy California Instruments CI15003iX. Tento zdroj je koncipován pro testování elektromagnetické kompatibility elektronických zařízení a umožňuje generovat široký rozsah poklesů napětí. Pomocí tohoto zdroje jsou v práci experimentálně ověřeny výsledky simulací.

Simulace vlivu poklesu napájecího napětí na chod indukčního stroje je provedena pomocí modelu indukčního stroje. Jedná se o model se soustředěnými parametry, který zohledňuje saturaci magnetického obvodu stroje, ztráty v železe stroje a nerovnoměrné rozdělení proudu v drážce rotoru stroje. V předložené práci je prezentován kompletní postup modelování indukčního stroje. Parametry modelu jsou určeny optimalizací pomocí třídy metod bez derivací. Model je implementován do prostředí Matlab/Simulink. Na stejném stroji byla prováděna měření vlivu poklesu napájecího napětí a experimentální výsledky byly porovnány s výsledky simulací.

2 ROZBOR ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problematika účinků poklesů napětí v distribuční síti na spotřební elektroniku je v literatuře řešena často. Souvisí to se zvýšenou pozorností, která se v poslední době klade na kvalitu dodávky elektrické energie. Elektronické spotřebiče jsou citlivé na poklesy napětí v distribuční síti. Vznikla proto norma, která stanovuje parametry poklesů i přepětí, které musí spotřebič přestát bez toho, aniž by selhal [21]. Z distribuční sítě jsou také napájeny indukční stroje. Indukční stroje menších výkonů jsou převážně napájeny z polovodičových měničů. V tomto případě ovlivňují případné poklesy napětí řídicí elektroniku měniče [4]. Indukční stroje větších výkonů jsou mnohdy připojeny do sítě přímo. Případné poklesy napětí působí přímo na chod stroje a mohou způsobit proudové či momentové špičky. Problematikou vlivu náhlých poklesů napájecího napětí na chod indukčního stroje se předložená práce zabývá.

Články popisující simulace účinků poklesů napětí na chod indukčního stroje v literatuře existují. Jedná se o příspěvek [3], kde je prezentován algoritmus pro analýzu účinků poklesů napětí. Algoritmus je založen na myšlence, že elektrické časové konstanty a mechanické časové konstanty indukčního stroje se řádově liší. Je proto možné řešit nezávisle elektrické přechodné děje a mechanické přechodné děje. To umožňuje zrychlení výpočtů. Autoři použili tuto metodu pro analýzu symetrických i nesymetrických poklesů napájecího napětí indukčního stroje [2]. Autoři však nehovoří, jakým způsobem lze získat parametry do jimi prezentovaného modelu. Zcela také chybí porovnání výsledků s měřeními na reálném stroji.

Modely indukčního stroje se dají rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou modely s rozprostřenými parametry. Modely jsou řešeny například metodou konečných prvků. Tyto modely se nejvíce přibližují realitě, ale jsou výpočetně velmi náročné. Není možné použít těchto modelů pro analýzu několika stovek poklesů napětí o různých parametrech. Druhou skupinu modelů indukčního stroje představují modely se soustředěnými parametry. Tyto modely jsou výpočetně méně náročné. Patří sem modely indukčního stroje v tzv. přirozených souřadnicích. Tyto modely modelují každou fázi stroje zvlášť a nepoužívají žádné transformace stavových proměnných modelu [12], [14]. Pro urychlení výpočtu se stavové veličiny modelu transformují do referenčních os d-q [1]. Tyto modely jsou nazývány d-q modely indukčního stroje. Hlavní oblastí použití d-q modelů je vektorové řízení pohonů s indukčními stroji. Nicméně d-q modely lze modifikovat, aby zohledňovaly další jevy. V příspěvku [5] se hovoří o způsobech zanesení nelineární magnetizační charakteristiky stroje do modelu. Článek [7] prezentuje způsob zohlednění ztrát v železe stroje. Příspěvek [17] popisuje způsob zohlednění nerovnoměrného rozložení proudu v drážce rotoru indukčního stroje. Zohledněním dodatečných jevů se modely stávají přesnějšími a lze je použít pro analýzu stavů indukčního stroje při zachování přijatelné výpočetní náročnosti modelu [9].

Při identifikaci parametrů modelu indukčního stroje můžeme postupovat následovně. Pokud pracujeme s modelem s rozprostřenými parametry jsou parametry modelu geometrické rozměry stroje a materiálové konstanty použitých materiálů. Modely indukčního stroje se soustředěnými parametry využívají elektrická náhradní schémata stroje. Tyto schémata se většinou skládají z induktorů a rezistorů [1]. Induktory i rezistory mohou být nelineární [9]. Metody identifikace těchto parametrů mohou být různé. Nejčastěji používanou metodou pro identifikaci parametrů d-q modelu indukčního stroje je měření naprázdno a nakrátko [22]. Tato metoda vyžaduje při měření nakrátko mechanické zablokování rotoru stroje, což může zvláště u větších strojů činit potíže. Metoda rovněž neumožňuje určení rozptylové indukčnosti statoru a rotoru odděleně. Další metoda identifikace parametrů je založena na měření impedance stroje v dostatečně širokém frekvenčním pásmu [10]. Ze změřené závislosti impedance vinutí stroje je sestaven náhradní obvod stroje. Metoda ovšem vyžaduje zdroje vyšších výkonů, schopné generování širokého rozsahu výstupní frekvence, což činí problémy. Další metoda spočívá v identifikaci parametrů modelu stroje pomocí optimalizační metody. Metoda vychází ze znalosti zatěžovacích charakteristik stroje, které je poměrně snadné změřit, nebo je možné je spočítat pomocí modelu stroje s rozprostřenými parametry. Optimalizační procedura nastavuje parametry d-q modelu indukčního stroje tak, aby model co možná nejpřesněji aproximoval zatěžovací charakteristiky stroje. Autor v [8] používá gradientní metodu optimalizace parametrů modelu. Optimalizovaný d-q model však obsahuje pouze lineární rezistory a induktory. Autor v závěru podotýká, že lze očekávat problémy s konvergencí gradientní metody v případě nelineárních prvků modelu či nevhodných počátečních podmínkách.

3 MODEL STROJE PRO USTÁLENÝ STAV

Popsaná metoda identifikace parametrů je založena na znalosti zatěžovacích charakteristik stroje. Zatěžovací charakteristiky jsou aproximovány modelem pro ustálené stavy indukčního

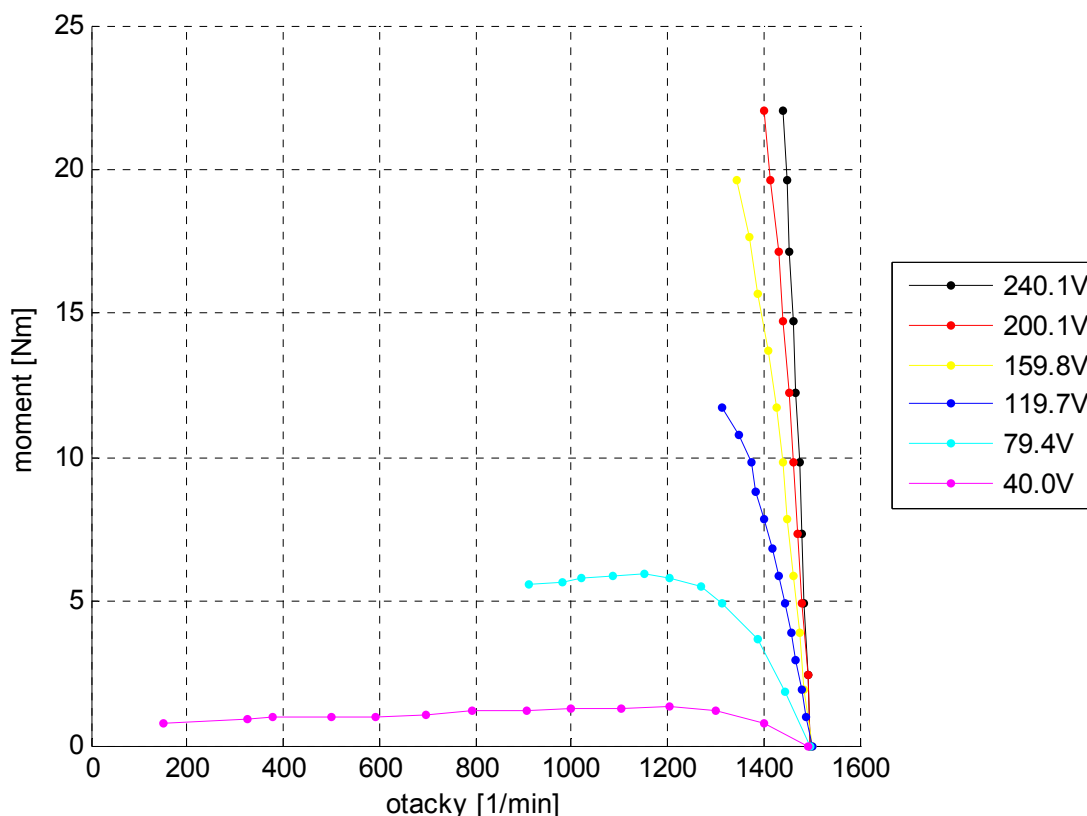
stroje. Model je reprezentován náhradním článkem, který zohledňuje saturaci magnetického obvodu, ztráty v železe stroje a nerovnoměrné rozložení proudu v drážce rotoru indukčního stroje.

Klasicky jsou parametry modelu získány z měření stroje naprázdno a nakrátko. Tento postup je pro jeho jednoduchost často používán, ale představuje jisté problémy. U výkonnějších strojů může činit problém měření stroje nakrátko, neboť je potřeba mechanicky zablokovat rotor stroje. Model získaný pomocí metody měření stroje naprázdno a nakrátko nedává dostatečně přesné výsledky. Model nezohledňuje saturaci magnetického obvodu. Z těchto důvodů byla použita nová metoda identifikace parametrů, která výše zmíněné nedostatky odstraňuje.

Prezentovaná metoda identifikace parametrů modelu indukčního stroje je založena na znalosti zatěžovacích charakteristik stroje. Zatěžovací charakteristiky jsou snadno změřitelné. Při měření zatěžovacích charakteristik je zapotřebí měřit tyto veličiny: vstupní proud, činný příkon, moment stroje, napájecí napětí a otáčky stroje. Pro dané konstantní napájecí napětí je vhodné stroj postupně zatěžovat až do nominálního statorového proudu stroje. Pro dané napájecí napětí je vhodné odměřit alespoň 8 zatěžovacích bodů. Napájecí napětí se po odměření první série zatěžovacích bodů sníží a opět se změří alespoň 8 zatěžovacích bodů. Rozsah napájecího napětí stroje je vhodné zvolit tak, aby měření bylo provedeno alespoň pro 6 napěťových hladin.

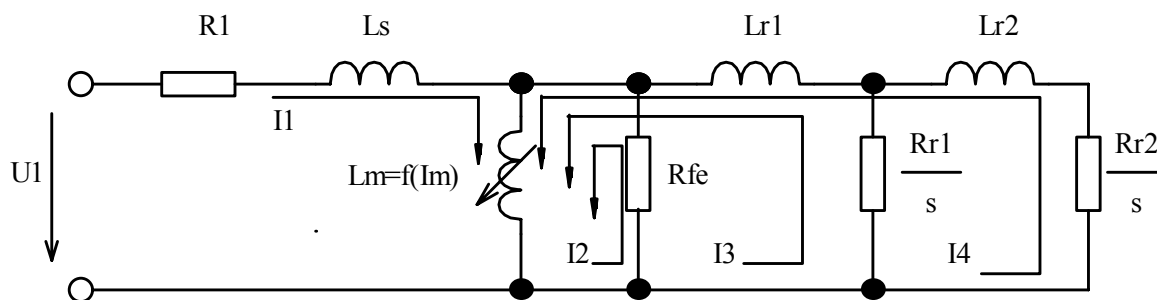
Momentové zatěžovací křivky stroje jsou vyneseny na **Obr. 3.1**. Zatěžovací křivky byly měřeny pro 6 hodnot napájecího napětí v rozsahu 240V až 40V. V legendě **Obr. 3.1** jsou v hodnotách napájecích napětí desetinná čísla, protože se jedná o průměrné hodnoty nastaveného napájecího napětí. Nebylo totiž možné dodržet přesně hodnotu např. 240V pro každý zatěžovací bod charakteristiky. Napájecí napětí se tedy mírně měnilo ($\pm 1V$) s průměrnou hodnotou 240.1V.

Je vhodné naměřit alespoň jednu zatěžovací křivku stroje pro skluz blízký se 1 (otáčky blízký se 0). V případě stroje 3kW, 1120 $ot.min^{-1}$, 220V, 50Hz bylo dosaženo nejmenších otáček 149 $ot.min^{-1}$ při napájecím napětí 40V. Nízkých otáček není bohužel možné dosahovat při vyšších napájecích napětích z důvodu proudového přetížení stroje.



Obr. 3.1: Momentové zatěžovací charakteristiky 3kW stroje No.: 3843343 IM1081

Zatěžovací charakteristiky jsou aproximovány modelem pro ustálené stavy indukčního stroje. Jedná se o jednofázový náhradní členek pro ustálené stavy indukčního stroje, který je zobrazen na **Obr. 3.2**.



Obr. 3.2: Náhradní členek indukčního stroje pro ustálené stavy

Náhradní členek na **Obr. 3.2** zohledňuje saturaci magnetického obvodu stroje, ztráty v železe stroje a nerovnoměrné rozložení proudu v drážce rotoru stroje. Saturace magnetického obvodu stroje je zohledněna pomocí nelineárního induktoru L_m . Ztráty v železe stroje jsou zohledněny rezistorem R_{fe} . Nerovnoměrné rozložení proudu v drážce rotoru stroje (skin efekt) je zohledněno kaskádním spojením R-L prvků $L_{r1}-R_{r1}/s$ a $L_{r2}-R_{r2}/s$. Indukčnost nelineárního induktoru L_m (magnetizační indukčnost) je funkcí efektivní hodnoty proudu procházející induktorem. Při vlastní optimalizaci modelu – hledání parametrů náhradního članku – je potřeba pro dané napájecí napětí a daný skluz opakovaně řešit soustavu nelineárních rovnic popisujících náhradní členek.

Za účelem aproximace magnetizační charakteristiky stroje použita funkce pro spřažený magnetický tok cívkou [9]

$$\Psi_m = a_{m1}i_m + a_{m2} \arctan \frac{i_m}{a_{m3}} \quad (3.1)$$

Magnetizační indukčnost lze zapsat

$$L_m = a_{m1} + \frac{a_{m2} \arctan \frac{i_m}{a_{m3}}}{i_m} \quad (3.2)$$

Funkce (3.2) nabývá pro nulový magnetizační proud hodnoty $a_{m1}+a_{m2}/a_{m3}$. Poté hodnota indukčnosti klesá. Ukazuje se, že rovnice magnetizační indukčnosti (3.2) a magnetizačního toku (3.1) dostatečně vhodně aproximují nelineární závislost magnetizační indukčnosti.

Pro odhad tvaru aproximace magnetizační charakteristiky stroje je možné použít aproximace spřaženého magnetizačního toku pouze pomocí lineární lomené čáry

$$\Psi_m = A_{m1}i_m, \quad i_m \leq \frac{A_{m2}}{A_{m1} - A_{m3}} \quad (3.3)$$

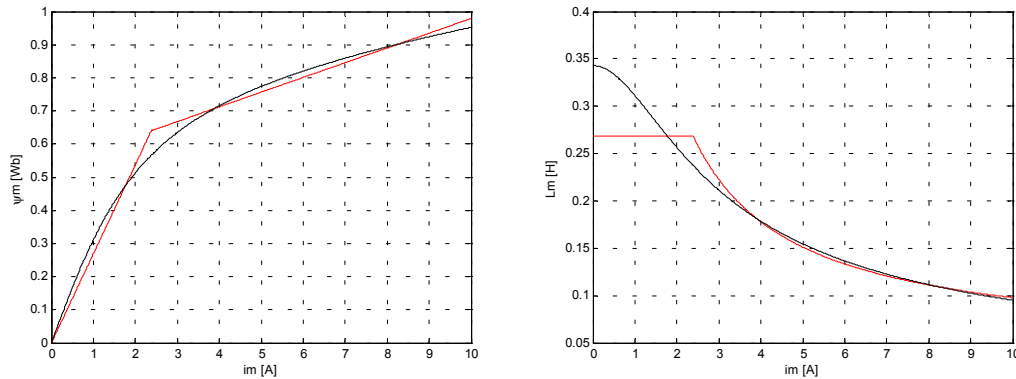
$$\Psi_m = A_{m2} + A_{m3}i_m, \quad i_m > \frac{A_{m2}}{A_{m1} - A_{m3}}$$

Magnetizační indukčnost lze zapsat

$$L_m = A_{m1}, \quad i_m \leq \frac{A_{m2}}{A_{m1} - A_{m3}} \quad (3.4)$$

$$L_m = \frac{A_{m2}}{i_m} + A_{m3}, \quad i_m > \frac{A_{m2}}{A_{m1} - A_{m3}}$$

Na **Obr. 3.3** je vynesena tvar v práci použitých aproximačních funkcí (3.1), (3.2) a (3.3), (3.4).



Obr. 3.3: Tvary aproximačních funkcí spřaženého magnetizačního toku a magnetizační indukčnosti, rovnice (3.1), (3.2), a (3.3), (3.4).

3.1 OPTIMALIZACE MODELU INDUKČNÍHO STROJE

Optimalizací modelu indukčního stroje je rozuměno nalezení takových parametrů náhradního článku na **Obr. 3.2**, aby se zatěžovací charakteristiky vypočtené z náhradního článku co nejpřesněji shodovaly s naměřenými charakteristikami. Je nutné definovat účelovou funkci, která stanoví velikost chyby. V práci byla použita účelová funkce

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left\{ a \left[\frac{I_{Vij} - I_{1Mij}}{I_{1Mij}} \right]^2 + b \left[\frac{M_{Vij} - M_{Mij}}{M_{Mij}} \right]^2 + c \left[\frac{\cos \varphi_{Vij} - \cos \varphi_{Mij}}{\cos \varphi_{Mij}} \right]^2 \right\}, \quad (3.5)$$

kde n představuje počet změřených statických charakteristik pro různá napětí, m představuje počet bodů v jednotlivých statických charakteristikách. Index M označuje naměřenou hodnotu, index V označuje vypočtenou hodnotu, která je stanovena pomocí náhradního článku a jeho parametrů (parametry jsou optimalizovány). Koeficienty a , b , c jsou váhové koeficienty, které mohou upravit váhu některé z veličin.

Je nutné zabezpečit, aby parametry optimalizovaného náhradního článku nenabývaly hodnot, které postrádají fyzikální význam. Není například žádoucí, aby odpory či induktory v náhradním článku měly záporné hodnoty. Tento problém byl v práci řešen pomocí penalizační funkce $p(x_j)$. Úkolem penalizační funkce je zvětšit hodnotu účelové funkce, pokud dojde k překročení přípustného rozsahu hledaného parametru x_j . Penalizační funkce p násobí účelovou funkcí E definovanou rovnicí (3.5). Výsledná účelová funkce je potom rovna

$$e = E \left(1 + \sum_{i=1}^m p(x_i) \right), \quad (3.6)$$

kde m je počet optimalizovaných parametrů.

V práci byla zvolena metoda optimalizace pomocí genetických algoritmů. Ukázalo se, že náhradní člunek, jehož parametry podléhají optimalizaci, představuje poměrně komplikovanou nelineární soustavu. V případě klasické optimalizace (gradientní) je velmi kritická volba počátečních hodnot hledaných parametrů článku. Bohužel není možné vždy vhodně zvolit počáteční hodnoty parametrů, protože jsou známy přinejlepším jen velmi hrubě. Neznalost počátečních hodnot parametrů článku činila obtíže a klasická optimalizace selhávala nebo nacházela jen lokální minima účelové funkce.

Optimalizace pomocí genetických algoritmů se ukázala jako velmi vhodná v případě neznalosti počátečních hodnot parametrů. Metoda si také velmi dobře poradí s komplikovaným nelineárním systémem, jakým je náhradní člunek pro ustálené stavy indukčního stroje.

Veličiny s indexem V v účelové funkci (3.5) je nutné spočítat z náhradního článku na **Obr. 3.2**. Je nutné řešit soustavu nelineárních rovnic popisující náhradní člunek stroje.

3.2 VÝPOČET PARAMETRŮ MODELU A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ PŘESNOSTI MODELU

Statické zatěžovací charakteristiky indukčního stroje 3kW, 1120 ot.min⁻¹, 220V, 50Hz , No.:3843343 byly experimentálně změřeny. Naměřené hodnoty vstupují do optimalizační procedury. Optimalizační procedura využívá pro minimalizaci účelové funkce metodu genetických algoritmů. V práci byl použit program Matlab. Jedním z jeho toolboxů je Genetic Algorithm Toolbox, který je koncipován jako grafické prostředí, kde uživatel vyplní parametry metody. Účelová funkce (3.5) byla implementována do tzv. „m-file“. M-file je soubor obsahující zdrojový kód programu Matlab. Většina parametrů optimalizační metody genetických algoritmů byla ponechána na implicitně nastavených hodnotách prostředí Genetic Algorithm Toolbox. Změněna byla jen velikost populace na hodnotu 35. Optimalizace náhradního článku pomocí genetických algoritmů byla ukončena po 355. Následně je použita klasická gradientní optimalizace, jejíž počáteční hodnoty jsou hodnoty spočtené pomocí metody genetických algoritmů, ale tentokrát jsou optimalizovány parametry spojitě aproximační funkce (3.1). Tento postup byl zvolen proto, protože je výhodnější použít metodu genetických algoritmů pro nastartování optimalizace a uvažovat přitom jen lineárně lomenou čáru jakožto aproximaci magnetizační indukčnosti. Nastartování optimalizace je mnohem stabilnější, než v případě, kdy se hned použije aproximace spojitou funkcí (3.1). Následně použitá gradientní metoda nalezne konečné minimum velmi rychle a stabilně, protože řešení nastartované metodou genetických algoritmů se nachází již poměrně blízko. Konečné parametry optimalizovaného náhradního článku jsou v **Tab. 3.1**.

Tab. 3.1: Parametry optimalizovaného náhradního článku, účelová funkce $e=0.68$:

$R_1=3.64 \Omega$ (zvoleno)	$R_{fe}=2080 \Omega$
$X_s=3.64 \Omega$ (zvoleno)	$X_{r1}=2.5052 \Omega$
$a_{m1}=2.3014E-3$ H	$R_{r1}=3.2535 \Omega$
$a_{m2}=5.5042E-1$ Wb	$X_{r2}=2.4581E-1 \Omega$
$a_{m3}=1.69$ A	$R_{r2}=3.0594 \Omega$
Hodnota účelové funkce po optimalizaci: $e=0.68$.	

Celková chyba optimalizace parametrů náhradního článku je dána konečnou hodnotou účelové funkce. Použitá metoda optimalizace parametrů modelu indukčního stroje byla také testována na naměřených zatěžovacích charakteristikách z [8]. Dosažené výsledky optimalizace parametrů náhradního článku jsou lepší než optimalizace provedená v [8]. Lepší výsledky byly

dosaženy díky uvažování nelinearity magnetizační indukčnosti. Konečná hodnota účelové funkce uváděná v [8] je 0.22. Metoda prezentovaná v této práci minimalizuje stejnou účelovou funkci na hodnotu 0.12, což je téměř dvakrát méně. Lze tedy usuzovat, že postup identifikace parametrů prezentovaný v této práci je platný a přináší dokonce lepší výsledky.

4 SIMULACE VLIVU POKLESU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ NA CHOD INDUKČNÍHO STROJE

4.1 VOLBA MODELU STROJE PRO ŘEŠENÍ PŘECHODNÝCH DĚJŮ

Model použitý pro simulaci vlivu poklesu napájecího napětí na chod indukčního stroje vychází z plně transformovaného modelu. Transformace je provedena do ortogonálních os d-q, které rotují obecnou úhlovou frekvencí ω_a [1]. Model je odvozen za následujících předpokladů. Uvažujeme stroj se symetrickým rozložením vinutí po 120° prostorově, uvažujeme harmonické rozložení toku podél vzduchové mezery, zanedbáváme vliv drážkování, klec rotoru je nahrazena ekvivalentním trojfázovým vinutím, parametry stroje považujeme za kmitočtově nezávislé, zanedbáváme všechny parazitní kapacity.

Vylepšený model použitý v této práci bude zohledňovat nelinearitu magnetického obvodu. Dále bude zohledňovat ztráty v železe stroje a nerovnoměrné rozložení proudu v drážce rotoru stroje.

Po zvolení vektorů smyčkových proudů v schématu na **Obr. 3.2** jako stavových proměnných dostáváme napěťové rovnice stroje

$$\underline{v}_1 = R_s \underline{i}_1 + d\underline{\psi}_1 / dt + j\omega_a \underline{\psi}_1 \quad (4.1)$$

$$0 = R_{fe} \underline{i}_2 + d\underline{\psi}_2 / dt + j\omega_a \underline{\psi}_2 \quad (4.2)$$

$$0 = R_{r1} \underline{i}_3 + d\underline{\psi}_3 / dt + j(\omega_a - \omega) \underline{\psi}_3 \quad (4.3)$$

$$0 = R_{r2} \underline{i}_4 + d\underline{\psi}_4 / dt + j(\omega_a - \omega) \underline{\psi}_4 \quad (4.4)$$

$$\underline{\psi}_1 = L_s \underline{i}_1 + L_m \underline{i}_m, \quad \underline{\psi}_2 = L_m \underline{i}_m, \quad \underline{\psi}_3 = L_{r1} (\underline{i}_3 + \underline{i}_4) + L_m \underline{i}_m, \quad (4.5)$$

$$\underline{\psi}_4 = (L_{r1} + L_{r2}) \underline{i}_4 + L_{r1} \underline{i}_3 + L_m \underline{i}_m \quad \underline{\psi}_m = L_m (\underline{i}_1 + \underline{i}_2 + \underline{i}_3 + \underline{i}_4) = L_m \underline{i}_m$$

$$T = p_d 3 / 2 \operatorname{Im}(\underline{\psi}_1^* \underline{i}_1) = J d\omega_m / dt + T_l \quad (4.6)$$

Kde \underline{v} , \underline{i} a $\underline{\psi}$ jsou vektory napětí, proudů a magnetických toků. Vektory proudů a vektory toků jsou transformovány do vztažné soustavy os d-q, která se otáčí úhlovou rychlostí ω_a . Indexy s a r označují stator a rotor, p_d představuje počet pólových dvojic. T je okamžitá hodnota momentu stroje, T_l zatěžovací moment. Rovnice (4.6) je mechanickou rovnicí stroje. Elektrická úhlová rychlost ω je udána v elektrických radiánech za sekundu. S mechanickou úhlovou rychlostí ω_m je svázána vztahem

$$\omega = p_d \omega_m \quad (4.7)$$

Pokud uvažujeme nelinearitu magnetického obvodu stroje, je magnetizační indukčnost nelineární funkcí modulu vektoru magnetizačního proudu. Modul vektoru magnetizačního proudu a modul vektoru magnetizačního toku jsou definovány

$$i_m = \left| \underline{i}_1 + \underline{i}_2 + \underline{i}_3 + \underline{i}_4 \right| = \left| \underline{i}_m \right|, \quad (4.8)$$

$$\psi_m = L_m |i_m| = L_m i_m, \quad (4.9)$$

Modul i_m reprezentuje efektivní hodnotu magnetizačního proudu. V soustavě rovnic (4.1) až (4.5) je zapotřebí také derivace magnetizační indukčnosti podle času. Vztah pro časovou derivaci magnetizační indukčnosti je

$$\frac{dL_m}{dt} = \frac{L - L_m}{i_m^2} \left[i_{md} \frac{di_{md}}{dt} + i_{mq} \frac{di_{mq}}{dt} \right]. \quad (4.10)$$

Kde L_m je statická magnetizační indukčnost definovaná rovnicí (3.2). L je dynamická magnetizační indukčnost, která je definována jako derivace magnetizačního toku (3.1) podle modulu vektoru magnetizačního proudu

$$L = a_{m1} + \frac{a_{m2}}{a_{m3}} \frac{1}{1 + \left(\frac{i_m}{a_{m3}} \right)^2}. \quad (4.11)$$

Soustava rovnic (4.1) až (4.5) je upravena do maticového tvaru vhodného k pozdějšímu nasazení programu MATLAB.

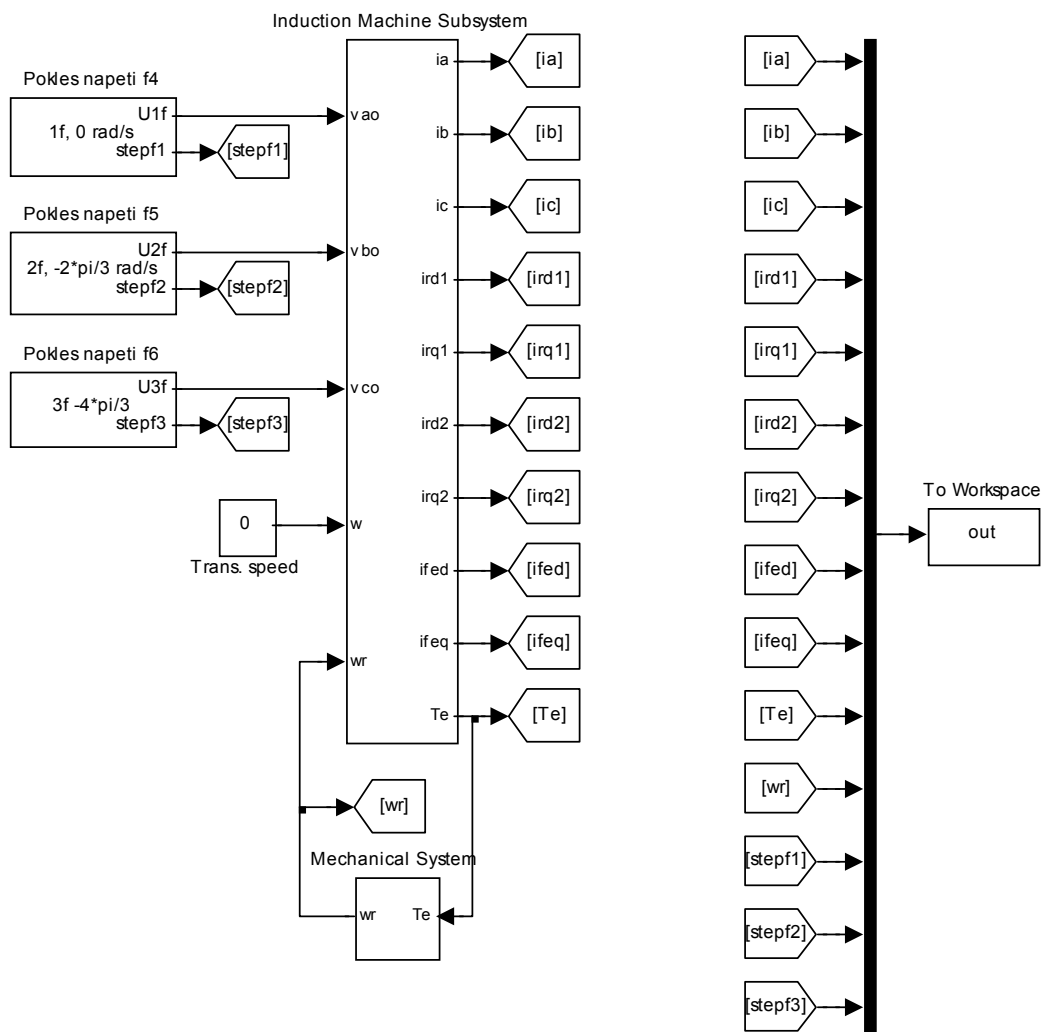
4.2 IMPLEMENTACE MODELU DO PROSTŘEDÍ SIMULINK

Simulační a výpočetní software Matlab obsahuje mimo jiné i prostředí Simulink. Prostředí Simulink se jeví jako velmi vhodné při simulaci elektrických pohonů. Jednou z hlavních výhod prostředí Simulink je jeho modulárnost. Každý prvek modelované soustavy je reprezentován blokem. Do bloku vstupují vstupní proměnné a vystupují z něj výstupní proměnné. Jestliže byl blok jednou definován, je možné jej použít znova v jiném modelu.

Cílem práce je vytvořit blok, který reprezentuje model indukčního stroje. Blok bude využit při simulaci vlivu poklesu napájecího napětí na chod stroje. Blok v sobě zahrnuje rovnice modelu indukčního stroje (4.1) až (4.5). Jedná se o soustavu nelineárních obyčejných diferenciálních rovnic. Pro popis vnitřní struktury bloku byl využit přístup pomocí tzv. S-funkce. S-funkce je funkce v prostředí Matlab/Simulink, která charakterizuje daný blok modelu, aniž by se musela graficky definovat vnitřní struktura bloku. S-funkce je běžný podprogram v prostředí Matlab/Simulink, tzn. soubor s příponou m. S-funkce charakterizuje vztah mezi výstupem a vstupem daného systému. S-funkce musí mít danou strukturu, protože Simulink se postupně dotazuje a předává S-funkci parametry.

Nejprve je S-funkce inicializována. Poté je S-funkci předán aktuální čas simulace, vektor vstupů systému a vektor stavových proměnných systému. S-funkce musí vrátit vektor derivací stavových proměnných systému. Prostředí Simulink provede integraci stavových proměnných. Poté je opět S-funkci předán aktuální čas simulace, vektor vstupů systému a vektor stavových proměnných systému a S-funkce vrátí vektor výstupů systému. Postup tvorby S-funkcí je podrobně popsán v [28], [29].

Model indukčního stroje na **Obr. 4.1** je reprezentován blokem *Induction Machine Subsystem*. K tomuto bloku jsou připojeny bloky napájecího napětí stroje a blok mechanické zátěže.



Obr. 4.1: Blok modelu indukčního stroje použitý pro výpočet citlivostních charakteristik

4.3 VÝPOČET CITLIVOSTNÍCH CHARAKTERISTIK STROJE

Pokud dojde k náhlému poklesu napětí v síti, některá elektrická zařízení přestanou fungovat, je potřeba zařízení znovu restartovat nebo jsou ztraceny uložené informace. Někdy může dojít k mechanickému poškození výrobků nebo výrobních nástrojů. Počet za rok a typické parametry poklesů napětí v rozvodné síti EU je uveden v **Tab. 4.1** [32].

Tab. 4.1: Počet za rok a parametry poklesů napětí v rozvodné síti EU

Depth (Voltage Reduction)	Duration			
	10 to 100 ms	100 to 500 ms	500 ms to 1 s	1 s to 3 s
10 to < 30 %	61	66	12	6
30 to < 60 %	8	36	4	1
60 to < 100 %	2	17	3	2
100 %	0	12	24	5

Fig. 1 : Number of typical Line Disturbances annually, in Europe.

Následkem poklesu síťového napájecího napětí dojde ke vzniku přechodného děje. V okamžiku poklesu a zpětného zotavení síťového napětí se v indukčním stroji vyskytují proudové

a momentové špičky. Proudové špičky mohou aktivovat jistící prvky stroje. Momentové špičky mohou poškodit poháněnou mechanickou část. Výsledky simulací naznačují, že vyšší proudové a momentové špičky jsou převážně dosaženy při zotavení napájecího napětí než při poklesu.

Prezentovaný algoritmus určuje:

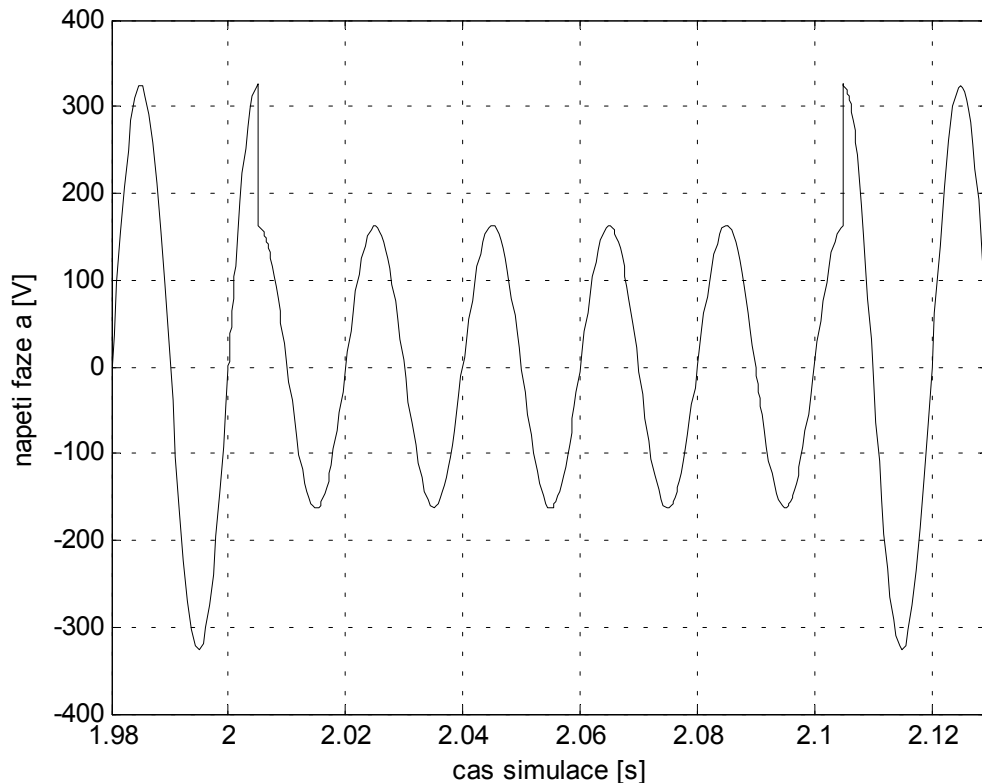
- maximální proudovou špičku dosaženou při poklesu či zotavení napájecího napětí
- maximální momentovou špičku dosaženou při poklesu či zotavení napájecího napětí
- pokles otáček stroje v důsledku poklesu napájecího napětí

Proudové špičky, momentové špičky a pokles otáček stroje jsou vyneseny do citlivostních charakteristik indukčního stroje. Myšlenka citlivostních charakteristik byla převzata z normy Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA). CBEMA křivky slouží ke znázornění odolnosti PC komponentů vůči náhlému poklesu síťového napětí [24]. Osy charakteristik udávají velikost poklesu a dobu trvání poklesu napájecího napětí. Obdobné znázornění může být použito pro znázornění míry vlivu poklesu síťového napájecího napětí na chod indukčního stroje. Křivky jsou spočteny pro široký rozsah poklesů síťového napětí (velikost i doba poklesu) a jsou v nich zaneseny vypočtené maximální proudové špičky, maximální momentové špičky a poklesy otáček stroje. Citlivostní charakteristika indukčního stroje nestanovuje mez vypnutí stroje, nýbrž míru proudové a momentové odezvy stroje na náhlý pokles napětí. Cílem práce je proudové a momentové špičky předem určit. Pokud budeme alespoň přibližně znát citlivostní charakteristiku stroje, tzn. závislost mezi velikostí poklesu napájecího napětí a následnými proudovými a momentovými špičkami, můžeme vhodně nastavit ochrany stroje. Podpět'ové ochrany stroje mohou například chránit mechanickou část poháněného zařízení před nadměrnými momentovými rázy.

Model indukčního stroje, který byl popsán v kapitole 4.1, bude použit pro výpočet citlivostních charakteristik stroje. Model indukčního stroje napájený 3f zdrojem napětí, který generuje poklesy napětí je na **Obr. 4.1**. Proměnné ia , ib , ic , $ird1$, $irq1$, $ird2$, $irq2$, $ifed$, $ifeq$, Te , wr , $stepf1$, $stepf2$, $stepf3$ se společně s časem simulace ukládají do paměti do proměnné out . Uložené statorové proudy ia , ib , ic , moment stroje Te a otáčky rotoru wr se po skončení simulace vyhodnocují. Jsou z nich počítány proudové špičky, momentové špičky a velikost poklesu otáček.

Řešení přechodného děje, který doprovází pokles napájecího napětí, pokaždé vychází z ustáleného stavu stroje. Výchozím stavem pro výpočet citlivostních charakteristik stroje byl zvolen stav blízký nominálnímu stavu. Ustálený stav reprezentují počáteční podmínky simulace. Počáteční podmínky jsou hodnoty stavových proměnných modelu. Jedná o složky transformovaných smyčkových proudů $id1$, $iq1$, $id2$, $iq2$, $id3$, $iq3$, $id4$, $iq4$ a otáčky rotoru wr . Proudové jsou zadány přes dialogové okno modelu indukčního stroje. Otáčky jsou zadány jako počáteční podmínka integračního bloku v modelu mechanické zátěže. Počáteční hodnoty vstupující do simulace byly vypočteny pomocí náhradního článku stroje pro ustálený stav.

Další skutečností, kterou je třeba uvažovat, je okamžik začátku poklesu a zpětného zotavení napětí. Okamžitá hodnota napájecího napětí může nabývat různých hodnot v intervalu $\langle -U_m; +U_m \rangle$, kde U_m je amplituda. Záleží na tom, při jaké hodnotě argumentu harmonické funkce, popisující napětí, se pokles odehraje. Na **Obr. 4.2** je například zobrazen okamžitý průběh napětí fáze a , kdy k poklesu a zpětnému zotavení došlo při hodnotě argumentu $\varpi t = \pi/2$.



Obr. 4.2: Okamžitý průběh napětí fáze a . Pokles napětí při hodnotě argumentu $\omega t = \pi/2$

Při výpočtu citlivostních charakteristik stroje je simulace modelu indukčního stroje z **Obr. 4.1** cyklicky spouštěna pro každý pokles napětí. Na konci každé simulace jsou vyhodnoceny proudové špičky, momentové špičky a pokles otáček. Tyto hodnoty jsou uloženy a pokračuje se v řešení dalšího poklesu napětí.

Citlivostní charakteristiky byly vypočteny pro poklesy napětí s těmito parametry:

Velikost poklesu v intervalu $\langle 1;0 \rangle$ s krokem 0.03. (1 – není pokles, 0 – výpadek napájecího napětí).

Doba trvání poklesu v intervalu $\langle 1\text{ms};1000\text{ms} \rangle$ s krokem: 1ms pro $\langle 1\text{ms};10\text{ms} \rangle$, 2ms pro $\langle 10\text{ms};60\text{ms} \rangle$, 5ms pro $\langle 60\text{ms};100\text{ms} \rangle$, 50ms pro $\langle 100\text{ms};1000\text{ms} \rangle$.

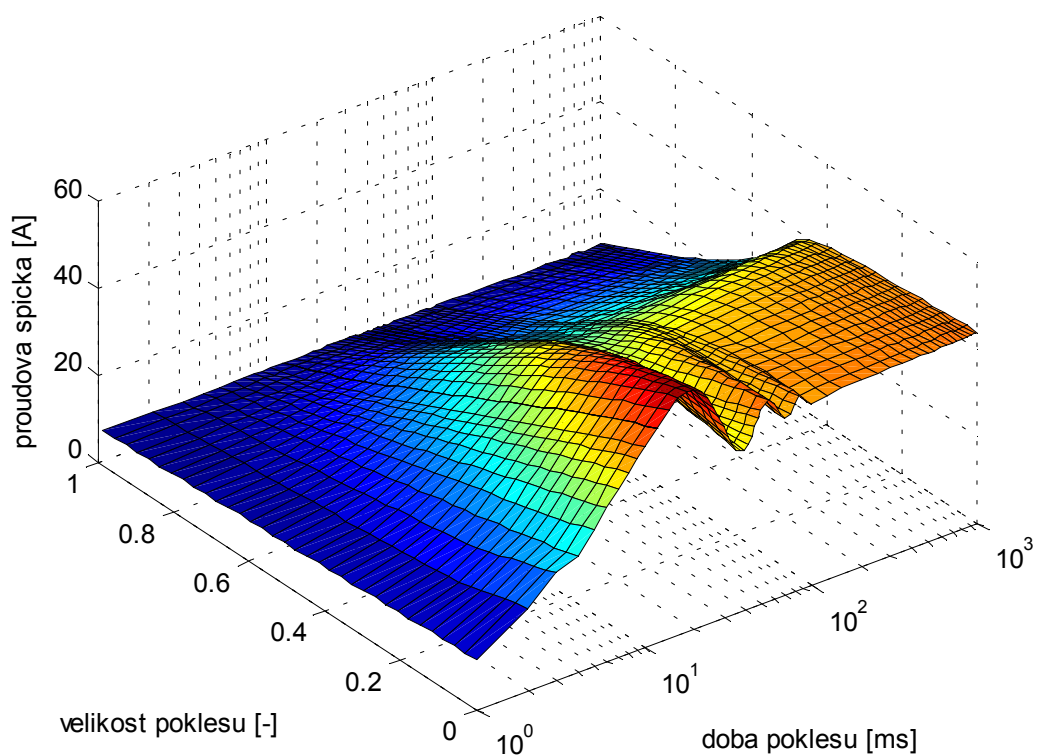
Hodnota argumentu napětí v okamžiku zpětného zotavení napětí: symetrický 3f pokles: $\omega t = \pi/2$, nesymetrický 1f pokles: $\omega t = 0$, nesymetrický 2f pokles: $\omega t = 5\pi/6$

Celkem bylo řešeno 2074 poklesů, a to vždy pro symetrický 3f pokles, nesymetrický 1f pokles a nesymetrický 2f pokles. Pro každý pokles byla spočtena maximální proudová špička, maximální momentová špička a pokles otáček rotoru. V následující podkapitole jsou prezentovány vypočtené citlivostní charakteristiky stroje jen pro symetrický 3f pokles. Citlivostní charakteristiky nesymetrických poklesů jsou uvedeny v původní nezkrácené verzi disertační práce.

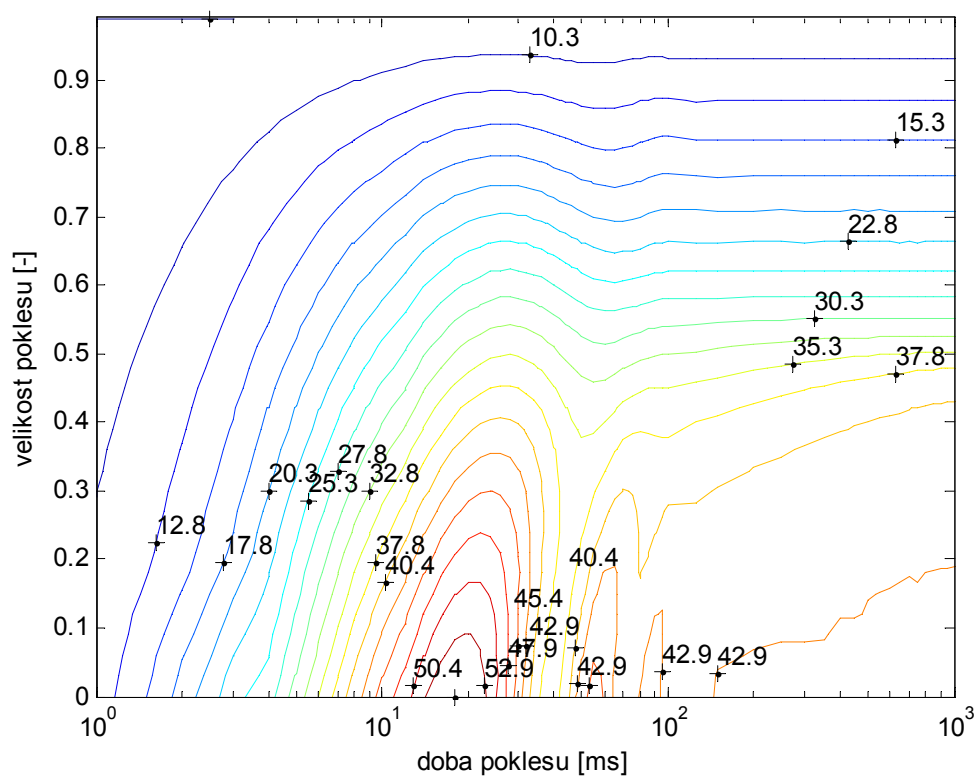
Velikost maximální proudové špičky je vynesena na **Obr. 4.3**, velikost maximální momentové špičky je na **Obr. 4.5** velikost poklesu otáček rotoru je na **Obr. 4.7**. Na obrázcích **Obr. 4.4**, **Obr. 4.6** a **Obr. 4.8** jsou zakresleny řezy ploch obrázků **Obr. 4.3**, **Obr. 4.5** a **Obr. 4.7**.

Parametrem řezů (vrstevnic) jsou vždy postupně: maximální proudová špička, maximální momentová špička a velikost poklesu otáček.

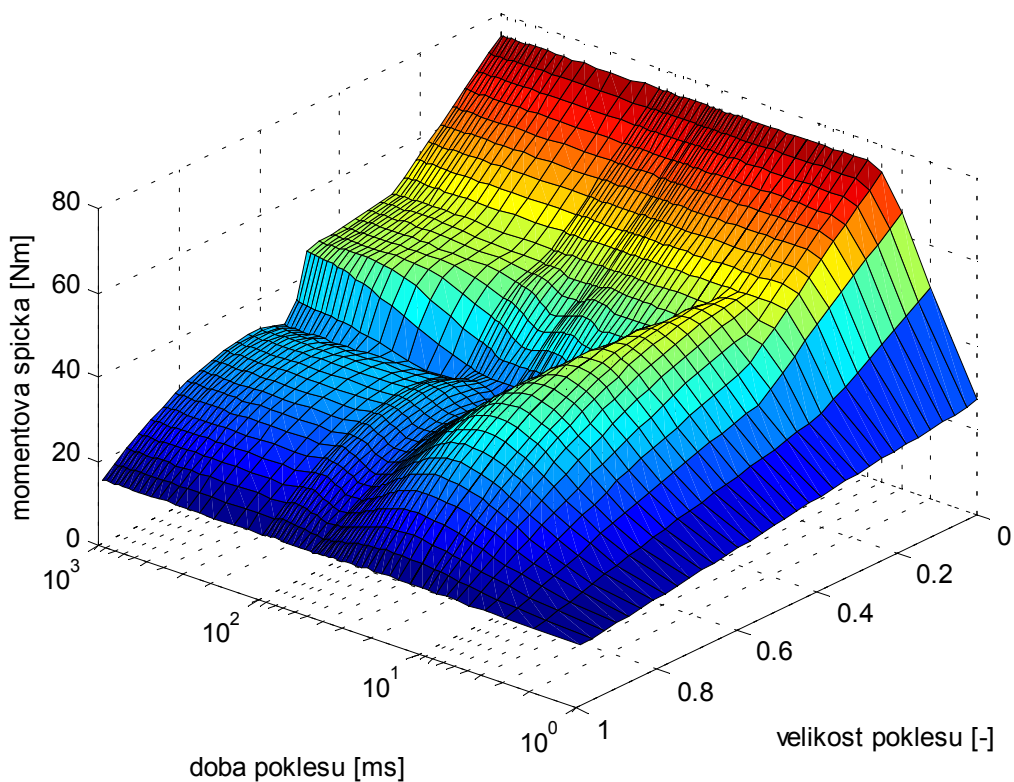
4.3.1 Symetrický 3f pokles



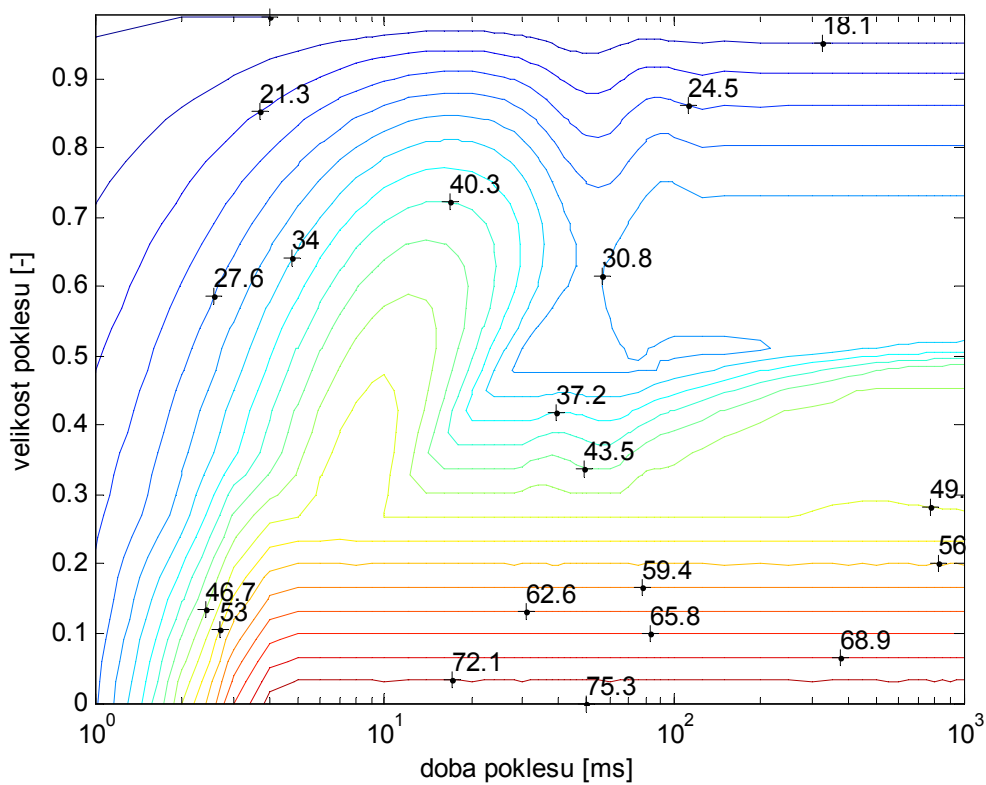
Obr. 4.3: Proudová špička, symetrický 3f pokles



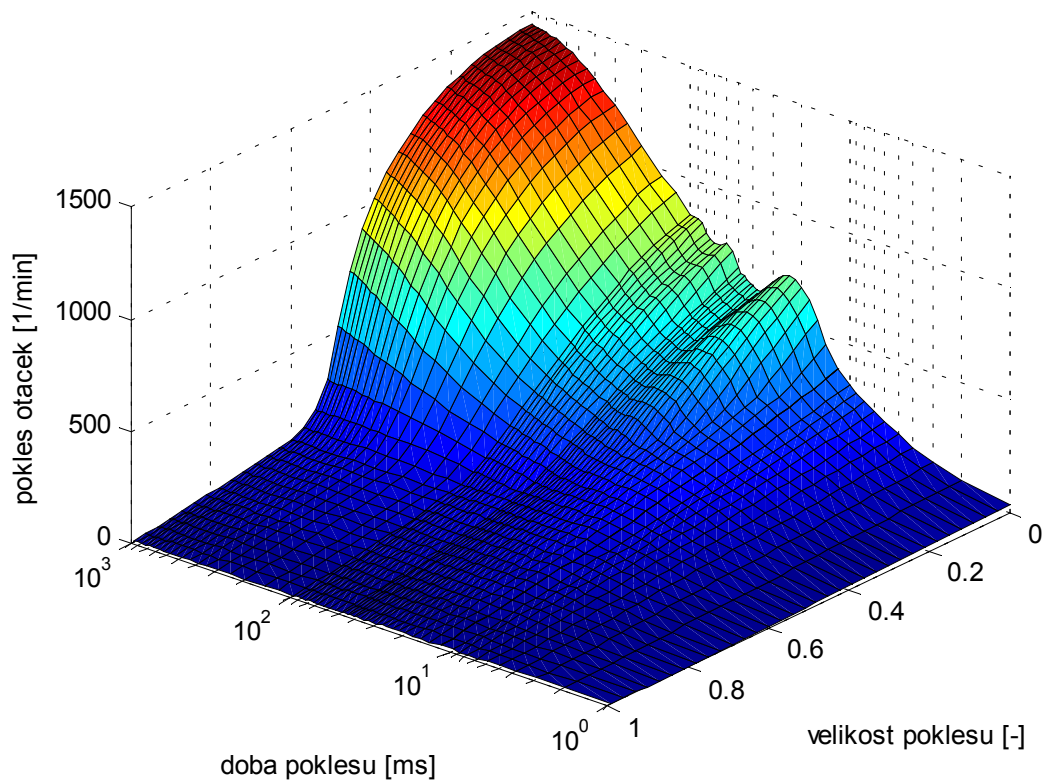
Obr. 4.4: Proudová špička - řezy **Obr. 4.3**, symetrický 3f pokles



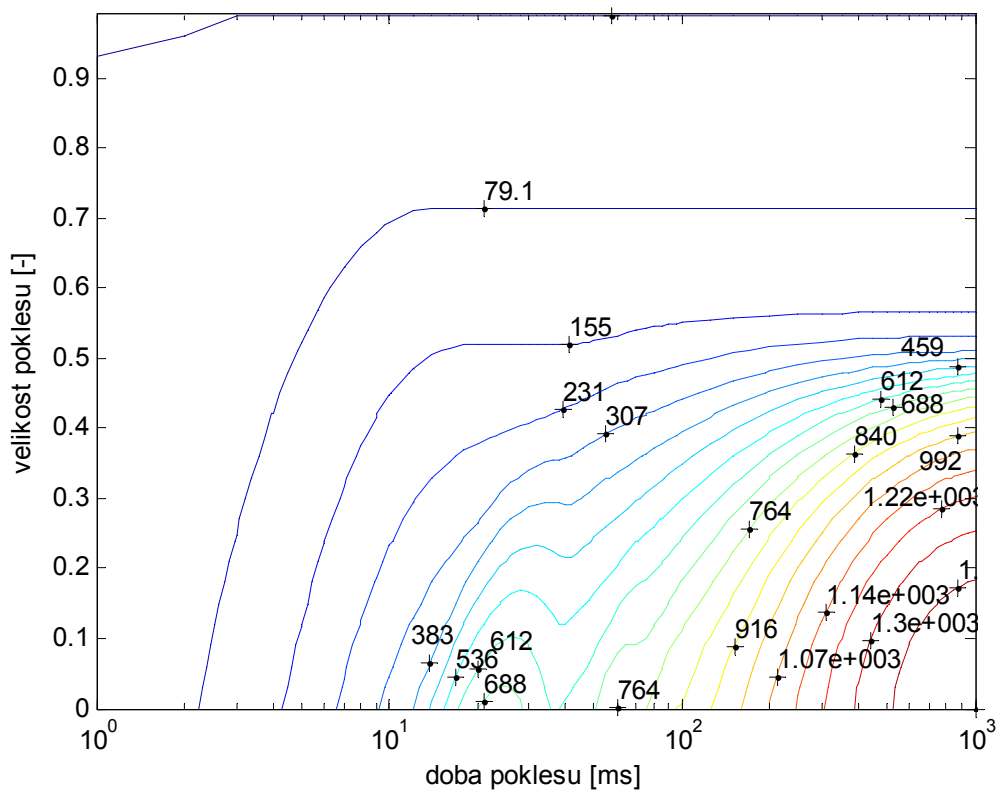
Obr. 4.5: Momentová špička, symetrický 3f pokles



Obr. 4.6: Momentová špička - řezy **Obr. 4.5**, symetrický 3f pokles



Obr. 4.7: Pokles otáček stroje, symetrický 3f pokles

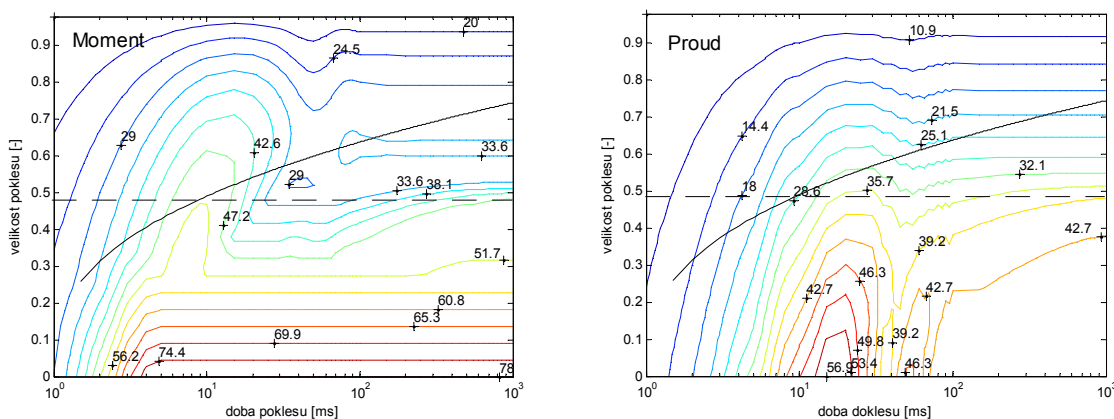


Obr. 4.8: Pokles otáček - řezy **Obr. 4.7**, symetrický 3f pokles

4.4 POUŽITÍ VYPOČTENÝCH CHARAKTERISTIK

Vypočtené charakteristiky symetrických i nesymetrických poklesů je možné použít pro analýzu vlivu poklesů na provoz pohonu. Je-li znám počet a parametry poklesů v dané lokalitě, je možné z charakteristik určit velikost proudových špiček, momentových špiček a poklesů otáček stroje. Stroj je jištěn proudovou ochranou, která reaguje od určité velikosti proudu. Porovnáním velikosti proudu ochrany se špičkovou hodnotou proudu odečtenou z charakteristik lze zjistit, zdali ochrana pro daný pokles zareaguje. Pokud je poháněné mechanické zařízení jištěno proti momentovému rázu, porovnáním nastavené velikosti momentového rázu s momentovou špičkou odečtenou z charakteristik lze opět zjistit, zdali ochrana pro daný pokles zareaguje. Výše uvedené platí také pro případ, že poháněné mechanické zařízení je jištěno proti poklesu otáček. Tímto postupem lze určit počet výpadků pohonu vlivem poklesů napětí v dané lokalitě, což může být zajímavé z hlediska analýzy dodatečných nákladů na prostroje ve výrobním procesu.

Vypočtené charakteristiky mohou být použity pro nastavení podpět'ových ochran stroje. Nastavením časově závislé nebo časově nezávislé vypínací charakteristiky podpět'ové ochrany lze pohon jistit proti účinků poklesů napětí. Časově závislé nebo časově nezávislé vypínací charakteristiky podpět'ové ochrany se vynesou do vypočtené citlivostní charakteristiky stroje. Na poklesy nacházející se nad vypínací charakteristikou podpět'ové ochrany nebude ochrana reagovat. Na Obr. 4.9 vlevo ochrana reaguje na momentovou špičku větší než 51.7Nm.



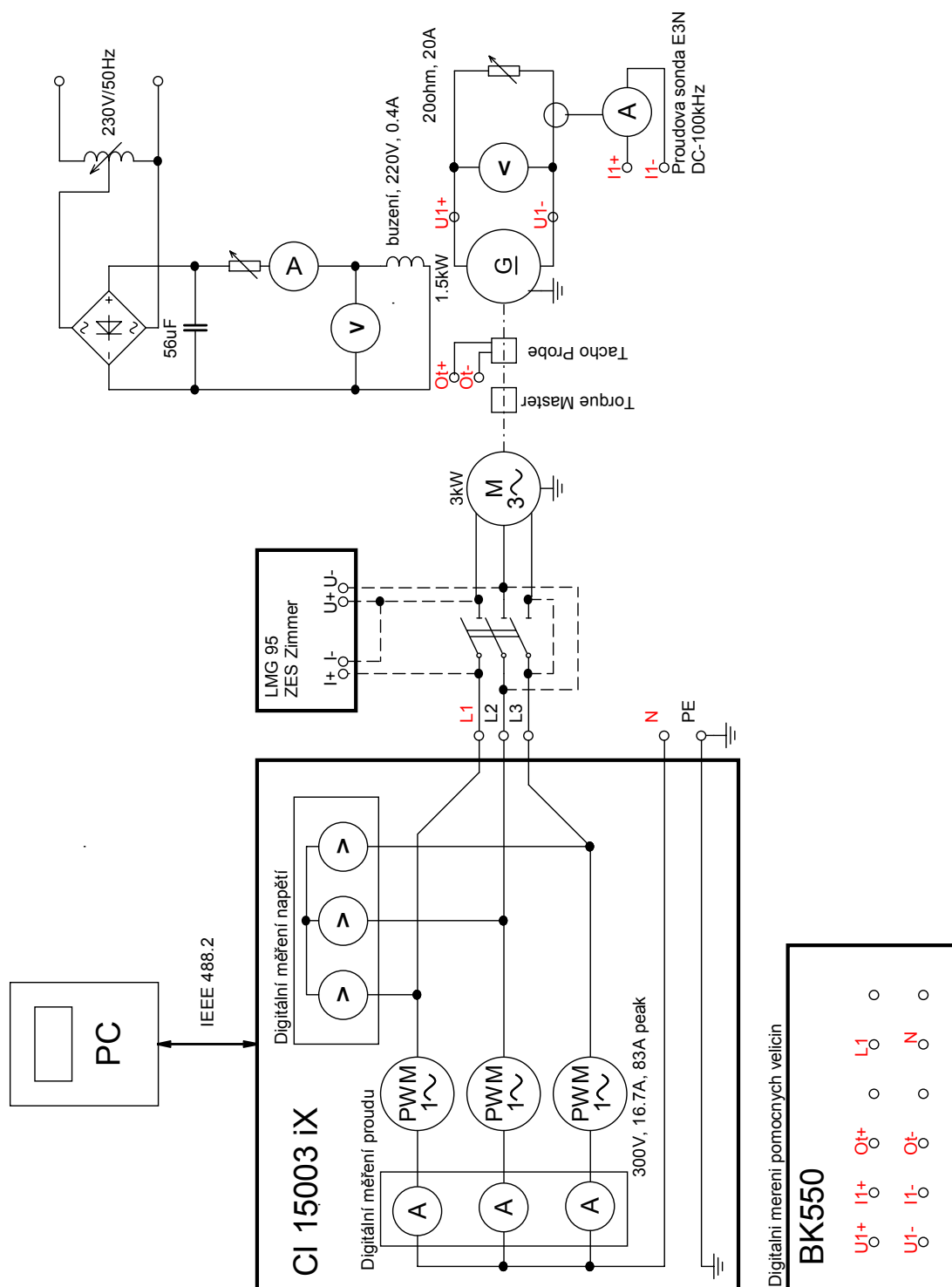
Obr. 4.9: Časově nezávislá (přerušovaně) a časově závislá vypínací charakteristika podpět'ové ochrany zakreslená do charakteristik stroje

5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLIVU POKLESU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ NA CHOD STROJE

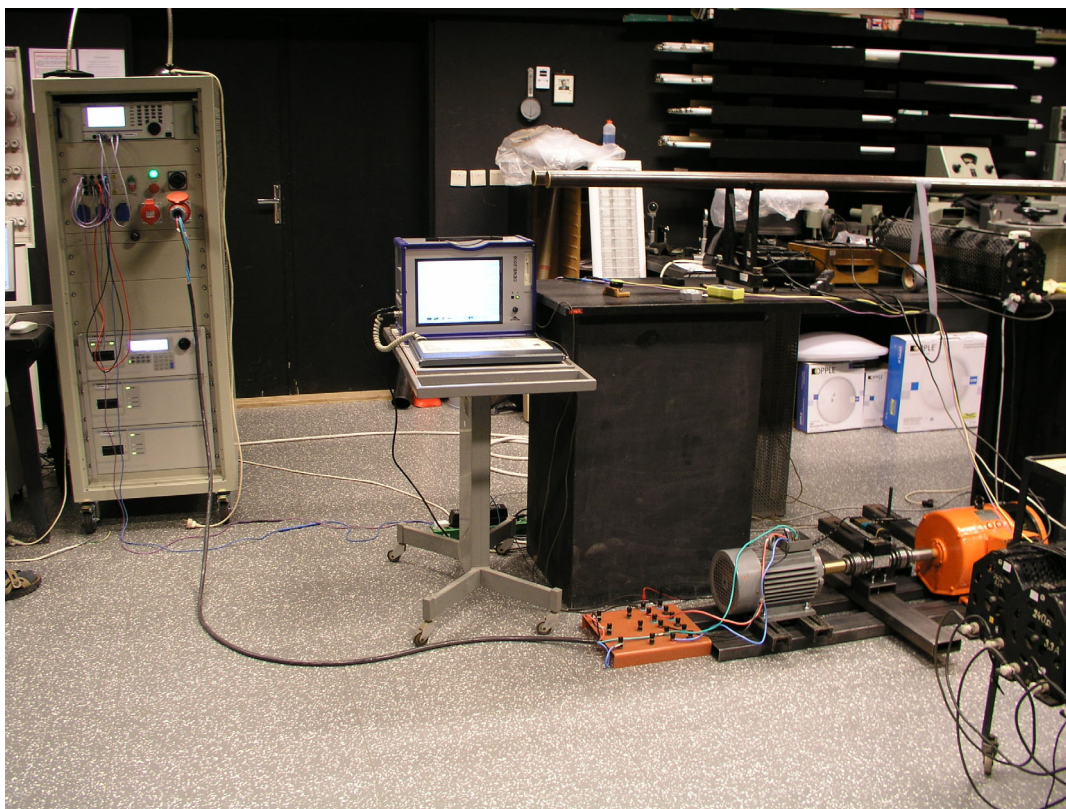
5.1 POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Pro měření vlivu poklesů napájecího napětí je zapotřebí mít k dispozici zdroj, který napájí měřený indukční stroj a zároveň je schopen generovat náhlé poklesy napájecího napětí. Měření je prováděno na zatíženém stroji, zatížení je možné provést pomocí dynama. Na výstupní svorky dynama je připojen zatěžovací odpor, na němž se ztrácí zatěžovací výkon. Stroj je potřeba zatížit nominálním výkonem a nechat ho teplotně stabilizovat po dobu přibližně 30min. Poté je možné přistoupit k vlastnímu měření. Během měření poklesu napětí je třeba zaznamenávat hned několik okamžitých hodnot veličin v čase. Jsou jimi: proudy a napětí ve všech třech fázích indukčního

stroje, otáčky hřídele a moment přenášený po hřídeli, napětí na zatěžovacím odporu a proud zatěžovacím odporem. Schéma zapojení měřícího pracoviště je uvedeno na **Obr. 5.1**. Pohled na měřící pracoviště je na **Obr. 5.2**.



Obr. 5.1: Schéma měřícího pracoviště



Obr. 5.2: Pohled na měřicí pracoviště

Hlavní částí měřicího pracoviště je laboratorní programovatelný 3 fázový polovodičový zdroj California Instruments 15003 iX (na **Obr. 5.2** zcela vlevo). Zdroj se skládá ze tří jednofázových jednotek označených 5001 iX. Zdroj 15003iX je řízen výkonným signálovým procesorem, který umožňuje generovat libovolné tvary výstupního napětí. Zdroj může být ovládán přes zabudovanou klávesnici nebo může být ovládán pomocí PC přes rozhraní IEEE-488 či RS232. Ve zdroji je integrována digitální měřicí jednotka. Zdroj je především určen pro testování elektromagnetické kompatibility elektronických zařízení podle normy IEC. Jedná se o testování odolnosti vůči poklesům napětí, kolísání napětí, harmonických proudů, odchylky od síťové frekvence atd.

Jako měřený indukční stroj je použit stroj 3kW, 1120 ot.min⁻¹, 220V, 50Hz, No.:3843343, MEZ Mohelnice. Zátěž stroje je představována stejnosměrným dynamem s cizím buzením. Dynamo pracuje do zatěžovacího odporu.

Původním záměrem bylo měřit okamžité hodnoty otáček a momentu za pomoci momentové hřídele od firmy TorqueMaster. Za tímto účelem bylo vybudováno lože a momentová hřídel byla upevněna mezi indukční stroj a stejnosměrný generátor. Při následné kalibraci momentové hřídele se však ukázalo, že zařízení není funkční. Z důvodu nedostatku času bylo přistoupeno k tomu, že momentová hřídel bude ponechána na místě, ale bude elektricky odpojována a nebude zaznamenávat časový průběh otáček ani momentu. Jako náhradní snímač otáček byl použit otáčkoměr TachoProbe. Jedná se o bezdotykový optický senzor otáček. Tento otáčkoměr není ovšem schopen zaznamenat časový průběh otáček s dostatečnou šířkou pásma, protože se jedná o pulsní senzor určený pro měření ustálených otáček stroje. Doba mezi dvěma pulsy odpovídá době otáčky hřídele o 360°, což je 40ms. Záznam rychlých změn okamžitých hodnot otáček je tedy zkrácen.

5.2 PARAMETRY MĚŘENÝCH POKLESŮ NAPĚTÍ

Poklesy napájecího napětí jsou generovány polovodičovým 3f zdrojem California Instruments 15003iX. Maximální strmost poklesu napětí je limitována zdrojem. V technické dokumentaci zdroje je uvedena maximální dosažitelná strmost poklesu nebo nárůstu výstupního napětí 325V/200 μ s. V reálných podmínkách se při měřeních dosahovalo strmostí poklesu v rozmezí 325/250 μ s–325/300 μ s. Tyto hodnoty lze považovat za velmi dobré.

Mezi nastavitelné parametry poklesu patří velikost poklesu, doba trvání poklesu, okamžik začátku poklesu a zdali se jedná o pokles symetrický nebo nesymetrický. Zmíněné parametry poklesu se nastavují pomocí řídicího programu zdroje. Řídicí program běží na PC, které je spojeno se zdrojem přes sběrnici IEEE-488.2. Řídicí program komunikuje s uživatelem pomocí dialogových formulářů, kam se přímo vyplní parametry poklesu.

Celkem bylo změřeno 41 poklesů různých parametrů. U symetrického 3 fázového poklesu dojde ve stejný okamžik k poklesu napětí ve všech třech fázích stroje na stejnou hodnotu. Nesymetrický 2 fázový pokles představuje pokles jen ve dvou fázích stroje (fáze A, B). Nesymetrický 1 fázový pokles představuje pokles napětí jen ve fázi A.

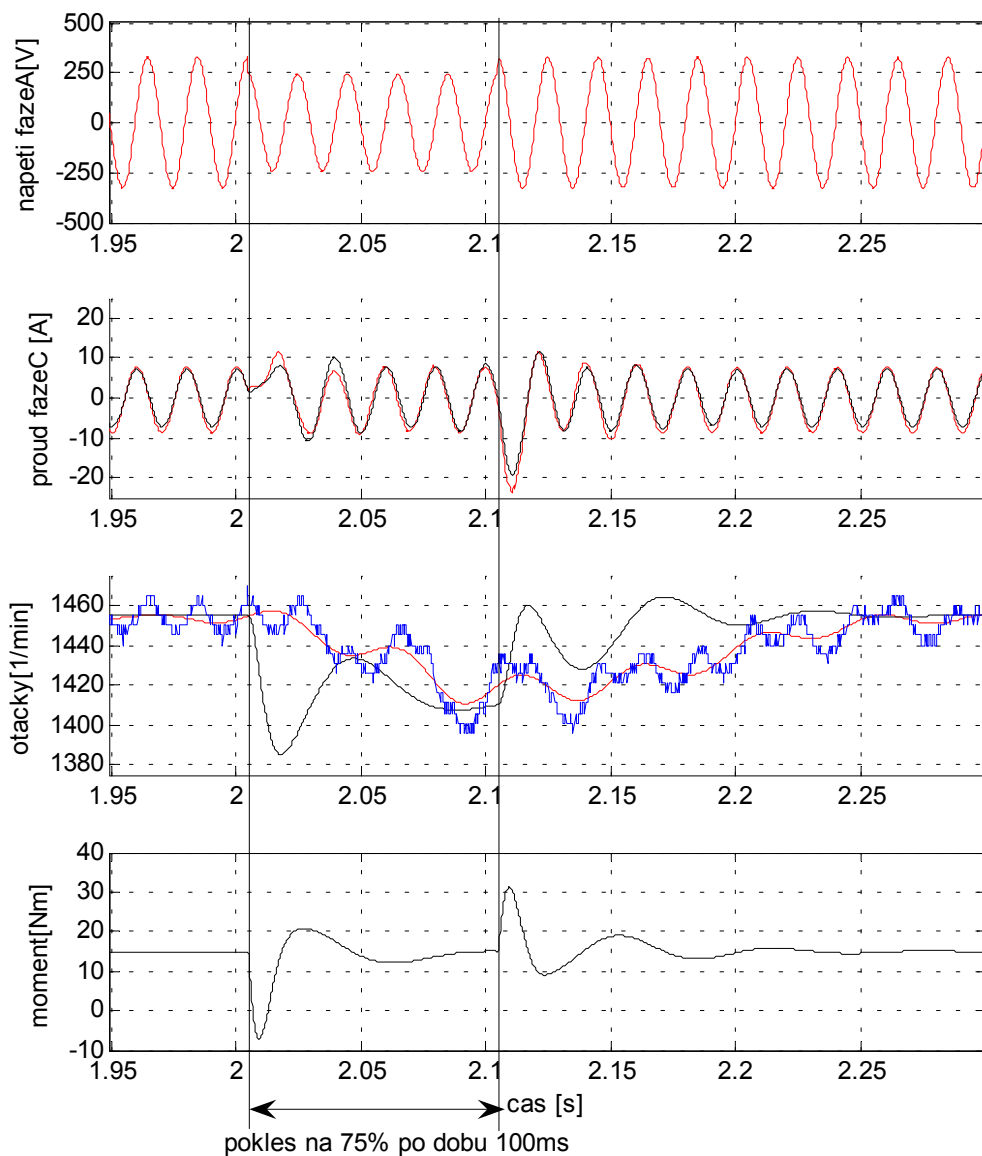
5.3 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

V této kapitole budou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami vypočtenými pomocí simulací. Z naměřených dat byly vyhodnoceny maximální proudové špičky vyskytující se při zpětném zotavení napájecího napětí stroje. Jedná se o maximální hodnotu, která je naměřena ve fázi stroje A, B nebo C. Tato naměřená proudová špička je vynesena do grafu společně s maximální proudovou špičkou vypočtenou pomocí simulací z kapitoly 4. Další porovnávanou veličinou je pokles otáček stroje. Z naměřených a vypočtených dat je určena minimální hodnota, na kterou otáčky během přechodného děje poklesly. Průběhy okamžitých hodnot jsou taktéž porovnány. Jsou prezentovány výsledky pouze pro symetrické 3f poklesy, výsledky pro nesymetrické poklesy jsou uvedeny v původní nezkrácené verzi disertační práce.

5.3.1 Symetrický 3f pokles

V případě symetrických 3f poklesů neovlivňuje okamžik zpětného zotavení napětí velikost proudové špičky. Tento okamžik pouze ovlivňuje ve které fázi stroje se proudová špička objeví. Velikost proudové špičky je téměř neměnná. Velikost momentové špičky je na okamžiku zpětného zotavení napětí nezávislá. Pokles otáček rotoru taktéž. Výše uvedené skutečnosti byly ověřeny simulacemi.

Na **Obr. 5.3** jsou porovnány vypočtené a změřené časové průběhy veličin symetrického 3f poklesu s parametry: velikost 75%, doba trvání 100ms, $\omega t = \pi/2$. Obrázek se skládá ze čtyř částí. První zobrazuje změřený časový průběh napětí fáze A stroje. Druhá zobrazuje změřený a vypočtený časový průběh proudu fáze C stroje. Třetí zobrazuje změřený a vypočtený průběh otáček stroje. Modrá křivka otáček je změřený průběh otáček bez filtrace, červená křivka je změřený průběh otáček po filtrování. Čtvrtá část zobrazuje vypočtený průběh momentu stroje. Červené křivky představují změřené průběhy, černé křivky představují vypočtené průběhy. Proud fáze C je vynesena, protože maximální proudová špička nastává ve fázi C. Je patrné, že změřený průběh otáček stroje neodpovídá vypočtenému průběhu. Jak již bylo uvedeno v diskuzi o použitých přístrojích, je to způsobeno nevhodným otáčkoměrem, který není schopen zaznamenat časový průběh otáček.

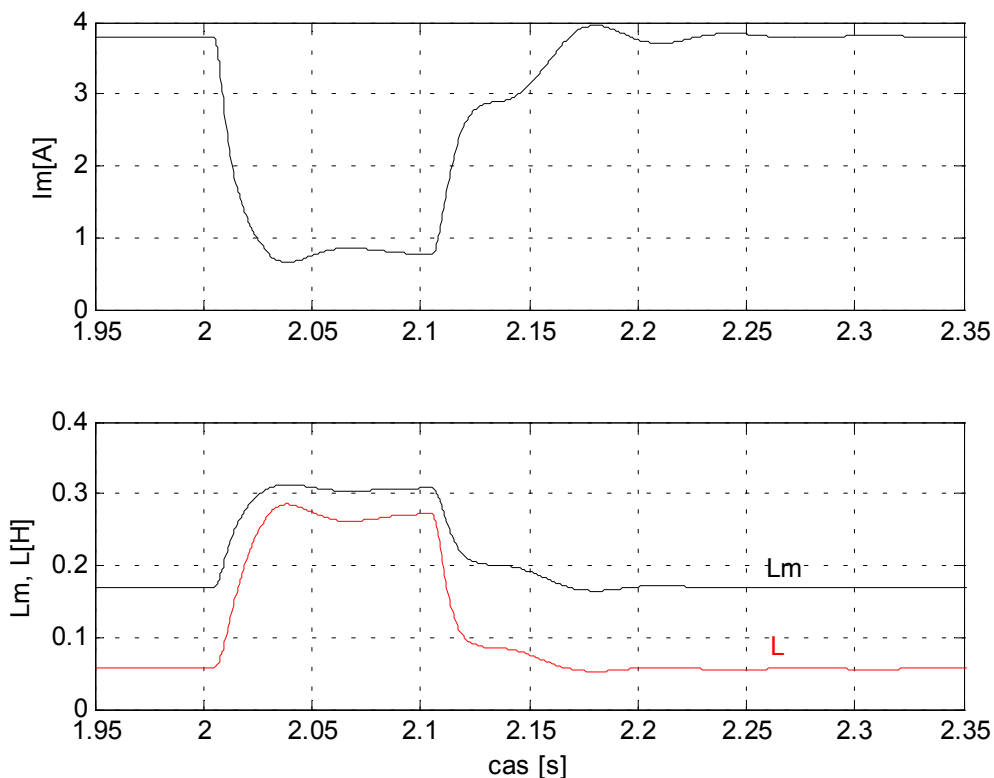


Obr. 5.3: Porovnání změřených (červeně) a vypočtených časových průběhů napětí, proudu, otáček a momentu stroje pro symetrický 3f pokles, velikost poklesu 172.5V(75%), okamžik zpětného zotavení $\omega t = \pi/2$

5.3.2 Zhodnocení výsledků měření

Nejvíce nepříznivé z hlediska maximálních proudových špiček jsou symetrické 3f poklesy napětí, poté následují nesymetrické 2f poklesy a nejmenší proudové špičky doprovázejí nesymetrické 1f poklesy. Dosažená přesnost numerické simulace proudových špiček se pohybuje kolem 25% při porovnání s reálnými měřeními. S velikostí poklesu chyba narůstá. Příčina této nepřesnosti spočívá v nedokonalosti modelu. Parametry použitého model jsou nastaveny tak, aby model modeloval co nejpřesněji celou oblast zatěžovacích charakteristik, které jsou na **Obr. 3.1**. Model není schopen přesně postihnout celou oblast. Pro menší velikosti poklesů postačuje modelem aproximovat jen některé zatěžovací charakteristiky. Přesnost výpočtů by se tím pro menší poklesy zlepšila. Existovalo by tedy několik modelů (např. 3) stejné struktury, ale s rozdílnými parametry, které by se na základě velikosti poklesu zvolily pro výpočet.

Na **Obr. 5.4** je vyneseno vypočtený okamžitý průběh efektivní hodnoty magnetizačního proudu a průběh okamžité hodnoty statické a dynamické magnetizační indukčnosti. Jde o symetrický 3f pokles, velikost 50%, doba trvání poklesu 100ms, $\omega t = \pi/2$. Je patrné, že během poklesu se výrazně zmenší efektivní hodnota magnetizačního proudu. Statická a dynamická magnetizační indukčnost vzrostou přibližně na trojnásobek. Tato výrazná změna statické a dynamické indukčnosti stroje by nebyla v případě modelu s lineární magnetizační charakteristikou postihnuta. Použití nelineární magnetizační charakteristiky je tedy opodstatněné.



Obr. 5.4: Průběh efektivní hodnoty magnetizačního proudu i_m a průběh statické (L_m) a dynamické (L) magnetizační indukčnosti během poklesu napětí (3f symetrický, 50%, 100ms, $\omega t = \pi/2$)

6 ZÁVĚR

V práci je prezentován postup vhodný pro analýzu vlivu náhlého poklesu napájecího napětí na chod indukčního stroje. Pomocí výsledků simulací byly sestaveny citlivostní charakteristiky stroje. Citlivostní charakteristiky představují grafickou závislost maximální proudové špičky stroje na velikosti a době trvání poklesu, grafickou závislost maximální momentové špičky stroje na velikosti a době trvání poklesu, grafickou závislost poklesu otáček stroje na velikosti a době trvání poklesu. Simulace jsou prováděny pomocí modelu indukčního stroje, který byl reprezentován numerickým modelem v prostředí Matlab/Simulink. Model byl sestaven pomocí prvků se soustředěnými parametry, zohledňuje nelineární materiálové charakteristiky stroje, ztráty v železe stroje a nerovnoměrné rozložení proudu v drážce rotoru stroje. Parametry modelu byly identifikovány na základě změřených zatěžovacích charakteristik stroje. K vlastní identifikaci parametrů modelu byla použita metoda genetických algoritmů.

Za účelem měření poklesů napětí na reálném indukčním stroji bylo vybudováno dočasné měřicí pracoviště. Programovatelný polovodičový zdroj CI15003iX firmy California Instruments byl použit ke generování náhlých poklesů napětí. Celkem bylo změřeno 41 poklesů napětí. Ve všech případech byly zaznamenány okamžité hodnoty proudů, napětí a otáček indukčního stroje. Změřené hodnoty byly analyzovány a byla určena maximální proudová špička a maximální pokles otáček stroje pro daný pokles napětí.

Změřené časové průběhy proudů, napětí a otáček stroje byly porovnány s vypočtenými hodnotami. Chyba vypočtených proudových špiček se pohybuje v pásmu s odchylkou 25%. Vzhledem k tomu, že se jedná o špičkové hodnoty je možné tento rozdíl považovat za přijatelný. Tvarová shoda změřených a vypočtených průběhů je velmi dobrá. Z analýzy vlivu poklesů napětí na chod indukčního stroje plyne, že nejvíce nepříznivými jsou symetrické 3f poklesy a nesymetrické 2f poklesy. Nejméně ovlivňují chod stroje nesymetrické 1f poklesy.

Z citlivostních charakteristik je možné určit, jaká maximální proudová nebo momentová špička odpovídá určitému poklesu napětí. Lze nastavit vypínací charakteristiky podpětových ochran tak, aby ochrana zareagovala jen od určité úrovně poklesu napájecího napětí stroje a zároveň tedy pro určitou maximální proudovou či momentovou špičku. Momentová špička by například mohla poškodit poháněnou mechanickou část zařízení. Jiné použití citlivostních charakteristik stroje spočívá v tom, že známe-li četnost a parametry poklesů napětí v dané lokalitě, je možné spočítat počet výpadků zařízení vlivem proudových a momentových špiček.

Oblastí, na které je možné dále pracovat, je zlepšení přesnosti modelu. Ukazuje se, že i když model obsahuje nelineární prvek, není v jeho možnostech lépe aproximovat celou oblast zatěžovacích charakteristik stroje. Jak bylo v práci naznačeno, je možné použít více modelů indukčního stroje, které jsou podobné svým náhradním schématem, ale mají rozdílné hodnoty parametrů. Každý z modelů by aproximoval určitý počet zatěžovacích charakteristik. Přesnost analýzy pro menší poklesy by se tím zlepšila.

7 LITERATURA

- [1] P.Vas, "Electrical Machines and Drives, A space-vector theory approach," Oxford: Clarendon Press, 1992.
- [2] Guasch L., Corcoles F., Pedra J. Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, April 2004-10-21
- [3] Corcoles F., Pedra J. Algorithm for the Study of Voltage Sags on Induction Machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14., No. 4, December 1999
- [4] McGranaghan M. F., Mueller D. R., Samotyj M. J. Voltage Sags in Industrial Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 2, March/April 1993
- [5] E. Levi, "A Unified Approach to Main Flux Saturation Modelling in D-Q Axis Models of Induction Machines" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 10, no. 1, Jan/Feb 1996.
- [6] E. Levi, "Impact of Cross-Saturation on Accuracy of Saturated Induction Machine Models", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 12, no. 3, Sep 1997.
- [7] Levi E., Impact of Iron Loss on Behavior of Vector Controlled Induction Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 6, November/December 1995
- [8] Nevšimal K.: Modelování a simulace asynchronního motoru s rotorem nakrátko. Disertační práce, VUT v Brně, 1995
- [9] Valsa, J.: Počítačová simulace dynamických procesů v soustavách s indukčním elektrickým strojem, Knihnice odborných a vědeckých spisů, svazek A-53, VUT Brno, FEI 1991
- [10] Kuchyňková H. Identifikace parametrů trojfázového asynchronního stroje s klecovou kotvou pro simulační modely, Disertační práce, VUT v Brně, 1996
- [11] Strejček M., Cejchování stejnosměrného stroje, Technický projekt, VUT FEI v Brně, ÚESP, 1998
- [12] Valsa, J.: Mathematical Models of Three-Phase Induction Machines for Time-Domain Simulation with MATLAB, 5th Scientific-Technical Conference, Computer Application in Electrical Engineering, Poznań, April 2000
- [13] Y. W. Liao, Levi E.: Modelling and simulation of stand-alone induction generator with rotor flux oriented control, Electric Power System Research, no. 46, 1998, pp. 141-142
- [14] Jawad Faiz, A.R. Seifi: Dynamic analysis of induction motors with saturable inductances, Electric Power System Research, no. 34, 1995, pp. 205-210
- [15] V. Donescu, A. Charette: Modelling and Simulation of Saturated Induction Motors in Phase Quantities, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, 1999, pp. 386-393
- [16] Xiaogang L., Yuefeng L., Toliyat H.A., El-Antalby, Lipo T.A., Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no. 2, 1995
- [17] Toliyat H.A., Lipo T.A., Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults, IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 10, no. 2, 1995

- [18] Toliyat H.A., A Method for Dynamic Simulation of Air-Gap Eccentricity in Induction Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 4, 1996
- [19] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, "Simulink Implementation of Induction Machine Model – Modular Approach" in Proc. IEEE IEMDC'03, Madison, Wisconsin USA, 2003, vol. 2, pp. 728.
- [20] F. Iov, F. Blaabjerg, A. D. Hansen, Z. Chen, "Comparative Study of Different Implementations for Induction Machine Model in Matlab/Simulink for Wind Turbine Simulation", Proc. IEEE COMPEL'02, Puerto Rico, 2002.
- [21] Recommended Practice for Emergency and Standby Power for Industrial and Commercial Applications, IEEE Standard 446-1995
- [22] IEEE Standard Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-1996
- [23] International Standard IEC 61000-4-11, Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests, IEC 61000-4-11:2004(E)
- [24] <http://powerstandards.com/..%5Ccbema.htm>
- [25] MATLAB The Language of Technical Computing, Getting Started with MATLAB, Version 7, The MathWorks, Inc., June 2004
- [26] MATLAB The Language of Technical Computing, Using MATLAB Graphics, Version 7, The MathWorks, Inc., June 2004
- [27] Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox, User's Guide, Version 1, The MathWorks, Inc., June 2004
- [28] Simulink, Using Simulink, Version 6, The MathWorks, Inc., June 2004
- [29] Simulink, Writing S-Functions, Version 6, The MathWorks, Inc., June 2004
- [30] i Series, iX Series, AC Power Source User Manual, California Instruments, May 2003
- [31] CIGUI32 iX-Series, i-Series, iL-Series, HGA Graphical User Interface, Software User's Manual, California Instruments, Version 1.09, October 2001
- [32] Application note #114, Testing Electric Motor Driven Equipment, California Instruments, 1997, www.calinst.com
- [33] Analyzátor sítí BK550, Uživatelský manuál, Elcom Praha, verze 7.0, srpen 2000
- [34] ZLOMEK, M. Počítačová simulace přechodných jevů v soustavách s asynchronním motorem pomocí programu MATLAB In Sborník prací studentů a doktorandů FEI VUT. Konference a soutěž STUDENT FEI 2000. Brno: FEI VUT Brno, 2000, s. 506 - 508, ISBN 80-7204-155-X
- [35] ZLOMEK, M. Matematické modely asynchronního stroje zohledňující saturaci In Proceedings of 7th Conference STUDENT FEI 2001 Volume 1. Konference a soutěž STUDENT FEI 2001. Brno: FEI VUT Brno, 2001, s. 105 - 107, ISBN 80-214-1859-1
- [36] ZLOMEK, M. Matematické modely asynchronního stroje zohledňující saturaci In Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika 2001. Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika 2001. Brno: ÚVEE FEI VUT Brno, 2001, s. 108 - 110, ISBN 80-214-1887-7

- [37] ZLOMEK, M. Deep Bar Effect Modelling in the Rotor Circuit of an Induction Machine In Proceeding of 8th Conference Student EEICT 2002 Volume 3. Student EEICT 2002., Brno, 2002, s. 410 - 823, ISBN 80-214-2116-9
- [38] ZLOMEK, M. Transient Analysis of Coupled Supplying Circuits - Induction Machine System In 7th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2003. POSTER 2003. Praha: CVUT Praha, 2003, s. 410 - 823, ISBN 80-214-2116-1
- [39] ZLOMEK, M., VESELÝ, M. Implementation of Complex Non-Linear Models in Matlab/Simulink, Example on Induction Machine Drive Modeling In Applied Electronics 2004. Applied Electronics 2004. Plzeň: Západočeská univerzita, Univerzitní 8, 30614 Plzeň, 2004, s. 233 - 468, ISBN 80-7043-274-8
- [40] KADLECOVÁ, E., ZLOMEK, M., VESELÝ, M. Induction Machine Drive Control Modeling and Parameters Identification in Matlab/Simulink In 11th Electronic Devices and Systems Conference 2004, Proceedings. The 11th Electronic Devices and Systems Conference. Brno: VUT v Brně, Antonínská 548/1, 602 00, Brno, 2004, s. 484 - 487, ISBN 80-214-2701-9
- [41] ZLOMEK, M. More Detailed Induction Machine Model in MATLAB/SIMULINK In Annual Proceedings of Technical University in Varna. Annual Scientific Session with International Participation, TU Varna 2003. Varna: High-Technology-Technology Park-TU Varna Ltd., 2003, s. 55 - 62, ISBN 1312-1839

Abstract

The work deals with the voltage sags effects on induction machine operation. The induction machine model is presented and it is used for time domain analysis of the voltage sags effects. The model considers nonlinear material properties, iron loss and deep bar effect. Parameters of the model are obtained from the loading characteristics by means of non-derivation method. The model is implemented into the Matlab/Simulink software and after that the sensitivity curves are obtained. The sensitivity curves represent maximum current peak, maximum torque peak and speed loss for given sag duration and sag depth. It is possible to use the sensitivity curves for induction machine protection settings or for the analysis of the machine drop out amount due to voltage sags. Programmable power source is used for the experimental assessment of the voltage sags effects. Large amount of the voltage sags with different parameters (sag duration, sag magnitude and initial sag instant) were measured. Computed current peaks were compared with those obtained by measurements on real induction machine.