





# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>4</b>
1.1	CNET .....	4
1.2	OČEKÁVANÉ PŘEDNOSTI SYSTÉMU .....	5
<b>2</b>	<b>KAUZÁLNÍ MODEL ASM .....</b>	<b>6</b>
2.1	OBEČNÝ MATEMATICKÝ MODEL ASM .....	6
2.1.1	<i>Diferenciální rovnice ASM .....</i>	<i>6</i>
2.1.2	<i>Náhradní schéma a fázorový diagram ASM .....</i>	<i>7</i>
2.1.3	<i>Použitelnost obecného modelu ASM pro diagnostiku .....</i>	<i>7</i>
2.2	PORUCHY ASM .....	8
2.2.1	<i>Chování ASM při poruchách statoru .....</i>	<i>8</i>
2.2.2	<i>Ostatní poruchy ASM .....</i>	<i>17</i>
2.3	ZAVEDENÍ KVALITATIVNÍCH HODNOT .....	17
2.3.1	<i>Vstupní veličiny .....</i>	<i>17</i>
2.3.2	<i>Diagnostický výstup .....</i>	<i>19</i>
2.4	KAUZALITY .....	19
2.4.1	<i>Bezporuchový stav .....</i>	<i>19</i>
2.4.2	<i>Mezizávitový zkrat .....</i>	<i>20</i>
2.4.3	<i>Mezifázový zkrat .....</i>	<i>20</i>
2.4.4	<i>Zemní zkrat .....</i>	<i>21</i>
<b>3</b>	<b>LABORATORNÍ TESTY .....</b>	<b>22</b>
3.1	POPIS MĚŘÍCIHO PRACOVÍŠTĚ .....	22
3.1.1	<i>Měření a zpracování signálů .....</i>	<i>22</i>
3.1.2	<i>Speciální ASM .....</i>	<i>23</i>
3.1.3	<i>Zatěžovací dynamometr .....</i>	<i>23</i>
3.2	EMULACE STATOROVÝCH PORUCH .....	23
3.2.1	<i>Mezizávitový zkrat .....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Mezifázový zkrat .....</i>	<i>24</i>
3.2.3	<i>Zemní zkrat .....</i>	<i>24</i>
3.3	VÝSLEDKY MĚŘENÍ .....	25
3.3.1	<i>Bezporuchový chod .....</i>	<i>25</i>
3.3.2	<i>Mezizávitový zkrat .....</i>	<i>26</i>
3.3.3	<i>Mezifázový zkrat .....</i>	<i>26</i>
3.3.4	<i>Zemní zkrat .....</i>	<i>27</i>
3.4	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	27
<b>4</b>	<b>SHRNUTÍ, ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ .....</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>30</b>
5.1.1	<i>Kauzální model ASM pro program CNET (zdrojový kód) .....</i>	<i>30</i>
<b>6</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>33</b>

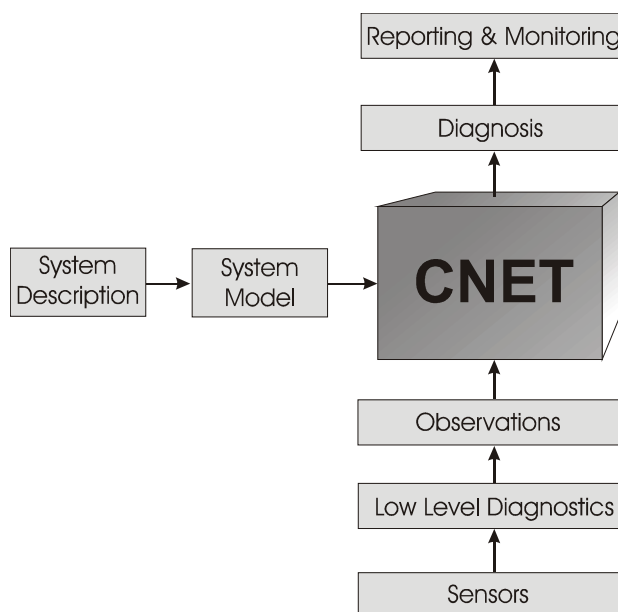
# 1 Úvod

Tato zpráva shrnuje úvodní výsledky výzkumné práce jejímž cílem je vytvoření takového modelu asynchronního motoru (ASM), jenž bude ve spolupráci se systémem CNET<sup>[6]</sup> použit pro on-line diagnostiku jeho poruch. Celkový přístup k tomuto úkolu byl ovlivněn principy a zásadami z nichž vychází diagnostický program CNET, a jenž v sobě spojuje prvky metod, které bývají v odborné literatuře prezentovány pod anglickými termíny *Model-based Diagnostics*, *Causal Network*, a *Qualitative Modelling*.

## 1.1 CNET

Vlastní způsob tvorby samotného diagnostického algoritmu byl určován principy z nichž program CNET vychází, a jež lze shrnout do následujících bodů:

- **Kauzalita** - Na sledovaný systém je nahlíženo jako na systém, jehož chování lze popsat pomocí kauzalit. Tzn., že každý důsledek má svou příčinu, neboli – aby se mohl systém dostat do určitého stavu, musí být splněny určité podmínky.
- **Kvalitativní modelování** - Na jednotlivé veličiny, jenž popisují daný systém, je nahlíženo jako na veličiny kvalitativní. Nezajímá nás jejich přesná absolutní hodnota, nýbrž to, zda spadají do některé z předem definovaných oblastí, které jsou významné z hlediska diagnostiky celého systému.
- **“Model-based“ přístup** - Systém je popisován na základě vztahů, jenž platí pro jeho určitý stav. Za předpokladu, že je systém “zdravý” jsou formulovány základní kauzality popisující celý systém. Tento přístup je odlišný od rozšířené tzv. “rule-based” diagnostiky, jenž buduje vyhodnocovací algoritmus na základě pozorování systému a sledování účinků konkrétních poruch na významné veličiny.



**Obr.1:** Obecné schéma struktury systému CNET<sup>[6]</sup>

## 1.2 Očekávané přednosti systému

Diagnostikou asynchronních motorů se zabývalo a zabývá mnoho odborných týmů po celém světě. Bylo navrženo a odzkoušeno mnoho diagnostických přístupů a metod, jenž se od sebe více či méně různí.

Identifikací poruch ASM pomocí kauzálních sítí si slibujeme především následující:

- Vlastní zpracování diagnostického algoritmu programem CNET je z jeho principu velmi rychlé, nenáročné na výkon procesoru.
- Algoritmus lze snadno rozšiřovat o další kauzální vztahy, jenž povedou k přesnější diagnostice, bez zásahu do HW.
- Celý algoritmus je sepisován jednoduchou předem definovanou syntaxí.
- Díky používání kvalitativních veličin lze algoritmus aplikovat na motory různých typů a výkonů.
- Systém CNET je používán pro diagnostiku různých systémů a technologických procesů. Jeho univerzalita a jednoduchost by mohla vést k jeho širokému rozšíření.

## 2 Kauzální model ASM

Asynchronní motor (ASM) je poměrně složitým, značně nelineárním systémem, jenž bývá nejčastěji popisován soustavou diferenciálních rovnic. Detailní popis jeho struktury a principu jeho práce s odvozením matematického modelu lze nalézt v literatuře<sup>[1-5]</sup>.

### 2.1 Obecný matematický model ASM

Při odvozování základních rovnic pro matematický model ASM se většinou vychází z těchto předpokladů:

- motor je napájen třífázovou symetrickou sinusovou elektrickou soustavou
- vinutí jednotlivých fází je pravidelně rozloženo po obvodu statoru (resp. rotoru)
- hodnoty odporů a indukčností jednotlivých fází statoru (resp. rotoru) jsou shodné
- magnetizační charakteristiky jsou lineární
- ztráty v železe jsou zanedbatelné

#### 2.1.1 Diferenciální rovnice ASM

Asynchronní motor je vícerozměrný systém. Vstupními veličinami jsou statorové napětí, frekvence, zátěžný moment (případně statorový proud), výstupem mohou být otáčky, úhel natočení hřídele, vnitřními proměnnými pak mohou být proudy, magnetický tok, vnitřní elektromagnetický moment, apod.

Matematický model ASM je dán soustavou komplexních diferenciálních rovnic

$$\bar{u}_S = R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} \quad - \quad \text{v souřadném systému statoru}$$

$$\bar{u}_R = R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} \quad - \quad \text{v souřadném systému rotoru}$$

$$\text{kde} \quad \begin{aligned} \bar{\Psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m e^{j\vartheta} \bar{i}_R \\ \bar{\Psi}_R &= L_R \bar{i}_R + L_m e^{-j\vartheta} \bar{i}_S \end{aligned}$$

$$m_i = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_R} \operatorname{Im} \{ \bar{i}_S \cdot \bar{\Psi}_R^* \}$$

$$m_i = J \frac{d\omega}{dt} + m_z$$

kde  $u_S$  je statorové napětí,  $i_S$  ( $i_R$ ) je statorový (rotorový) proud,  $R_S$  ( $R_R$ ) je odpor statorového (rotorového) vinutí,  $L_S$  ( $L_R$ ) je indukčnost statoru (rotoru),  $\Psi_S$  ( $\Psi_R$ ) je statorový (rotorový) spřažený magnetický tok,  $\omega$  je mechanická úhlová frekvence rotoru,  $\vartheta$  je úhel natočení rotoru vůči statoru ( $\vartheta = \int \omega dt$ ),  $L_m$  je magnetizační indukčnost,  $m_i$  je vnitřní elektromagnetický moment,  $m_z$  je zátěžný moment a  $J$  je moment setrvačnosti ASM.

Matematický model je nelineární, neboť obsahuje součiny proměnných, navíc parametry stroje se mohou měnit vlivem teploty, syčení magnetického obvodu, povrchového efektu, apod.

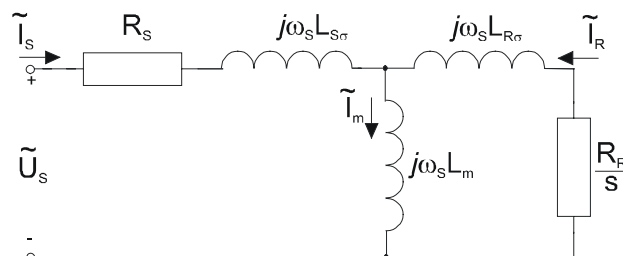
Odvození těchto rovnic lze dohledat v literatuře [1-5] a vychází z výše uvedených zjednodušujících předpokladů.

Při matematickém popisu ASM se s výhodou používají lineární transformace. Jejich prostřednictvím lze veličiny statoru i rotoru přepočítat do jednoho souřadného systému (stojícího, nebo rotujícího libovolnou rychlostí). Matematický popis ASM se tím značně zjednoduší.

V našem případě je nutné nahlížet na ASM takovým způsobem, abychom jej mohli popsat formulacemi jenž by splňovaly podmínky a principy na nichž je založen program CNET.

### 2.1.2 Náhradní schéma a fázorový diagram ASM

Pro analýzu ASM v ustáleném stavu se používá elektrického náhradního schématu (obr.2)



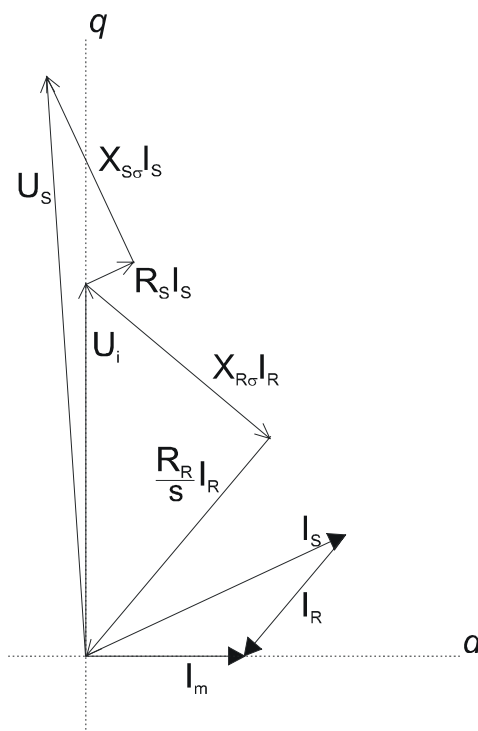
Obr.2: Náhradní schéma ASM

Pro toto náhradní schéma lze kreslit fázorový diagram (obr.3), jenž je grafickým vyjádřením rovnic

$$\tilde{U}_s = (R_s + jX_{s\sigma})\tilde{I}_s + \tilde{U}_i$$

$$0 = \left( \frac{R_R}{s} + jX_{R\sigma} \right) \tilde{I}_R + \tilde{U}_i$$

kde  $\tilde{U}_i = jX_m \tilde{I}_m$



Obr.3: Fázorový diagram ASM

### 2.1.3 Použitelnost obecného modelu ASM pro diagnostiku

Při odvozování rovnic pro popis matematického modelu ASM a sestavení jeho náhradního elektrického obvodu se vychází ze zjednodušujících předpokladů. Bohužel, tyto předpoklady nám pak zpětně nedovolují použít náhradního schématu v jeho klasické podobě pro analýzu chování ASM při poruchách, neboť právě

při poruchách ASM jsou výchozí předpoklady porušeny. Jedná se hlavně o předpoklad symetrického napájení ASM, o souměrném odběru proudu, o stejných hodnotách parametrů jednotlivých fází, apod. Fázory, jenž se používají v náhradních obvodech a fázorových diagramech, reprezentují 3-fázovou veličinu, u níž se předpokládá, že se skládá ze 3 souměrných složek (vektorů) o stejné amplitudě a fázovém posunu  $120^\circ$ .

Pojmy zavedené pro náhradní schéma, jako  $U_i$ ,  $L_s$ ,  $L_m$ ,  $I_m$  jsou výpočtové a mnohdy nereálné veličiny a hodi se pouze pro analýzu zdravého stroje.

## 2.2 Poruchy ASM

Pro diagnostiku poruch ASM budeme vycházet z měřených statorových proudů a napětí, přesněji řečeno, z jejich efektivních hodnot. Bližší analýza měřených signálů by značně zvýšila nároky na měřicí a výpočetní systém, což by bylo v rozporu s jedním z cílů tohoto projektu, a sice s jednoduchostí a nenáročností na výpočetní výkon procesoru.

Vzhledem k tomu, že máme k dispozici informace pouze o efektivních hodnotách fázových proudů a napětí, nabízí se prozatím pouze diagnostika poruch statorového vinutí. Diagnostiku ostatních poruch ASM (rotoru, ložisek, hřídele, a jiných mechanických částí) lze provádět pouze na základě vstupních signálů, jejichž měření a zpracování je, v porovnání se získáváním napětí a proudů, nesrovnatelně komplikovanější a náročnější.

Na druhou stranu, poruchy statoru se u ASM vyskytují zdaleka nejčastěji, a proto je zvládnutí jejich identifikace jakýsi základ, na kterém se potom staví další diagnostické postupy.

### 2.2.1 Chování ASM při poruchách statoru

Pokud bude zdravý ASM napájen souměrným harmonickým 3-fázovým napětím, bude odebírat souměrné proudy. To znamená, že jednotlivými fázemi budou protékat proudy o shodné amplitudě, vzájemně posunutě o  $120^\circ$ .

Případná nesouměrnost síťových napětí se projeví na práci ASM. Vliv této nesouměrnosti se obvykle posuzuje metodou souměrných složek<sup>[3]</sup>.

V tuto chvíli však předpokládáme napájení ASM ze souměrné a tvrdé 3-fázové sítě s konstantní frekvencí.

Předpokládané pracovní podmínky ASM:

- tvrdá napájecí síť
  - zanedbatelné kolísání napětí ve fázích
  - fázový posun napětí je vždy  $120^\circ$
  - konstantní frekvence 50/60Hz
  - nesymetrická změna proudu nevyvolá nesymetrii napětí
- motor je zatížen konstantním momentem a pracuje v ustáleném stavu
- rotor a mechanické části ASM jsou bez poruch

Rozlišujeme tři druhy poruch, jenž mohou v trojfázovém statorovém vinutí vzniknout:

- mezizávitový zkrat v jedné fázi
- mezifázový zkrat
- zemní zkrat

Dále uvažujeme, že na motoru může vzniknout ve stejnou dobu pouze jeden druh poruchy v jedné fázi.

Počáteční předpoklady (často velmi zjednodušující) se mohou postupem vývoje a s rostoucí sofistikovaností modelu odbourávat, nebo nahrazovat předpoklady realističtějšími.

#### Mezizávitový zkrat

Tento typ poruchy statoru nastane, pokud mezi sousedními vodiči (závity) jedné fáze, jenž jsou od sebe za normálních podmínek izolovány, vznikne vodivá cesta. V takovém případě lze na tento mezizávitový zkrat nahlížet jako na závit nakrátko, kterým protéká vysoký proud. Jelikož je tento závit nakrátko součástí magnetického obvodu, působí svým magnetickým polem i na ostatní cívky statoru.



Předpokládejme mezizávitový zkrat ve fázi  $a$ , pro níž platí rovnice

$$u_a = R_a i_a + \frac{d\Psi_a}{dt}, \quad (1)$$

kde  $u_a$  je okamžitá hodnota fázového napětí fáze  $a$ ,  $i_a$  je proud protékající fází  $a$ ,  $R_a$  je odpor fáze  $a$  a  $\Psi_a$  je magnetický tok spřažený s fází  $a$  statorového vinutí.

Pro magnetický tok spřažený se statorovou fází  $a$  platí

$$\Psi_a = \Psi_{Sa} + \Psi_{Ra}, \quad (2)$$

kde  $\Psi_{Sa}$  je složka vytvářená působením statorových a složka  $\Psi_{Ra}$  působením rotorových proudů podle vztahů

$$\Psi_{Sa} = L_{Sa} i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c \quad (3)$$

$$\Psi_{Ra} = M_{aA} i_A + M_{aB} i_B + M_{aC} i_C \quad (4)$$

Přičemž  $\Psi_{Saa} = L_{Sa} i_a$  je magnetický tok vznikající přímo ve fázi  $a$  prostřednictvím proudu  $i_a$ ,  $\Psi_{Sab} = M_{ab} i_b$  je magnetický tok fáze  $b$  uzavírající se přes fázi  $a$ ,  $\Psi_{Sac} = M_{ac} i_c$  je magnetický tok fáze  $c$  uzavírající se přes fázi  $a$ ,  $L_{Sa}$  je vlastní indukčnost fáze  $a$ ,  $M_{ab}$  je vzájemná indukčnost fází  $a$  a  $b$ ,  $M_{ac}$  je vzájemná indukčnost fází  $a$  a  $c$ .

V případě, že ve fázi  $a$  vznikne závit nakrátko (mezizávitový zkrat), bude magnetický tok tohoto závitu zeslabovat celkový magnetický tok  $\Psi_a$  spřažený s fází  $a$ . Časová změna magnetického toku  $\Psi_a$  bude tedy nižší, úbytek napětí na odporu  $R_a$  bude naopak vyšší (velikost samotného odporu  $R_a$  se kvůli závitovému zkratu sníží, ovšem tato změna má na úbytek napětí vliv pouze nepatrný).

Důsledkem mezizávitového zkratu ve fázi  $a$  je tedy zvýšení proudu  $i_a$ .

Tato změna proudu je doprovázena změnou spřažených magnetických toků mezi statorovými fázemi.

Celkový magnetický tok spřažený s fází  $b$  a fází  $c$  je

$$\Psi_b = \Psi_{Sb} + \Psi_{Rb}$$

$$\Psi_c = \Psi_{Sc} + \Psi_{Rc}.$$

Předpokládejme, že proudy rotoru zůstávají i při poruše statoru symetrické (konstantní amplituda i fázový posun) a magnetické vazby mezi statorem a rotorem se nezmění. Potom bude  $\Psi_{Ra} = \Psi_{Rb} = \Psi_{Rc}$ . O změně celkového magnetického toku spřaženého s jednotlivými fázemi budou za těchto předpokladů rozhodovat hlavně změny fázových statorových proudů a magnetické vazby mezi vinutími statoru.

Pokud víme, že

$$\Psi_{Sb} = L_{Sb} i_b + M_{ab} i_a + M_{bc} i_c$$

$$\Psi_{Sc} = L_{Sc} i_c + M_{ac} i_a + M_{bc} i_b,$$

pak se změna proudu  $i_a$  projeví ve zbylých statorových fázích prostřednictvím vzájemné indukčnosti mezi fázemi. V případě fáze  $b$  je to  $M_{ab}$ , v případě fáze  $c$  zase  $M_{ac}$ . Změna proudu  $i_a$  s sebou tedy nese i změnu magnetického toku v ostatních fázích, a sice v tom smyslu, že v jedné fázi celkový spřažený magnetický tok posílí a v druhé naopak zeslabí. Záleží na volbě sledu fází. Toto oslabení, či posílení magnetických toků je dáno prostorovým uspořádáním statoru, ve kterém jsou vinutí jednotlivých fází o  $120^\circ$  posunuta.

Tyto pochody lze graficky demonstrovat na fázorových diagramech. Tyto diagramy sice nebudou přesně reprezentovat situaci uvnitř motoru, ale pro pochopení nastíněné teorie jsou dostačující.

Budeme znovu vycházet z rovnic (1)-(4). Okamžité hodnoty nahradíme fázory. Časovou změnu magnetického toku budeme nazývat indukovaným napětím. Magnetický tok rotoru  $\Psi_{Ra}$  spřažený s fází  $a$  budeme považovat za symetrický a konstantní. Jeho časovou změnu bude reprezentovat napětí  $U_{iRa}$  – napětí indukované ve fázi  $a$  díky magnetickému toku rotoru.

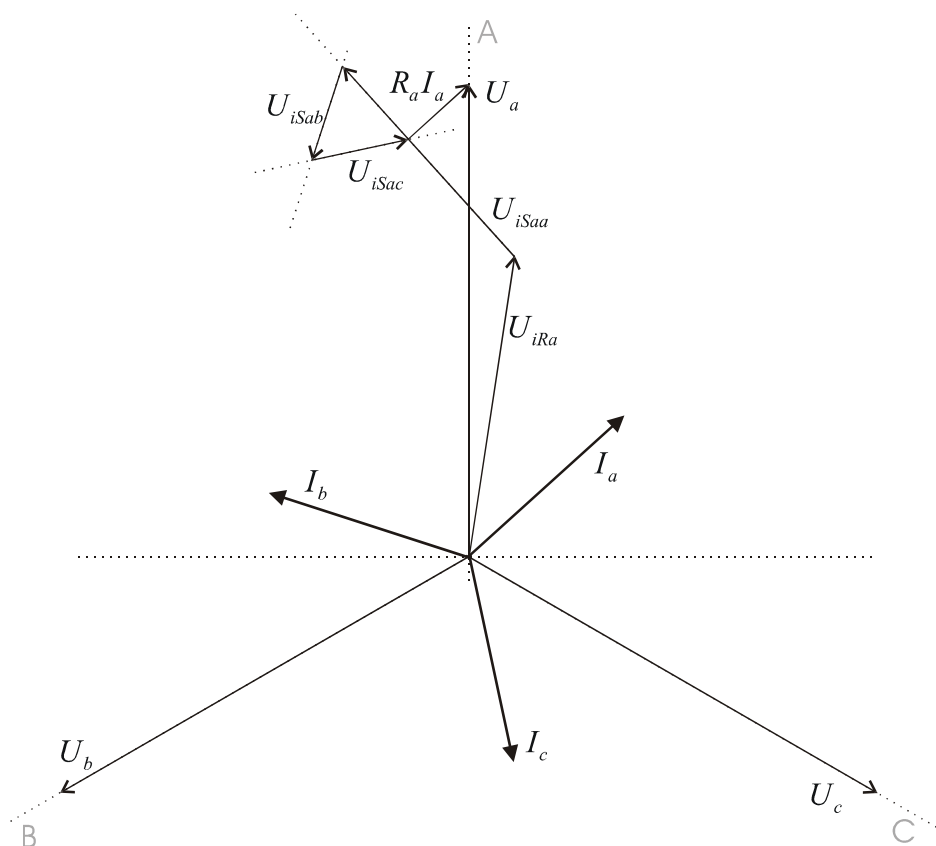
Pro časové derivace magnetických toků a lze s pomocí rovnic (2)-(4) psát

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{d\Psi_{Sa}}{dt} + \frac{d\Psi_{Ra}}{dt} = L_{Sa} \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + U_{iRa} = U_{iSaa} + U_{iSab} + U_{iSac} + U_{iRa}$$

Napěťová rovnice (1) bude tedy vypadat

$$\vec{U}_a = R_a \vec{I}_a + \vec{U}_{iSaa} + \vec{U}_{iSab} + \vec{U}_{iSac} + \vec{U}_{iRa} \quad (5)$$

Podle této rovnice již lze kreslit fázorové diagramy.



**Obr.4:** Fázorový diagram zdravého ASM

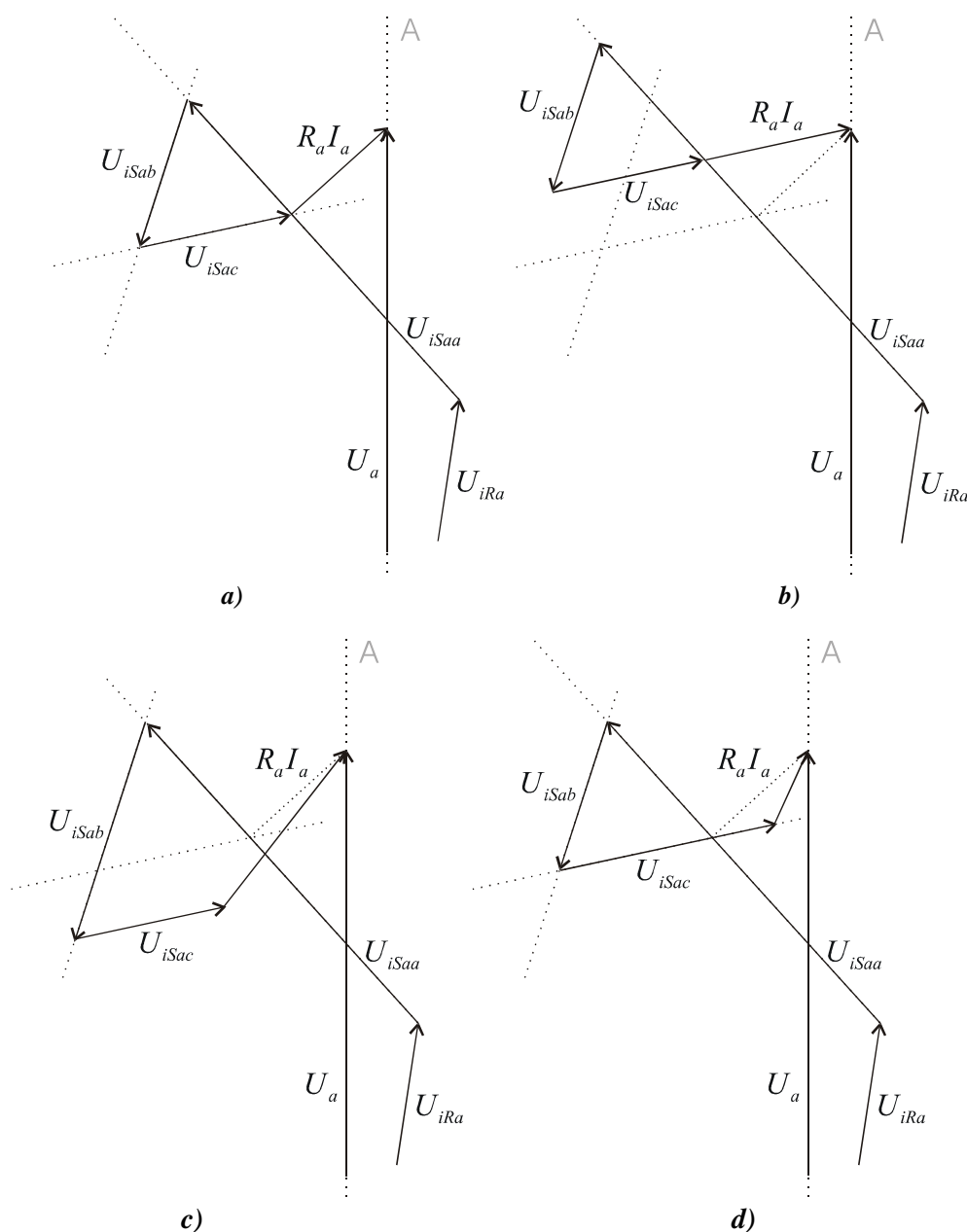
Nejprve pro zdravý motor (obr.4), v němž jsou proudy symetrické, tzn. že fázory mají stejnou velikost a jsou o  $120^\circ$  posunuty. Předpokládejme, že parametry motoru  $L_{Sa}$  (vlastní indukčnost fáze  $a$ ) a  $M_{ab}$ ,  $M_{ac}$  (vzájemná indukčnost fází  $a$ - $b$ ,  $a$ - $c$ ) jsou v poměru  $\frac{M_{ab}}{L_{Sa}} = \frac{M_{ac}}{L_{Sa}} = \frac{1}{k}$ , kde  $k > 1$  je závislé na konstrukci motoru a způsobu vinutí statoru. Pro zdravý motor pak bude platit, že  $|\vec{U}_{iSaa}| = k \cdot |\vec{U}_{iSab}| = k \cdot |\vec{U}_{iSac}|$ .

Na obrázku 4 je vyobrazen pseudo-fázorový diagram pro zdravý motor. Nefigurují v něm opravdové fázory, pouze jejich jednotlivé složky ( $abc$ ). Základní osy tvoří fázová napětí  $\vec{U}_a$ ,  $\vec{U}_b$ ,  $\vec{U}_c$  pravidelně posunuta o  $120^\circ$ . Proudů  $\vec{I}_a$ ,  $\vec{I}_b$ ,  $\vec{I}_c$  jsou za příslušnými fázovými napětími opožděny vždy o stejný úhel ( $\cos \varphi = 0.7$ ). Jsou zde podrobněji zakresleny pouze vektory z rovnice (5), tedy pro fázi  $a$ .

Detailní fázorový diagram na obrázku 5a jasně ukazuje jak se jednotlivé napěťové vektory z rovnice (5) skládají. Je vhodné si povšimnout, že jsou vektory indukovaných napětí kolmé k proudům, jenž je vyvolaly (např. napětí  $\vec{U}_{iSab}$  je kolmé k proudům  $\vec{I}_b$ ).

Uváděné fázorové diagramy jsou nepřesné a nedodržují striktně všechna zavedená pravidla, neboť se ignoruje změna fázového posuvu mezi napětím a proudem příslušné fáze, což v poruchovém stavu nastává. Proto není výsledný úbytek napětí na odporu  $R_a$  na obr.5 rovnoběžný s původním proudem  $\vec{I}_a$ . Při kreslení těchto obrázků nám jde o to, demonstrovat vliv změny proudu v jedné fázi na proudy fází sousedních.

V jedné fázi následkem této změny proud relativně poklesne a ve druhé naopak stoupne. Termín relativně je důležitý, neboť například při závitovém zkratu stoupne v absolutních číslech proud ve všech třech fázích. My však změnu relativizujeme vzhledem k průměrné hodnotě všech fázových proudů ve statoru.



**Obr.5:** Zjednodušený detailní fázorový diagram ASM (fáze  $a$ ,  $\cos\varphi=0.7$ )  
**a)** pro zdravý motor, **b)** pro mezizávitový zkrat ve fázi  $a$   
**c)** pro mezizávitový zkrat ve fázi  $b$ , **d)** pro mezizávitový zkrat ve fázi  $c$

Pomocí obrázků 5a-d lze ukázat, jakým způsobem ovlivní změna proudu v jednotlivých fázích ( $abc$ ) vektory napětí indukovaných ve fázi  $a$  (rovnice (5)), a tím i velikost úbytku napětí na odporu  $R_a$ , resp. velikost proudu  $I_a$ .

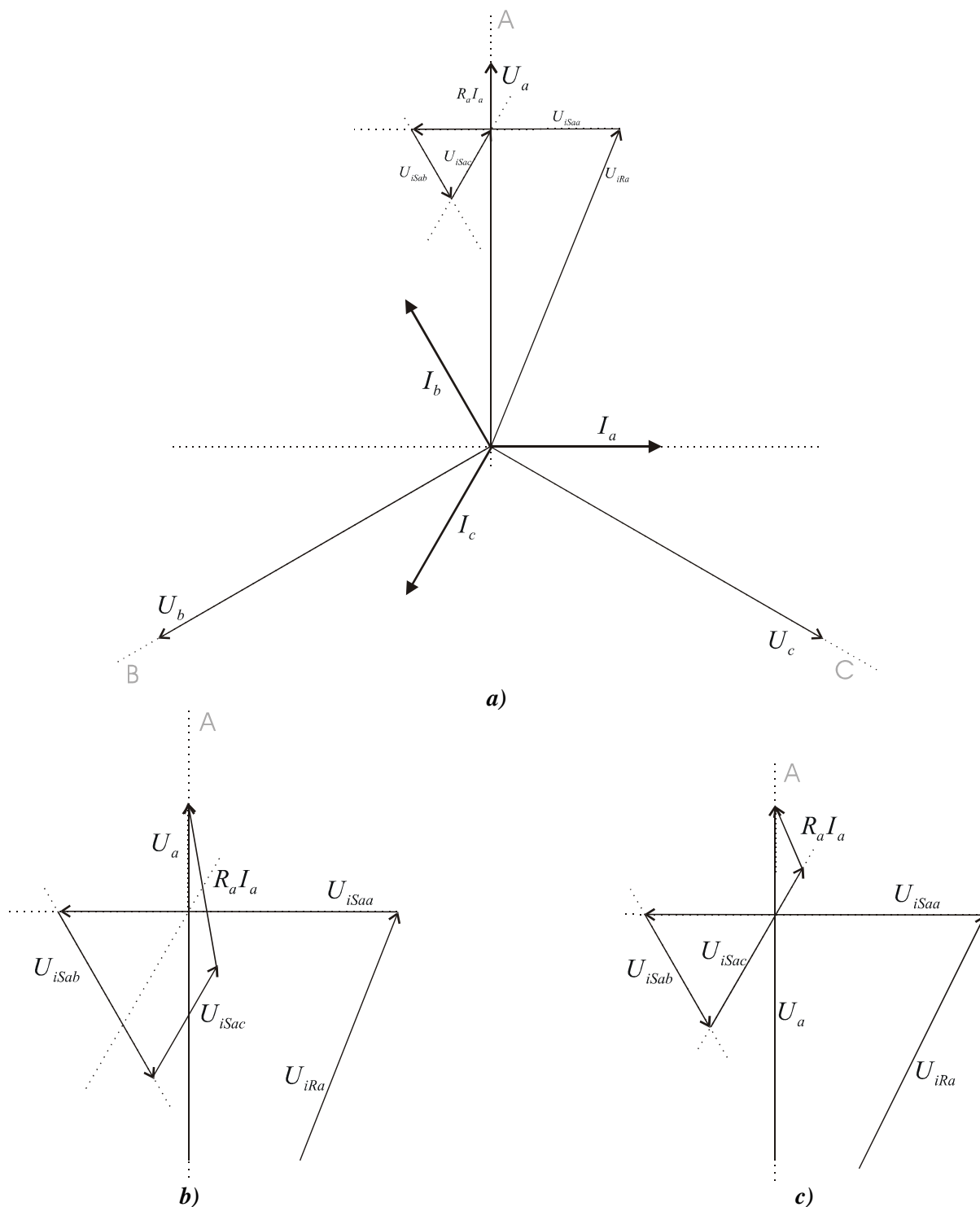
Předpokládáme, že rotorové proudy, a tím i napětí indukované jejich prostřednictvím ve satorovém vinutí, zůstanou i v případě poruchy statoru symetrické. Dále uvažujeme vždy situaci, kdy se změní pouze amplituda proudu jehož vliv sledujeme, nikoliv fázový posun. Tento předpoklad je velmi nereálný, ale umožní nám snazší vysvětlení změn proudů ve statoru při jeho poruše.

Na obrázku 5b je vidět změna vektorů napětí pro fázi  $a$  po nárůstu proudu  $I_a$ . Samozřejmě se nejvíce zvýší velikost napětí  $U_{iSaa}$ , indukovaného díky vlastní indukčnosti fáze  $a$ . Součet vektorů indukovaných napětí (rovnice (5)), respektive jeho konec, se posune do jiné polohy. Úbytek napětí na  $R_a$  se tedy oproti původnímu (zdravý motor) zvýší, což je v souladu se zvýšením proudu  $I_a$ . Čárkovanými čarami je na obrázcích zachycena poloha vektorů pro případ zdravého motoru.

Zjednodušený fázorový diagram po nárůstu proudu  $I_b$  (případ mezizávítového zkratu ve fázi  $b$ ) je na obrázku 5c. V tomto případě se mění amplituda vektoru napětí  $U_{iSab}$ , a to tak, že se úbytek napětí na odporu  $R_a$  zvýší a zapříčiní zvýšení proudu  $I_a$ .

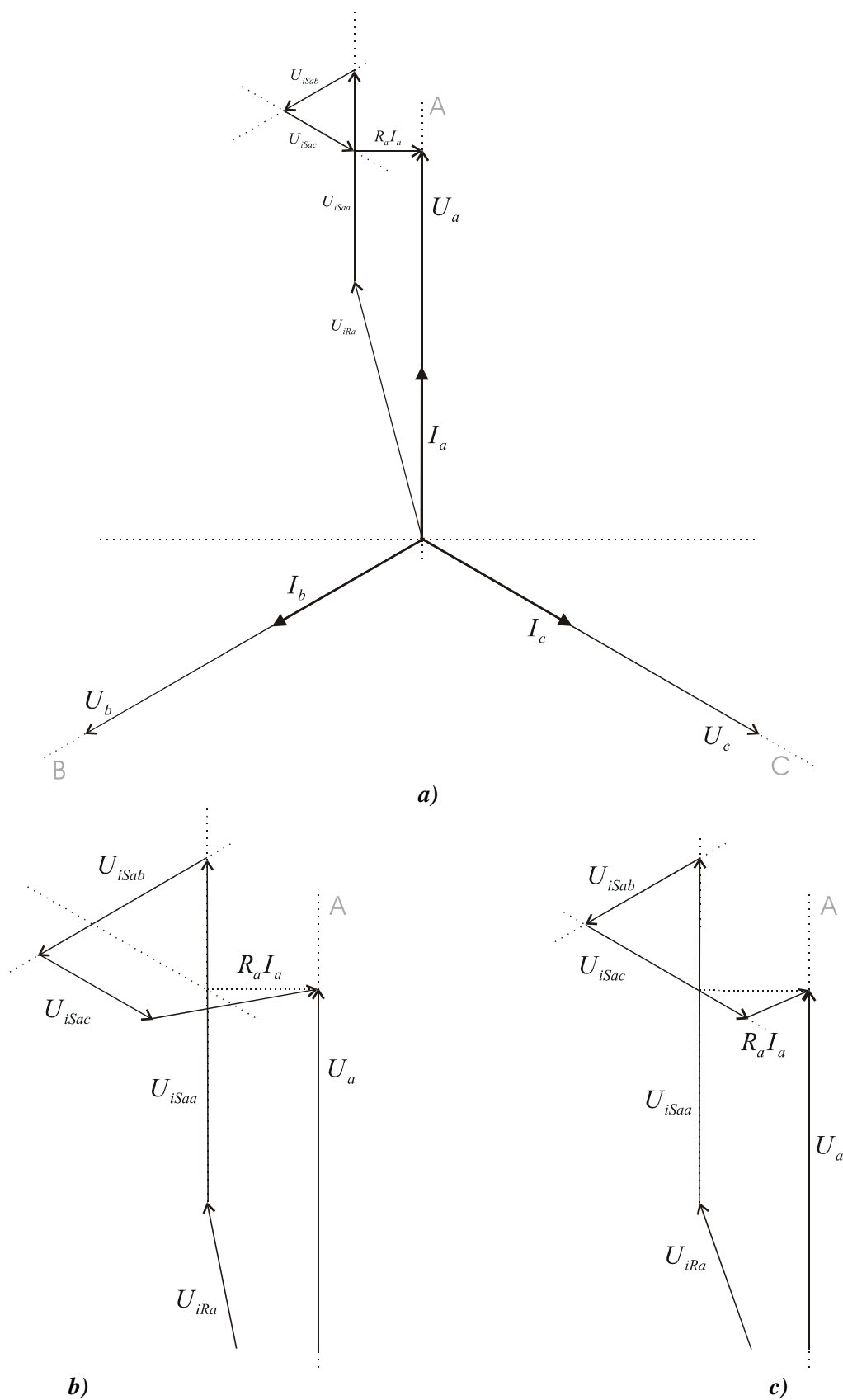
Obrázek 5d zobrazuje situaci, jenž nastane po mezizávítovém zkratu ve fázi  $c$ , tedy po zvýšení proudu  $I_c$ , potažmo napětí  $U_{iSac}$ . Výsledkem je snížení proudu  $I_a$ .

Že popsané pochody platí nejen pro zatížení zvolené na obr.5 ( $\cos\varphi=0.7$ ), dokazují obrázky 6 a 7. Na nich jsou fázorové diagramy vyjadřující stejné vlastnosti jako obr.5, ale pro mezní případy zatížení. Pro  $\cos\varphi=0$ , čistě induktivní zátěž (obr.6) a pro  $\cos\varphi=1$ , čistě odporová zátěž (obr.7).



**Obr.6:** Zjednodušené fázorové diagramy ASM (fáze  $a$ ,  $\cos\varphi=0$ )

a) zdravý motor, b) mezizávítový zkrat ve fázi  $b$ , c) mezizávítový zkrat ve fázi  $c$



b)

c)

**Obr.7:** Zjednodušené fázorové diagramy ASM (fáze a,  $\cos\varphi=1$ )

a) zdravý motor, b) mezizávitový zkrat ve fázi b, c) mezizávitový zkrat ve fázi c

Pokud nastane ve statorovém vinutí mezizávitový zkrat, dojde k vyššímu a nesymetrickému odběru proudu. Nejvyšší proud bude protékat fází, jenž je porušena. Pro zbylé dvě (zdravé) fáze lze na základě předložené teorie a v případě, že budeme uvažovat sled fází jako na uvedených fázorových diagramech z obrázků, vyvodit následující tendence:

- **Mezizávitový zkrat ve fázi  $a$ :**

Silný magnetický tok závitů nakrátko ve fázi  $a$ , kromě toho, že způsobí velký nárůst proudu v samotné fázi  $a$ , má tendenci svými účinky potlačovat proud ve fázi  $b$  ( $I_b$ ) a naopak posilovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ). V důsledku závitového zkratu ve fázi  $a$  se zvýší proud ve všech třech fázích. Díky různým magnetickým vazbám však proud ve fázi  $b$  relativně poklesne, zatímco ve fázi  $a$  a  $c$  relativně vzroste.

- **Mezizávitový zkrat ve fázi  $b$ :**

Silný magnetický tok závitů nakrátko ve fázi  $b$ , kromě toho, že způsobí velký nárůst proudu v samotné fázi  $b$ , má tendenci svými účinky potlačovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ) a naopak posilovat proud ve fázi  $a$  ( $I_a$ ). V důsledku závitového zkratu ve fázi  $b$  se zvýší proud ve všech třech fázích. Díky různým magnetickým vazbám však proud ve fázi  $c$  relativně poklesne, zatímco ve fázi  $b$  a  $a$  relativně vzroste.

- **Mezizávitový zkrat ve fázi  $c$ :**

Silný magnetický tok závitů nakrátko ve fázi  $c$ , kromě toho, že způsobí velký nárůst proudu v samotné fázi  $c$ , má tendenci svými účinky potlačovat proud ve fázi  $a$  ( $I_a$ ) a naopak posilovat proud ve fázi  $b$  ( $I_b$ ). V důsledku závitového zkratu ve fázi  $c$  se zvýší proud ve všech třech fázích. Díky různým magnetickým vazbám však proud ve fázi  $a$  relativně poklesne, zatímco ve fázi  $c$  a  $b$  relativně vzroste.

Při mezizávitovém zkratu by mělo platit, že se součet okamžitých hodnot proudů rovná nule.

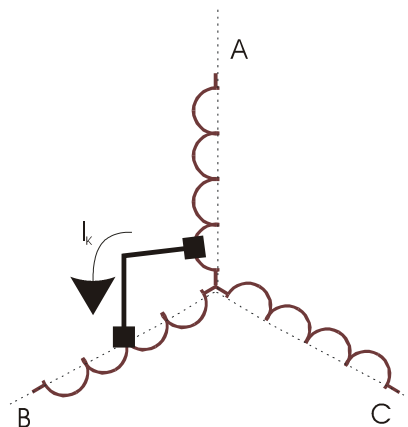
Pro lepší názornost si shrňme zmíněné tendence do přehledné tabulky.

Typ poruchy	Relativní změna fázového proudu		
	fáze $a$	fáze $b$	fáze $c$
TURN_F_A	nárůst ↑↑	pokles ↓	nárůst ↑
TURN_F_B	nárůst ↑	nárůst ↑↑	pokles ↓
TURN_F_C	pokles ↓	nárůst ↑	nárůst ↑↑

Na těchto tendencích je založena část kauzálního modelu ASM.

## Mezifázový zkrat

Pokud dojde k vodivému spojení mezi vinutími dvou různých statorových fází, dojde k tzv. mezifázovému zkratu. Pro přiblížení jeho podstaty nám poslouží obrázek 8.



**Obr.8:** Grafické znázornění mezifázového zkratu

Již na počátku předpokládejme, že místo zkratu bude u obou porušených vinutí velice blízko uzlu (stator je zapojen do hvězdy s izolovaným středem). Zkrat, jenž by nastal v místě blíže svorkovnici by vyvolal tak vysoké proudy, na něž by zareagovaly ochranné prvky motoru (jistice, pojistky) jeho odpojením od sítě. Účelem diagnostiky ASM je však naopak postihnout právě ty změny v motoru, jenž nezpůsobí vypnutí ochran, ale signalizují vznik poruchy, jenž by mohla v blízké době vést ke zničení ASM, či jeho nucené odstávce.

Na obrázku 8 je naznačen zkrat mezi fázemi *a* a *b*. Vlivem tohoto zkratu se začne přes části vinutí *a* a *b* a přes uzel motoru uzavírat poměrně vysoký proud, označený  $I_k$ . Tato situace se dá nyní přirovnat ke stavu, kdy by se současně ve fázi *a* i ve fázi *b* vytvořil závit nakrátko (mezizávitový zkrat) velice blízko uzlu. V každém tomto závitu nakrátko vzniká magnetický tok, jenž svými účinky působí různě na proudy v sousedních fázích (viz tendence při mezizávitových poruchách). Výsledky, jenž jsme získali analýzou mezizávitových zkratů lze aplikovat i na zkrat mezifázový.

Situace je však složitější, protože jednotlivé závitové zkraty, které dohromady tvoří zkrat mezifázový, mohou mít různý charakter (různou velikost), a velikosti jejich magnetických toků se mohou lišit.

Rozdělme si tento mezifázový zkrat mezi fázemi *a* a *b* z obrázku 8 na tři druhy:

1. **A = B** – Místa zkratu jsou v obou fázích stejně vzdálena od uzlu motoru.

Potom  $\Psi_{Ka} = \Psi_{Kb}$  ( $\Psi_K$  – tok vyvolaný závitom nakrátko).

Můžeme předpokládat, že bude v prvním okamžiku po zkratu oběma porušenými fázemi (*a* i *b*) protékat přibližně stejný proud, avšak mnohem vyšší než ve zdravé fázi *c* ( $I_a \equiv I_b \gg I_c$ ).

Podle tendencí odvozených pro mezizávitové zkraty se však úrovně proudů pozmění následovně:

- $\Psi_{Ka}$  bude svými účinky potlačovat proud ve fázi *b* ( $I_b$ ) a posilovat proud ve fázi *c* ( $I_c$ ).
- $\Psi_{Kb}$  bude svými účinky potlačovat proud ve fázi *c* ( $I_c$ ) a posilovat proud ve fázi *a* ( $I_a$ ).

Následující tabulka obsahuje grafickou interpretaci změn. Šípkami je znázorněno jakou silou (počet šipek) a v jakém smyslu (směr šipek) je ovlivněna úroveň proudu v jednotlivých fázích po “nesymetrickém” fázovém zkratu ( $A=B$ ) mezi fázemi *a* a *b*.

Mezifázový zkrat (A=B)	Relativní změna fázového proudu		
	fáze <i>a</i>	fáze <i>b</i>	fáze <i>c</i>
vliv fáze <i>a</i>	nárůst ↑	pokles ↓	nárůst ↑
vliv fáze <i>b</i>	nárůst ↑	nárůst ↑	pokles ↓
interakce vlivů	nárůst ↑↑	0	0

V posledním řádku tabulky nazvaném interakce vlivů je jakýsi součet obou vlivů od fáze *a* i *b*. Vidíme, že zatím co u fáze *a*, kde se rostoucí tendence sčítají, se ve fázích *b* a *c* oba vlivy ruší. Vzhledem k tomu, že při výchozích podmínkách byl proud  $I_b$  mnohem vyšší než proud  $I_c$ , bude pro fázové proudy platit:  $I_a > I_b > I_c$ .

2.  $A > B$  – Místo zkratu je ve fázi  $a$  více vzdáleno od uzlu motoru než ve fázi  $b$ .

Potom  $\Psi_{Ka} > \Psi_{Kb}$ .

Podle tendencí odvozených pro mezizávitový zkrat bude:

$\Psi_{Ka}$  svými silnějšími účinky potlačovat proud ve fázi  $b$  ( $I_b$ ) a posilovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ).

$\Psi_{Kb}$  svými účinky potlačovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ) a posilovat proud ve fázi  $a$  ( $I_a$ ).

Mezifázový zkrat ( $A > B$ )	Relativní změna fázového proudu		
	fáze $a$	fáze $b$	fáze $c$
vliv fáze $a$	nárůst $\uparrow\uparrow$	pokles $\downarrow\downarrow$	nárůst $\uparrow\uparrow$
vliv fáze $b$	nárůst $\uparrow$	nárůst $\uparrow$	pokles $\downarrow$
interakce vlivů	nárůst $\uparrow\uparrow\uparrow$	pokles $\downarrow$	nárůst $\uparrow$

Pro fázové proudy bude platit:  $I_a \gg I_b \geq I_c$ .

Proud fáze  $b$  relativně poklesne, zatímco proud  $I_c$  stoupne. Bude záležet na charakteru zkratu a na vzájemných indukčnostech motoru, jak velice se proud  $I_c$  přiblíží proudu  $I_b$ .

3.  $A < B$  – Místo zkratu je ve fázi  $b$  více vzdáleno od uzlu motoru než ve fázi  $a$ .

Potom  $\Psi_{Ka} < \Psi_{Kb}$ .

Podle tendencí odvozených pro mezizávitový zkrat bude:

$\Psi_{Ka}$  svými účinky potlačovat proud ve fázi  $b$  ( $I_b$ ) a posilovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ).

$\Psi_{Kb}$  svými silnějšími účinky potlačovat proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ) a posilovat proud ve fázi  $a$  ( $I_a$ ).

Mezifázový zkrat ( $A < B$ )	Relativní změna fázového proudu		
	fáze $a$	fáze $b$	fáze $c$
vliv fáze $a$	nárůst $\uparrow$	pokles $\downarrow$	nárůst $\uparrow$
vliv fáze $b$	nárůst $\uparrow\uparrow$	nárůst $\uparrow\uparrow$	pokles $\downarrow\downarrow$
interakce vlivů	nárůst $\uparrow\uparrow\uparrow$	nárůst $\uparrow$	pokles $\downarrow$

Pro fázové proudy bude platit:  $I_b \geq I_a > I_c$ .

Pokud bude místo zkratu ve fázi  $b$  opravdu o mnoho dále uzlu než ve fázi  $a$ , pak bude výsledný proud  $I_b$  dosahovat, nebo těsně překračovat úroveň proudu  $I_a$ .

Z analýzy těchto tří typů zkratu mezi fázemi  $a$  a  $b$  lze soudit, že proud ve fázi  $c$  ( $I_c$ ) bude vždy nejmenší. Velikost proudů  $I_a$  a  $I_b$  závisí na charakteru zkratu. Proud  $I_b$  však bude vyšší než  $I_a$  pouze v případě velmi velkého zkratu a velmi vysokých proudů. Tak vysokých, že by pravděpodobně zareagovala tepelná ochrana motoru. Proto lze předpokládat, že při zkratu mezi fázemi  $a$  a  $b$  bude většinou proud  $I_a$  nejvyšší,  $I_b$  maximálně na jeho úrovni, a proud  $I_c$  nejmenší.

Analogicky lze odvodit tendence relativního snižování a zvyšování proudů i pro fázové zkraty mezi fázemi  $a-c$  a  $b-c$ .

## Zemní zkrat

Zemní zkrat nastane po vodivém spojení uzemněné kostry motoru se statorovým vinutím. Následkem tohoto zkratu se začnou proudy motoru uzavírat přes zem a odběr proudu se stane značně nesymetrickým.

Nejtypičtějším znakem zemního zkratu je, že už neplatí nulový součet okamžitých hodnot proudů, tzn. že nulový proud  $I_0$  není roven nule. Dále se značně zvýší proud v postižené fázi. Podobně jako u mezizávitového zkratu, i zde se proudy v jednotlivých fázích navzájem ovlivňují. Ovšem tendence jenž vedou k výslednému nastavení úrovní proudů ve fázích jsou přesně opačné než pro mezizávitové zkraty. Bohužel, tento fakt nedokážeme jednoduše vysvětlit pomocí fázorových diagramů jako pro případ zkratů závitových (pokúsíme se naši teorii rozšířit a detailněji popsat v příští zprávě).

V tuto chvíli se musíme spokojit s konstatováním, že provedená měření prokázala opačné tendence relativního růstu a poklesu proudů při zemním zkratu než při mezizávitovém zkratu (viz tabulka).



Typ poruchy	Relativní změna fázového proudu		
	fáze <i>a</i>	fáze <i>b</i>	fáze <i>c</i>
GROUND_F_A	<i>nárůst</i> ↑	<i>nárůst</i> ↑	<i>pokles</i> ↓
GROUND_F_B	<i>pokles</i> ↓	<i>nárůst</i> ↑	<i>nárůst</i> ↑
GROUND_F_C	<i>nárůst</i> ↑	<i>pokles</i> ↓	<i>nárůst</i> ↑

Pro jednotlivé zemní zkratky tedy bude platit:

#### Zemní zkrat ve fázi *a*

Nulový proud  $I_0$  není roven nule.

Proud ve fázi *a* a *b* vzroste, zatímco proud ve fázi *c* výrazně poklesne.

#### Zemní zkrat ve fázi *b*

Nulový proud  $I_0$  není roven nule.

Proud ve fázi *b* a *c* vzroste, zatímco proud ve fázi *a* výrazně poklesne.

#### Zemní zkrat ve fázi *c*

Nulový proud  $I_0$  není roven nule.

Proud ve fázi *c* a *a* vzroste, zatímco proud ve fázi *b* výrazně poklesne.

Je vhodné připomenout, že pro kauzální model ASM se nepoužívají hodnoty absolutní, nýbrž kvalitativní. Nezajímá nás tedy přesná hodnota proudu, ale pouze kategorie, nebo úroveň do které spadá. To nám umožní formulovat obecnější kauzální vztahy.

## 2.2.2 Ostatní poruchy ASM

Diagnostikou poruch jiných částí ASM než statoru se v této zprávě nezabýváme. Při odvozování kauzálního modelu předpokládáme, že jsou ostatní části motoru v pořádku.

## 2.3 Zavedení kvalitativních hodnot

Kauzální popis systému nepoužívá na rozdíl od matematických modelů absolutní číselné hodnoty jednotlivých veličin. Namísto toho je veličině přiřazena na základě předem daného klíče kvalitativní hodnota, s kterou se dále pracuje. Nejčastěji se tato kvalitativizace provádí rozdělením oboru hodnot, kterých veličina může nabývat na několik oblastí. Nejdůležitější je tedy zvolit vhodné hranice mezi těmito oblastmi. V našem případě budou mít efektivní hodnoty statorových napětí a proudů pouze tři kvalitativní stavy: LOW, NORMAL a HIGH.

Veličina bude mít hodnotu NORMAL, pokud bude její absolutní velikost rovna, nebo bude v daném tolerančním pásmu, vzhledem k dané referenční hodnotě. Hodnoty LOW a HIGH budou veličině přiděleny, pokud toto pásmo překročí zdola (LOW) nebo shora (HIGH).

### 2.3.1 Vstupní veličiny

Jak již bylo řečeno, jediným zdrojem informací o pracovním stavu monitorovaného ASM budou proudy a napětí měřené na svorkách motoru ( $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$ ,  $u_{ab}(t)$ ,  $u_{bc}(t)$ ,  $u_{ca}(t)$ ).

Z naměřených signálů fázových proudů a sdružených napětí získáme informace o velikosti efektivních fázových hodnot:

$$\begin{array}{lll} U_a, U_b, U_c & - & \text{fázová statorová napětí} \quad [\text{V}] \\ I_a, I_b, I_c & - & \text{fázové statorové proudy} \quad [\text{A}] \end{array}$$

Z okamžitých hodnot fázových proudů se vypočte tzv. nulový efektivní proud (ten by protékal nulovým vodičem v případě, že by byl připojen ke středu statorového vinutí) dle vztahu

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} (i_a(t) + i_b(t) + i_c(t))^2 dt} \quad [A]$$

Průměrná hodnota efektivních hodnot všech fází bude

$$I_{avg} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) \quad [A]$$

$$U_{avg} = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c) \quad [V]$$

Tyto průměrné hodnoty vztáhneme k nominálním (štítkovým) hodnotám motoru

$$VOLTAGE\_S\_AVG = \frac{U_{avg}}{U_{fn}} \quad [-]$$

$$CURRENT\_S\_AVG = \frac{I_{avg}}{I_{fn}} \quad [-]$$

Fázové efektivní hodnoty a nulový proud naopak vztáhneme k hodnotám jejich průměru

$$VOLTAGE\_S\_A = \frac{U_a}{U_{avg}} \quad [-]$$

$$VOLTAGE\_S\_B = \frac{U_b}{U_{avg}} \quad [-]$$

$$VOLTAGE\_S\_C = \frac{U_c}{U_{avg}} \quad [-]$$

$$CURRENT\_S\_A = \frac{I_a}{I_{avg}} \quad [-]$$

$$CURRENT\_S\_B = \frac{I_b}{I_{avg}} \quad [-]$$

$$CURRENT\_S\_C = \frac{I_c}{I_{avg}} \quad [-]$$

$$CURRENT\_S\_SUM = \frac{I_0}{I_{avg}} \quad [-]$$

$$VOLTAGE\_S\_SUM = \frac{U_0}{U_{avg}} \quad [-]$$

Nyní, když máme vstupní veličiny vyjádřeny v poměrných hodnotách, můžeme jim přisoudit hodnoty kvalitativní (LOW, NORMAL, HIGH). Pro veličinu bude platit, že je NORMAL, pokud se nebude od své referenční veličiny lišit o více než 10%, tzn. že bude její poměrná hodnota v intervalu <0.9; 1.1).

Poměrná hodnota fázových proudů a napětí	Kvalitativní hodnota
<0 ; 0.9)	LOW
<0.9 ; 1.1>	NORMAL
(1.1 ; ∞>	HIGH

Nulový proud bude mít pouze dva kvalitativní stavy: ZERO a NONZERO.

Poměrná hodnota nulového proudu	Kvalitativní hodnota
<0 ; 0.1>	ZERO
(0.1 ; ∞>	NONZERO

Další vstupní proměnná nám podává informaci o sledu fází. Bude nabývat pouze dvou hodnot – ABC a ACB. Pro každý sled fází se v modelu uvažuje jiný kauzální vztah. Tato proměnná nese název `PHASE_ORDER`.

### 2.3.2 Diagnostický výstup

Výstupem programu CNET je hodnota tzv. *assumables* – tedy proměnných, jenž charakterizují systém, a o nichž v CNET modelu předpokládám, že jsou v určitém předem definovaném stavu. V rámci tohoto stavu jsou potom definovány kauzální vztahy. Na základě platnosti, či neplatnosti těchto kauzálních vztahů vyhodnotí program CNET jakou hodnotu má proměnná *assumable*.

V našem případě je touto proměnnou “zdraví” statoru (`STATOR_HEALTH`), jenž může nabývat následujících stavů (hodnot):

<code>STATOR_HEALTH = OK</code>	-	stator je bez poruchy
<code>STATOR_HEALTH = TURN_F_A</code>	-	mezizávitový zkrat ve fázi A
<code>STATOR_HEALTH = TURN_F_B</code>	-	mezizávitový zkrat ve fázi B
<code>STATOR_HEALTH = TURN_F_C</code>	-	mezizávitový zkrat ve fázi C
<code>STATOR_HEALTH = PHASE_F_AB</code>	-	mezifázový zkrat mezi fázemi A_B
<code>STATOR_HEALTH = PHASE_F_AC</code>	-	mezifázový zkrat mezi fázemi A_C
<code>STATOR_HEALTH = PHASE_F_BC</code>	-	mezifázový zkrat mezi fázemi B_C
<code>STATOR_HEALTH = GROUND_F_A</code>	-	zemní zkrat ve fázi A
<code>STATOR_HEALTH = GROUND_F_B</code>	-	zemní zkrat ve fázi B
<code>STATOR_HEALTH = GROUND_F_C</code>	-	zemní zkrat ve fázi C

Pokud program CNET na základě kauzálního modelu ASM vyhodnotí, že `STATOR_HEALTH=OK`, znamená to, že je stator v pořádku. Pokud tomu tak nebude, algoritmus vyhodnotí o jakou poruchu statoru se jedná. O jednoznačnosti a správnosti diagnostiky rozhoduje kvalita kauzálního modelu ASM.

## 2.4 Kauzality

Na základě rozboru provedeného v kapitole o poruchách statorového vinutí ASM lze definovat kauzální vztahy, jenž popisují chování ASM (resp.jeho statorových proudů a napětí) v různých pracovních stavech motoru.

### 2.4.1 Bezporuchový stav

Pokud je ASM bez jakékoliv poruchy a pracuje v normálních podmínkách, odebírá z napájecí sítě souměrný 3-fázový proud. Stále přitom předpokládáme tvrdou a symetrickou síť.

O tom, zda jsou proudy, či napětí, symetrické se rozhodne na základě jejich efektivních fázových hodnot a hodnotě nulového proudu, či napětí. Pokud se rovnají efektivní hodnoty proudů (napětí) v jednotlivých fázích a hodnota nulového proudu (napětí) je nulová, potom jsou proudy (napětí) symetrické.

V případě, že je motor napájen z tvrdé a souměrné sítě, bude platit vztah

```

if    STATOR_HEALTH = OK
      then (    CURRENT_S_A = NORMAL and
                CURRENT_S_B = NORMAL and
                CURRENT_S_C = NORMAL  )

```

Proměnné používané v této a v dalších kauzalitách jsou popsány v kapitole 2.3 této zprávy. Pokud nebude splněna kauzalita pro zdravý motor, je jasné, že stator není v pořádku. Pro bližší určení jeho poruchy slouží následující kauzální vztahy.

## 2.4.2 Mezizávitový zkrat

Na základě analýzy chování ASM při poruchách statoru v kapitole 2.2.1 lze sestavit následující kauzální vztahy pro mezizávitový zkrat.

### Fáze a

```

if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_A and PHASE_ORDER=ABC )
      then  (   CURRENT_S_A=HIGH   and
                CURRENT_S_B=LOW    and
                CURRENT_S_C=NORMAL and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )
if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_A and PHASE_ORDER=ACB )
      then  (   CURRENT_S_A=HIGH   and
                CURRENT_S_B=NORMAL and
                CURRENT_S_C=LOW    and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )

```

### Fáze b

```

if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_B and PHASE_ORDER=ABC )
      then  (   CURRENT_S_A=NORMAL and
                CURRENT_S_B=HIGH   and
                CURRENT_S_C=LOW    and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )
if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_B and PHASE_ORDER=ACB )
      then  (   CURRENT_S_A=LOW    and
                CURRENT_S_B=HIGH   and
                CURRENT_S_C=NORMAL and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )

```

### Fáze c

```

if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_C and PHASE_ORDER=ABC )
      then  (   CURRENT_S_A=LOW    and
                CURRENT_S_B=NORMAL and
                CURRENT_S_C=HIGH   and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )
if    ( STATOR_HEALTH=TURN_F_C and PHASE_ORDER=ACB )
      then  (   CURRENT_S_A=NORMAL and
                CURRENT_S_B=LOW    and
                CURRENT_S_C=HIGH   and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )

```

## 2.4.3 Mezifázový zkrat

Na základě analýzy chování ASM při poruchách statoru v kapitole 2.2.1 lze sestavit následující kauzální vztahy pro mezifázový zkrat.

### Fáze a a b

```

if    ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_AB and PHASE_ORDER=ABC )
      then  (   CURRENT_S_A=HIGH   and
                CURRENT_S_C=LOW    and
                CURRENT_S_SUM=ZERO  )
if    ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_AB and PHASE_ORDER=ACB )
      then  (   CURRENT_S_A=HIGH   and

```

```

CURRENT_S_B=LOW    and
CURRENT_S_SUM=ZERO )

```

**Fáze b a c**

```

if ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_BC and PHASE_ORDER=ABC )
then (   CURRENT_S_B=HIGH    and
        CURRENT_S_A=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=ZERO   )

if ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_BC and PHASE_ORDER=ACB )
then (   CURRENT_S_B=HIGH    and
        CURRENT_S_C=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=ZERO   )

```

**Fáze c a a**

```

if ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_AC and PHASE_ORDER=ABC )
then (   CURRENT_S_C=HIGH    and
        CURRENT_S_B=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=ZERO   )

if ( STATOR_HEALTH=PHASE_F_AC and PHASE_ORDER=ACB )
then (   CURRENT_S_C=HIGH    and
        CURRENT_S_A=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=ZERO   )

```

**2.4.4 Zemní zkrat**

Na základě analýzy chování ASM při poruchách statoru v kapitole 2.2.1 lze sestavit následující kauzální vztahy pro zemní zkrat.

**Fáze a**

```

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_A and PHASE_ORDER=ABC )
then (   CURRENT_S_A=HIGH    and
        CURRENT_S_C=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_A and PHASE_ORDER=ACB )
then (   CURRENT_S_A=HIGH    and
        CURRENT_S_B=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

```

**Fáze b**

```

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_B and PHASE_ORDER=ABC )
then (   CURRENT_S_B=HIGH    and
        CURRENT_S_A=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_B and PHASE_ORDER=ACB )
then (   CURRENT_S_B=HIGH    and
        CURRENT_S_C=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

```

**Fáze c**

```

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_C and PHASE_ORDER=ABC )
then (   CURRENT_S_C=HIGH    and
        CURRENT_S_B=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

if ( STATOR_HEALTH=GROUND_F_C and PHASE_ORDER=ACB )
then (   CURRENT_S_C=HIGH    and
        CURRENT_S_A=LOW      and
        CURRENT_S_SUM=NONZERO )

```

## 3 Laboratorní testy

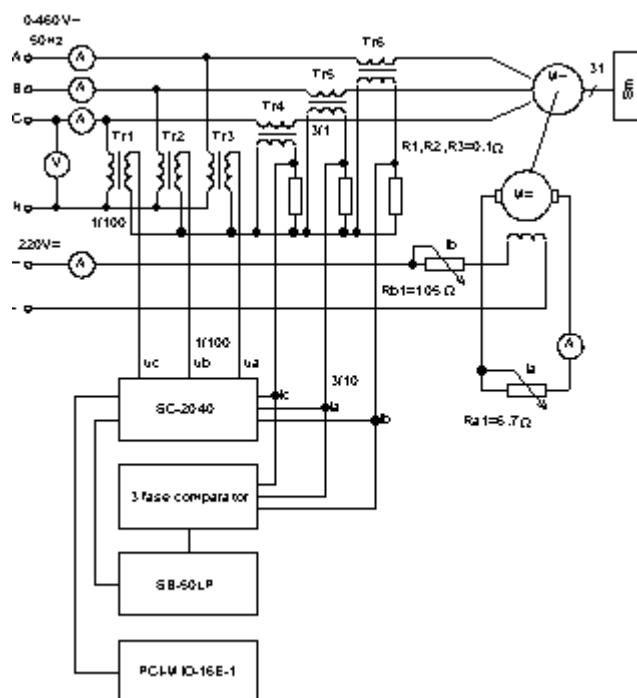
Použitelnost kauzálního modelu pro správnou diagnostiku statorových poruch ASM jsme ověřovali v laboratoři. Měli jsme k dispozici speciálně vinutý asynchronní motor, jenž dovoľoval emulaci různých statorových poruch. Měřené signály se zpracovávaly do použitelného výstupu (efektivní hodnoty). Jakýmsi mezivýsledkem byla tabulka naměřených dat s naznačením kvalitativních hodnot, jenž se potom zadávaly jako vstupy do kauzálního modelu v programu CNET.

### 3.1 Popis měřicího pracoviště

V rámci spolupráce ČVUT FEL a Rockwell Automation bylo vybudováno výzkumné pracoviště na diagnostiku poruch asynchronních motorů. Pracoviště obsahuje speciálně vinutý motor umožňující emulaci poruch, počítač s měřicí kartou s 8 diferenciálními analogovými vstupy se vzorkovacím kmitočtem do 1Mhz/s na kanál a podpůrné digitální I/O linky. Pracoviště dále obsahuje 8 kanálový simultánní zesilovač, přípravek pro snímání průchodu nulou pro tři analogové veličiny a další podpůrné prostředky pro měření.

#### 3.1.1 Měření a zpracování signálů

Orientační schéma zapojení pracoviště je na obr.10. Asynchronní motor je napájen s indukčního regulátoru 0-460V~. Pro snímání proudu jsou použity měřicí transformátory proudu 15/5A, jejichž výstup je zatížen měřicím odporovým bočníkem 0.1Ω. Pro měření napětí jsou použity tři jednofázové transformátory zapojené do hvězdy, přičemž jejich převod je 1/20.

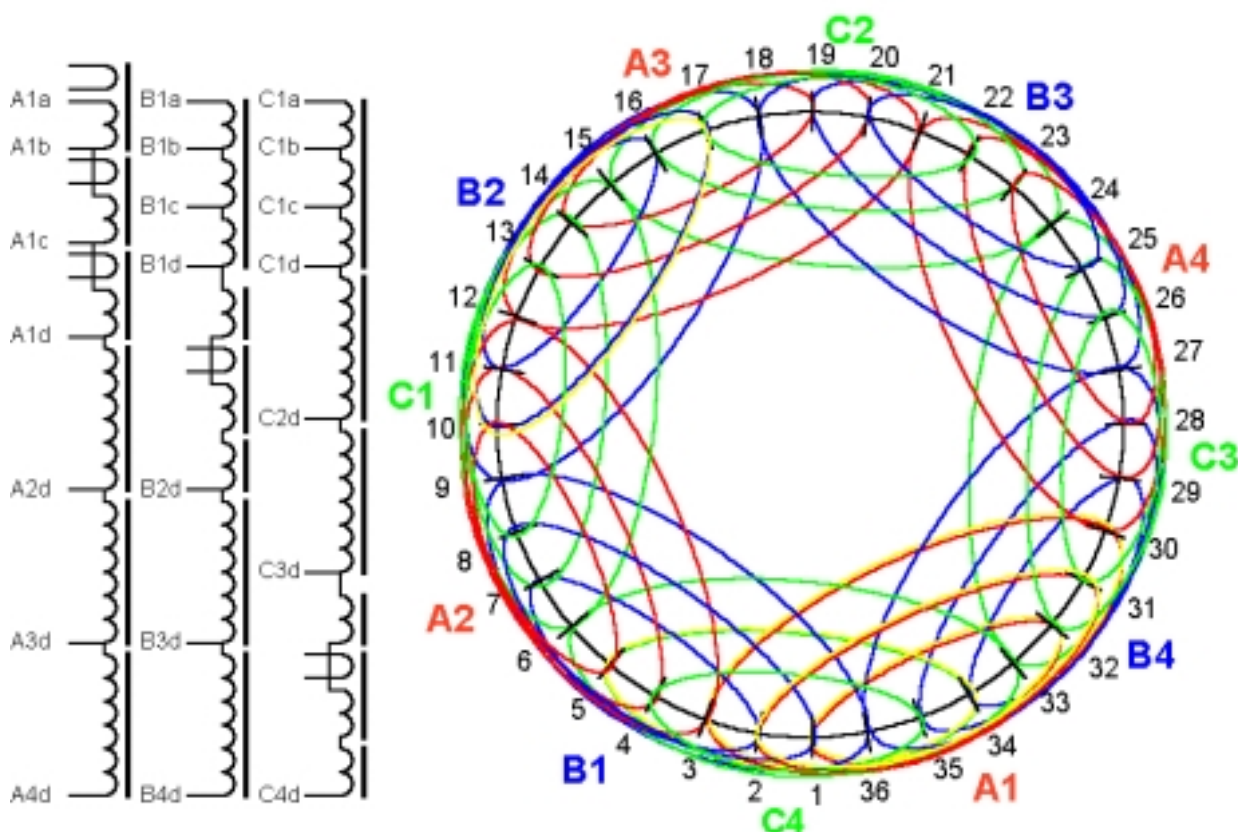


**Obr.10:** Orientační schéma měřicího pracoviště

### 3.1.2 Speciální ASM

Pro emulaci chyb byl použit motor R36s+4-0b-H0 MEZ Mohelnice s těmito parametry:

jmenovitý výkon	0.8 kW
napětí	380Y/220D V
proud	2.1/3.6 A
frekvence	50 Hz
jmenovité otáčky	1420 ot/min



Obr.11. Schéma zapojení asynchronního motoru pro emulaci poruch statoru

Z důvodu potřeby vyvedení odboček pro emulaci poruch statoru byl motor převinut dle zapojení, které je na obr.11 vlevo. Vinutí každé fáze se skládá s 12 cívek tj. po 3 cívkách na každý pól. Spojení cívek na prvním pólu je vyvedeno na svorkovnici a dále pak spojení mezi každým pólem. Pro emulování malých závitových zkratů jsou do všech cívek prvního pólu fáze A, do druhé cívky druhého pólu fáze B a do druhé cívky čtvrtého pólu fáze C doplněny jednotlivé závity a vyvedeny na svorkovnici. Pro názornější představu je na obr.11 vpravo barevné znázornění vinutí. Více informací naleznete v literatuře [8].

### 3.1.3 Zatěžovací dynamometr

Pro zatěžování asynchronního motoru je použito dynamo spojené s motorem přes výsuvnou spojku. Buzení je napájeno přes regulační odpor z usměrněného napětí 220V= a jeho kotva je spojena nakrátko přes regulační odpor.

## 3.2 Emulace statorových poruch

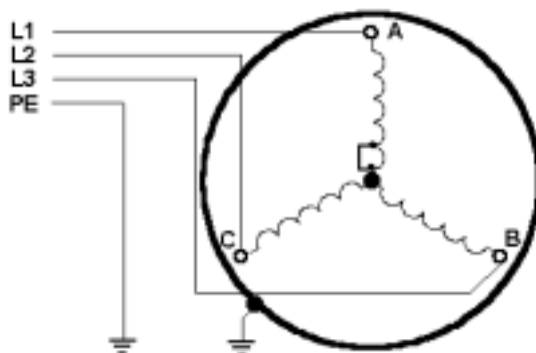
Zkratováním příslušných vývodů statorového vinutí ASM lze emulovat určitý druh poruchy. Nejprve je ovšem nutné uvést motor do pracovního stavu, tj.nejčastěji jmenovité zatížení (v našem případě jsme ASM

mohli zatížit pouze 1/8 jeho jmenovitého výkonu), jmenovité otáčky, přičemž je motor připojen k síti se jmenovitým napětím motoru.

### 3.2.1 Mezizávitový zkrat

Příklad závitového zkratu ve fázi  $a$  je na obr.12. Nebudeme-li uvažovat jednotlivé závity, lze s motorem zapojeným dle obr.11 emulovat celkem 12 různě velikých závitových zkratů. Závitové zkraty větší než 50% vinutí však i u malých strojů způsobí tak vysoké nadproudy, že dojde k vypnutí tepelné ochrany. Budeme-li uvažovat zkraty menší než 50%, můžeme emulovat zkraty 1/12, 1/6, 1/4, 1/3, a 5/12 vinutí.

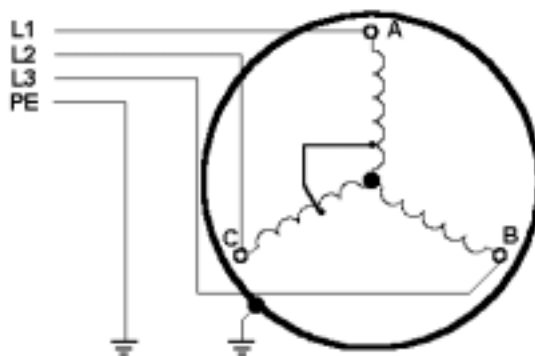
Reálně jsou však pravděpodobné pouze zkraty mezi závity v jedné drážce, nebo alespoň závity jdoucí společně, k dalším drážkám, což pro dané uspořádání vinutí dovoluje zkrat maximálně přes 1/4 vinutí a nebo až přes celé vinutí, což má ale za následek vypnutí nadproudové ochrany motoru.



Obr.12: Mezizávitový zkrat

### 3.2.2 Mezifázový zkrat

Příklad mezifázového zkratu je na obr.13. Budeme-li dle uvažovat zkraty zasahující maximálně do 1/4 vinutí dostaneme 9 typů zkratů: 1/12-1/12, 1/12-1/6, 1/12-1/4, 1/6-1/12, 1/6-1/6, 1/6-1/4, 1/4-1/12, 1/4-1/6, 1/4-1/4. Mezifázové zkraty jsou obecně nebezpečnější než zkraty mezizávitové, protože díky uspořádání vinutí mohou nastat prakticky přes libovolně velkou část vinutí. Velikost vzniklých nadproudů a pokles momentu pak nedovolí tento motor dále provozovat.



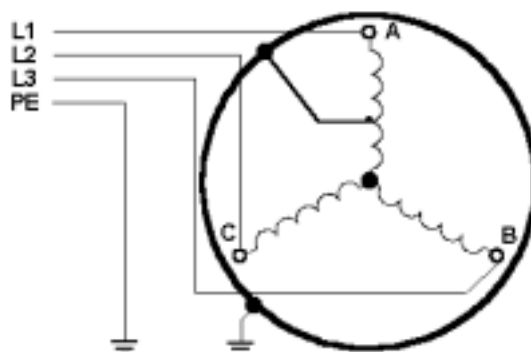
Obr.13: Mezifázový zkrat

### 3.2.3 Zemní zkrat

Příklad zemního zkratu je na obr.14. Svým chováním je zemní zkrat značně odlišný od závitových zkratů. Zatím co i malé závitové zkraty způsobují značné proudy v poškozené části vinutí a tím i jeho vysoké tepelné namáhání, zemní zkraty způsobí pouze posun uzlu motoru. Vlastní vinutí motoru postiženého



zemním zkratem je namáháno podstatně menším proudem, přestože vzestup napájecího proudu motoru může být daleko vyšší než u obdobně velkého závitového zkratu. Vyhodnocení zemního zkratu je přitom snadnější než vyhodnocení zkratu závitového, nebo mezifázového. Nevýhodou zemních zkratů je, že mohou obdobně jako zkraty mezifázové vznikat v libovolné části vinutí a způsobit tak okamžité odstavení stroje.



Obr.14: Zemní zkrat

### 3.3 Výsledky měření

Na pracovišti popsaném v minulé kapitole bylo provedeno několik měření. Výsledky byly převedeny do tabulkového procesoru MS Excel pro další zpracování. Výsledky jsou proto prezentovány ve formě tabulky. Kvalitativní hodnoty naměřených proudů jsou naznačeny barevným podkladem příslušných buněk tabulky podle tohoto klíče:

- barva tmavě modrá  - HIGH (1.1;  $\infty$ )
- barva světle modrá  - NORMAL <0.9; 1.1>
- bez výplně (bílá) - LOW <0; 0.9)

Určování, zda je nulový proud  $I_0$  v kvalitativní kategorii ZERO či NONZERO je evidentní, a proto nebylo použito barevného rozlišení.

V tabulkách je v prvním sloupci uvedeno jméno souboru s daty příslušného měření. Ve druhém sloupci je označen typ dané poruchy, přičemž se jedná o označení zkratovaných svorek na vyvedeném vinutí statoru (viz.kapitola 3.1.2 a obr.11).

#### 3.3.1 Bezporuchový chod

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m1a00101.dat	No Fault	1.20	1.23	1.30	1.24	0.04	0.97	0.99	1.05	0.03
m1a00100.dat	No Fault	1.31	1.32	1.39	1.34	0.04	0.98	0.99	1.04	0.03
m6a00232.dat	No Fault	1.25	1.25	1.20	1.23	0.04	1.01	1.02	0.97	0.03
m6a00211.dat	No Fault	1.25	1.26	1.20	1.24	0.04	1.01	1.02	0.97	0.03
m6a00182.dat	No Fault	1.27	1.27	1.22	1.25	0.04	1.01	1.02	0.97	0.03

### 3.3.2 Mezizávitový zkrat

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m6a00246.dat	A1a-A1b	2.11	1.42	1.77	1.77	0.03	1.20	0.80	1.00	0.02
m6a00247.dat	A1a-A1c	3.29	1.83	2.44	2.52	0.03	1.31	0.73	0.97	0.01
m6a00248.dat	A1a-A1d	4.56	2.25	3.09	3.30	0.03	1.38	0.68	0.94	0.01
m6a00249.dat	A3d-A4d	4.60	2.28	3.16	3.35	0.03	1.37	0.68	0.94	0.01
m6a00242.dat	B1a-B1b	1.81	2.11	1.34	1.75	0.03	1.03	1.20	0.76	0.02
m6a00243.dat	B1a-B1c	2.49	3.30	1.76	2.52	0.03	0.99	1.31	0.70	0.01
m6a00244.dat	B1a-B1d	3.17	4.60	2.20	3.32	0.03	0.95	1.38	0.66	0.01
m6a00245.dat	B3d-B4d	3.27	4.68	2.25	3.40	0.03	0.96	1.38	0.66	0.01
m6a00233.dat	C1a-C1b	1.41	1.86	2.10	1.79	0.03	0.79	1.04	1.17	0.02
m6a00234.dat	C1a-C1c	1.80	2.49	3.24	2.51	0.03	0.72	0.99	1.29	0.01
m6a00235.dat	C1a-C1d	2.21	3.14	4.50	3.28	0.03	0.67	0.96	1.37	0.01
m6a00236.dat	C1b-C1c	1.36	1.90	2.13	1.80	0.03	0.76	1.06	1.18	0.02
m6a00237.dat	C1b-C1d	1.36	1.89	2.11	1.79	0.03	0.76	1.06	1.18	0.02
m6a00238.dat	C1c-C1d	1.33	1.91	2.15	1.80	0.03	0.74	1.07	1.20	0.02
m6a00239.dat	C1d-C2d	2.23	3.23	4.56	3.34	0.03	0.67	0.97	1.37	0.01
m6a00240.dat	C2d-C3d	2.21	3.20	4.50	3.30	0.03	0.67	0.97	1.36	0.01
m6a00241.dat	C3d-C4d	2.22	3.20	4.50	3.31	0.03	0.67	0.97	1.36	0.01

### 3.3.3 Mezifázový zkrat

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m6a00216.dat	B1b-A1b	2.59	2.21	1.47	2.09	0.03	1.24	1.06	0.70	0.01
m6a00217.dat	B1b-A1c	3.65	2.63	2.00	2.76	0.03	1.32	0.95	0.72	0.01
m6a00220.dat	B1c-A1b	3.18	3.36	1.66	2.73	0.03	1.16	1.23	0.61	0.01
m6a00221.dat	B1c-A1c	4.30	3.86	1.93	3.36	0.03	1.28	1.15	0.57	0.01
m6a00222.dat	B1c-A1d	5.74	4.52	2.42	4.23	0.03	1.36	1.07	0.57	0.01
m6a00225.dat	B1d-A1c	5.13	5.34	2.00	4.16	0.03	1.23	1.28	0.48	0.01
m6a00218.dat	B1b-A1d	5.02	3.19	2.67	3.63	0.03	1.38	0.88	0.74	0.01
m6a00224.dat	B1d-A1b	3.88	4.70	1.94	3.51	0.03	1.11	1.34	0.55	0.01
m6a00194.dat	C1b-A1b	2.13	1.50	2.59	2.07	0.03	1.03	0.72	1.25	0.01
m6a00195.dat	C1b-A1c	3.32	1.50	3.31	2.71	0.03	1.22	0.55	1.22	0.01
m6a00202.dat	C1c-A1b	2.46	2.01	3.61	2.69	0.03	0.91	0.75	1.34	0.01
m6a00203.dat	C1c-A1c	3.56	1.76	4.32	3.22	0.03	1.11	0.55	1.34	0.01
m6a00204.dat	C1c-A1d	4.81	1.58	4.99	3.79	0.03	1.27	0.42	1.32	0.01
m6a00210.dat	C1d-A1c	3.88	2.25	5.48	3.87	0.03	1.00	0.58	1.41	0.01
m6a00196.dat	C1b-A1d	4.63	1.68	3.98	3.43	0.03	1.35	0.49	1.16	0.01
m6a00209.dat	C1d-A1b	2.84	2.60	4.78	3.41	0.03	0.83	0.76	1.40	0.01
m6a00190.dat	C1b-B1b	1.57	2.71	2.28	2.19	0.03	0.72	1.24	1.04	0.01
m6a00191.dat	C1b-B1c	2.11	3.77	2.68	2.85	0.03	0.74	1.32	0.94	0.01
m6a00198.dat	C1c-B1b	1.72	3.21	3.37	2.77	0.03	0.62	1.16	1.22	0.01
m6a00199.dat	C1c-B1c	2.04	4.39	3.90	3.44	0.03	0.59	1.28	1.13	0.01
m6a00200.dat	C1c-B1d	2.54	5.88	4.58	4.33	0.03	0.59	1.36	1.06	0.01
m6a00207.dat	C1d-B1c	2.06	5.15	5.30	4.17	0.03	0.50	1.23	1.27	0.01
m6a00192.dat	C1b-B1d	2.80	5.18	3.26	3.75	0.03	0.75	1.38	0.87	0.01
m6a00206.dat	C1d-B1b	1.98	3.90	4.67	3.52	0.03	0.56	1.11	1.33	0.01

### 3.3.4 Zemní zkrat

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m1a00131.dat	A1b-G	1.47	1.45	0.99	1.30	1.20	1.13	1.11	0.76	0.92
m1a00132.dat	A1c-G	1.95	1.69	0.72	1.45	2.32	1.34	1.16	0.50	1.60
m1a00133.dat	A1d-G	2.66	1.87	0.48	1.67	3.56	1.59	1.12	0.29	2.13
m1a00134.dat	B1b-G	0.93	1.45	1.45	1.28	1.08	0.73	1.14	1.14	0.85
m1a00135.dat	B1c-G	0.65	1.90	1.67	1.41	2.18	0.46	1.35	1.19	1.55
m1a00136.dat	B1d-G	0.41	2.60	1.87	1.63	3.47	0.25	1.60	1.15	2.13
m1a00137.dat	C1b-G	1.40	0.95	1.51	1.29	1.13	1.09	0.74	1.17	0.88
m1a00138.dat	C1c-G	1.62	0.66	1.98	1.42	2.26	1.14	0.46	1.39	1.59
m1a00139.dat	C1d-G	1.80	0.42	2.67	1.63	3.51	1.10	0.26	1.64	2.15

## 3.4 Zhodnocení měření

Na speciálně vinutém asynchronním motoru (0.8kW/380V/2.1A) umožňujícím emulovat poruchy statorového vinutí byla provedena měření na jejichž základě lze s použitím kauzálního modelu ASM provést diagnostiku ASM. Motor byl zatížen dynamometrem (100W) a napájen z tvrdé symetrické sítě.

Ukázalo se, že jednou z nejdůležitějších věcí pro zajištění správné diagnostické funkce kauzálního modelu ASM je vhodná volba hranic pro přidělování kvalitativních hodnot jednotlivým veličinám. V našem případě jsme přisoudili poměrné hodnotě kvalitativní hodnotu NORMAL pokud náležela do intervalu  $<0.90; 1.10>$ .

Tento způsob kvalitativizace se osvědčil pro diagnostiku **mezizávitových zkratů**. Žádná z poměrných hodnot se příliš nepřiblížila hraničním hodnotám a diagnostika by proběhla jednoznačně (max.poměrná hodnota z kategorie LOW – 0.80; min.poměrná hodnota z kategorie NORMAL – 0.94; max.poměrná hodnota z kategorie NORMAL – 1.07; min.poměrná hodnota z kategorie HIGH – 1.17).

V případě **mezifázových zkratů** se v některých případech poměrné hodnoty velice blížily hraničním kvalitativních hodnot (0.90 a 1.10).

*Např. měření*

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m6a00224.dat	B1d-A1b	3.88	4.70	1.94	3.51	0.03	1.11	1.34	0.55	0.01

by při zařazení hodnoty poměrného proudu  $I_a$  do kvalitativní kategorie NORMAL (místo do HIGH, např. vlivem chyby měření) znamenalo výslednou diagnózu TURN\_F\_B, tedy mezizávitový zkrat ve fázi *b*.

Podobně je na tom měření

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m6a00206.dat	C1d-B1b	1.98	3.90	4.67	3.52	0.03	0.56	1.11	1.33	0.01

jenž je velmi blízko diagnostice TURN\_F\_C (mezizávitový zkrat fáze *c*), místo skutečné poruchy PHASE\_F\_BC (mezifázový zkrat mezi fázemi *b* a *c*).

V případě měření

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m6a00203.dat	C1c-A1c	3.56	1.76	4.32	3.22	0.03	1.11	0.55	1.34	0.01

mohl poměrný proud  $I_a$  snadno klesnout pod 1.10, čímž by “spadl” do kategorie NORMAL. V tomto případě by však zůstala diagnóza správná, neboť by se podle předdefinovaných

kauzálních vztahů rozhodovalo o typu poruchy na základě kvalitativních hodnot proudů  $I_b$  a  $I_c$ .

Při **zemním zkratu** vzroste evidentně hodnota nulového proudu  $I_0$  (poslední sloupec). Při malých zemních zkratech (blízko uzlu) není poměrná hodnota proudu postižené fáze příliš nad hranicí 1.10.

*Např.:*

# measurement	Fault Type	Ia [A]	Ib [A]	Ic [A]	I line [A]	Io [A]	ia [-]	ib [-]	ic [-]	Io [-]
		Line current (measured, RMS)			AVG value	neutral curr. (calculated)	p.u. of measured current in relation to actual AVG value			
m1a00131.dat	A1b-G	1.47	1.45	0.99	1.30	1.20	1.13	1.11	0.76	0.92
m1a00134.dat	B1b-G	0.93	1.45	1.45	1.28	1.08	0.73	1.14	1.14	0.85

Kauzální model vyhodnotí zemní zkrat zemní zkrat ve fázi  $a$  (měření m1a00131.dat) na základě nenulového proudu  $I_0$ , nízkého (LOW) proudu  $I_c$  a vysokého (HIGH) proudu  $I_a$  (viz kapitola 2.4.4). Budeme-li chtít postihnout i velmi malé zemní zkraty, bude třeba pozměnit rozhodovací algoritmus, a vyhlásit zemní zkrat ve fázi  $a$  už při  $I_a$ =NORMAL.

## 4 Shrnutí, závěry a doporučení

Na stránkách této zprávy jsou shrnuty počáteční zkušenosti a první výsledky práce, jejímž cílem je vytvoření kauzálního modelu asynchronního motoru (ASM). Tento model by měl být po aplikaci do programu CNET<sup>[6]</sup> součástí systému pro diagnostiku poruch ASM.

Chování asynchronního motoru je pro účely programu CNET nutno popsat pomocí kauzalit, to znamená jednoduše a co nejjednodušeji. Zároveň je jednou z priorit tohoto projektu **jednoduchost a nenáročnost** celého diagnostického systému. Proto jsou jediné informace o aktuálním stavu motoru získávány z efektivních hodnot proudů a napětí měřených na svorkách stroje.

Už při prvních úvahách nad strukturou a principy kauzálním modelem ASM bylo jasné, že bude z počátku nutné vycházet z určitých předpokladů (mnohdy značně zjednodušujících), a zúžit diagnostické možnosti modelu. **Výsledná verze modelu je tedy omezena v těchto směrech:**

- postihuje jen diagnostiku statorových poruch
- předpokládá ASM napájený z tvrdého a symetrického zdroje napětí
- předpokládá konstantní zatížení motoru
- předpokládá neporušený rotor a mechanické části ASM.

Výstupem programu CNET je tedy informace o “zdraví” statoru. Tato diagnóza vzniká na základě navrženého kauzálního modelu ASM (kapitola 2.4) a měřených proudů a napětí. Efektivní hodnoty měřených veličin jsou pro kauzální model převedeny do formy **kvalitativních hodnot** (kapitola 2.3).

V laboratoři jsme na speciálně vinutém ASM (kapitola 3.1) naměřili data pro různé statorové poruchy. Zpracované výsledky jsou shrnuty v kapitole 3.3. Na jejich základě lze konstatovat, že pro konkrétně použitý typ motoru a pro jeho dané zatížení (1/8 jmenovitého výkonu; bohužel nám vybavení pracoviště neumožnilo vyšší zatížení) se vytvořený kauzální model osvědčil – to znamená, že je s jeho pomocí program CNET na základě kvalitativních vstupů schopen identifikovat typ naemulované statorové chyby.

**Alé!** Tyto testy byly provedeny pouze na jednom typu motoru, a navíc pouze při částečném zatížení a napájení z tvrdé sítě.

Proto je pro úplnou verifikaci použitelnosti navrženého kauzálního modelu pro diagnostiku ASM vhodné učinit následující:

- 1♦ Získat data naměřená na jiných typech motorů (s možností emulace statorových poruch).
- 2♦ Provést měření pro různá zatížení ASM.
- 3♦ Provést měření na motoru napájeném z nesymetrické 3-fázové sítě.

Na základě těchto měření lze potom

- 4♦ Ošetřit kauzální model tak, aby byl diagnostický výstup jednoznačnější.
- 5♦ Vypracovat metodu pro zavádění kvalitativních hodnot pro různé typy motorů na základě jejich štitkových hodnot.

Pokud jde o jiné poruchy ASM než statorové (rotor, ložiska, hřídel a ostatní mechanické součásti), je třeba zvolit kompromis mezi jednoduchostí a kvalitou diagnostických výstupů. Pro identifikaci například rotorových poruch by bylo zapotřebí monitorovat další veličiny stroje, případně realizovat komplikované zpracování signálů. Zvyšovat množství identifikovatelných poruch ASM lze pouze za cenu vyšší složitosti a nákladnosti systému, což by nesplňovalo kritéria, jenž jsme si uložili na samém počátku tohoto projektu. Jednou z možností, jak vylepšit diagnostické kvality modelu a přitom nezavádět technologicky příliš náročné procesy, by bylo monitorování fázového posuvu statorových proudů.

# 5 Přílohy

## 5.1.1 Kauzální model ASM pro program CNET (zdrojový kód)

```
(scn
;;;
;;; This model allows for stator diagnostics
;;; under a requirement of balanced line
;;;
;;;
'induction_motor
:diagnosis
;;; System modes
'(
    (STATOR_HEALTH (OK TURN_F_A TURN_F_B TURN_F_C PHASE_F_AB PHASE_F_AC PHASE_F_BC
GROUND_F_A GROUND_F_B GROUND_F_C) (0 1 1 1 1 1 1 1))
)
;;; System variables
;;;;;;;;;-----Observables-----
'(
    (CURRENT_S_A (LOW NORMAL HIGH))
    (CURRENT_S_B (LOW NORMAL HIGH))
    (CURRENT_S_C (LOW NORMAL HIGH))
    (CURRENT_S_SUM (ZERO NONZERO))
    (PHASE_ORDER (ABC ACB))
)

'(HEALTHY
(
    (:IF
        (= STATOR_HEALTH OK)
        (:AND
            (= CURRENT_S_A NORMAL)
            (= CURRENT_S_B NORMAL)
            (= CURRENT_S_C NORMAL)
            (= CURRENT_S_SUM ZERO)
        ) ;; and
    ) ;; if
)

'(TURN_TO_TURN_PHASE
(
    (:IF
        (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH TURN_F_A))
        (:AND
            (= CURRENT_S_A HIGH)
            (= CURRENT_S_B LOW)
            (= CURRENT_S_C NORMAL)
            (= CURRENT_S_SUM ZERO)
        ) ;; and
    ) ;; if
    (:IF
        (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH TURN_F_A))
        (:AND
            (= CURRENT_S_A HIGH)
            (= CURRENT_S_B NORMAL)
            (= CURRENT_S_C LOW)
            (= CURRENT_S_SUM ZERO)
        ) ;; and
    ) ;; if

    (:IF
        (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH TURN_F_B))
        (:AND
            (= CURRENT_S_A NORMAL)
            (= CURRENT_S_B HIGH)
            (= CURRENT_S_C LOW)
            (= CURRENT_S_SUM ZERO)
        ) ;; and
    )
)
```

```

) ;; if
(:IF
  (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH TURN_F_B))
  (:AND
    (= CURRENT_S_A LOW)
    (= CURRENT_S_B HIGH)
    (= CURRENT_S_C NORMAL)
    (= CURRENT_S_SUM ZERO)
  ) ;; and
) ;; if

(:IF
  (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH TURN_F_C))
  (:AND
    (= CURRENT_S_A LOW)
    (= CURRENT_S_B NORMAL)
    (= CURRENT_S_C HIGH)
    (= CURRENT_S_SUM ZERO)
  ) ;; and
) ;; if
(:IF
  (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH TURN_F_C))
  (:AND
    (= CURRENT_S_A NORMAL)
    (= CURRENT_S_B LOW)
    (= CURRENT_S_C HIGH)
    (= CURRENT_S_SUM ZERO)
  ) ;; and
) ;; if
)
)

' (PHASE_TO_PHASE_FAULTS
  (
    (:IF
      (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_AB))
      (:AND
        (= CURRENT_S_A HIGH)
        (= CURRENT_S_C LOW)
        (= CURRENT_S_SUM ZERO)
      ) ;; and
    ) ;; if
    (:IF
      (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_AB))
      (:AND
        (= CURRENT_S_A HIGH)
        (= CURRENT_S_B LOW)
        (= CURRENT_S_SUM ZERO)
      ) ;; and
    ) ;; if

    (:IF
      (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_BC))
      (:AND
        (= CURRENT_S_A LOW)
        (= CURRENT_S_B HIGH)
        (= CURRENT_S_SUM ZERO)
      ) ;; and
    ) ;; if
    (:IF
      (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_BC))
      (:AND
        (= CURRENT_S_C LOW)
        (= CURRENT_S_B HIGH)
        (= CURRENT_S_SUM ZERO)
      ) ;; and
    ) ;; if

    (:IF
      (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_AC))
      (:AND
        (= CURRENT_S_B LOW)

```

```

        (= CURRENT_S_C HIGH)
        (= CURRENT_S_SUM ZERO)
    ) ;; and
) ;; if
(:IF
  (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH PHASE_F_AC))
  (:AND
    (= CURRENT_S_A LOW)
    (= CURRENT_S_C HIGH)
    (= CURRENT_S_SUM ZERO)
  ) ;; and
) ;; if
)
)

'(GROUND_FAULT
(
  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_A))
    (:AND
      (= CURRENT_S_A HIGH)
      (= CURRENT_S_C LOW)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;; and
  ) ;;if
  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_A))
    (:AND
      (= CURRENT_S_A HIGH)
      (= CURRENT_S_B LOW)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;; and
  ) ;;if

  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_B))
    (:AND
      (= CURRENT_S_A LOW)
      (= CURRENT_S_B HIGH)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;;and
  ) ;;if
  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_B))
    (:AND
      (= CURRENT_S_C LOW)
      (= CURRENT_S_B HIGH)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;;and
  ) ;;if

  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ABC) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_C))
    (:AND
      (= CURRENT_S_B LOW)
      (= CURRENT_S_C HIGH)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;;and
  ) ;;if
  (:IF
    (:AND (= PHASE_ORDER ACB) (= STATOR_HEALTH GROUND_F_C))
    (:AND
      (= CURRENT_S_A LOW)
      (= CURRENT_S_C HIGH)
      (= CURRENT_S_SUM NONZERO)
    ) ;;and
  ) ;;if
)
)
)
;;; System observables
(observables
)
;;; System queriabies
(queries)

```



## 6 Literatura

- [1] *Měřička, J. - Hamata, V. - Voženilek, P.* : Elektrické stroje, Praha 1993, skripta ČVUT
- [2] *Pavelka, J. - Čerovský, Z. - Javůrek, J.* : Elektrické pohony, Praha 1996, skripta ČVUT
- [3] *Petrov, G. N.* : Elektrické stroje 2, Praha 1982, Academia
- [4] *Kadaník, P.* : Teorie asynchronního motoru pro diagnostické účely, Praha 2000, Podkladový materiál, verze 1.0
- [5] *Měřička, J. - Zoubek, Z.* : Obecná teorie elektrického stroje, Praha 1973, SNTL
- [6] *Hejda, P. - Červinka, O.* : CNET Manual, Praha 1999, Research Report, Rockwell Advanced Technology Lab Prague
- [8] *Ryba, J.* : Induction motor diagnostics, Praha 1997, Research Report, Rockwell Advanced Technology Lab Prague