

# Simulátor ochran a protihavarijních automatik (RTDS) - modely měřících a výkonových transformátorů

Ing. Petr Neuman, CSc. , ČEPS, a.s., Praha, Česká republika  
E-mail: [neuman@ceps.cz](mailto:neuman@ceps.cz)

## Anotace

Autor příspěvku vystupuje na každoročních konferencích MATLAB v tvůrčích „tříletkách“. V letech 2002, 2003, 2004 postupně prezentoval různé části operátorského trenážeru OTS v elektrárně IPO a.s. V té době prezentovaný trenážér zahrnuje simulační model dvou parních kotlů, propojených přes společnou sběrnici se dvěma parními turbínami.

V letech 2005, 2006, 2007 pak prezentoval model SIMULINK elektrického stroje - synchronního generátoru (SG), který je jedním ze dvou nejdůležitějších komponent všech elektrárenských zařízení a elektrizačních soustav. Synchronní generátor byl prezentován v různých souvislostech, např. v dispečerském simulačním trenážeru DTS elektrárenských rozvodů připojených k distribuční soustavě, v DTS přenosové soustavy (PS), a v komplexním tvaru; zahrnujícím i simulaci elektromagnetických přechodových dějů; pro predikci kritických stavů v PS.

Letošní příspěvek uvádí poslední autorovu tvůrčí „tříletku“ (v roce 2010 dosáhne „důchodového“ věku 60 let), a v něm autor popisuje dynamické modely druhého nejdůležitějšího elektrického stroje – transformátoru. Pozornost je soustředěna na modely vhodné pro realizaci real-time číslicového simulátoru - Real Time Digital Simulator (RTDS), který je určen pro ověřování nových digitálních ochran a automatik používaných v elektrizačních soustavách. Simulátor RTDS má mnoho výhod proti tradičním metodám testování činnosti ochran a analýz vlivu různých kyvů v soustavě na ochranná zařízení. Simulace přechodových elektromagnetických dějů je důležité pro návrh a ověření správného chování ochran a automatik při mimořádných provozních stavech.

## 1. Úvod

Jednou z možností jak lépe analyzovat a řídit elektrizační soustavy je sofistikovaněji využít možnosti poskytované moderními digitálními ochranami, ať již použitých jako ochrana lokální nebo jako ochrany jež jsou součástí topologicky rozsáhlejších tzv. „protikolapsových automatik“. Další možnosti skýtá i propojení digitálních ochran, jednotek PMU (Phasor Measurement Unit) a aplikačních serverů PDC pro sběr synchronních dat přímo s dispečerským řídicím systémem SCADA/HMI. Digitální zpracování měřených dat a řešení aplikačních algoritmů, například v rámci distančních ochran, má velmi blízko k jednotkám měření synchronních fázorů PMU a jejich aplikačnímu využití, například v rámci systémů Wide Area Monitoring, Protection and Control (WAMPAC). Jedním z technických prostředků pro výzkum a vývoj naznačených aplikací je právě Real Time Digital Simulator – RTDS [2].

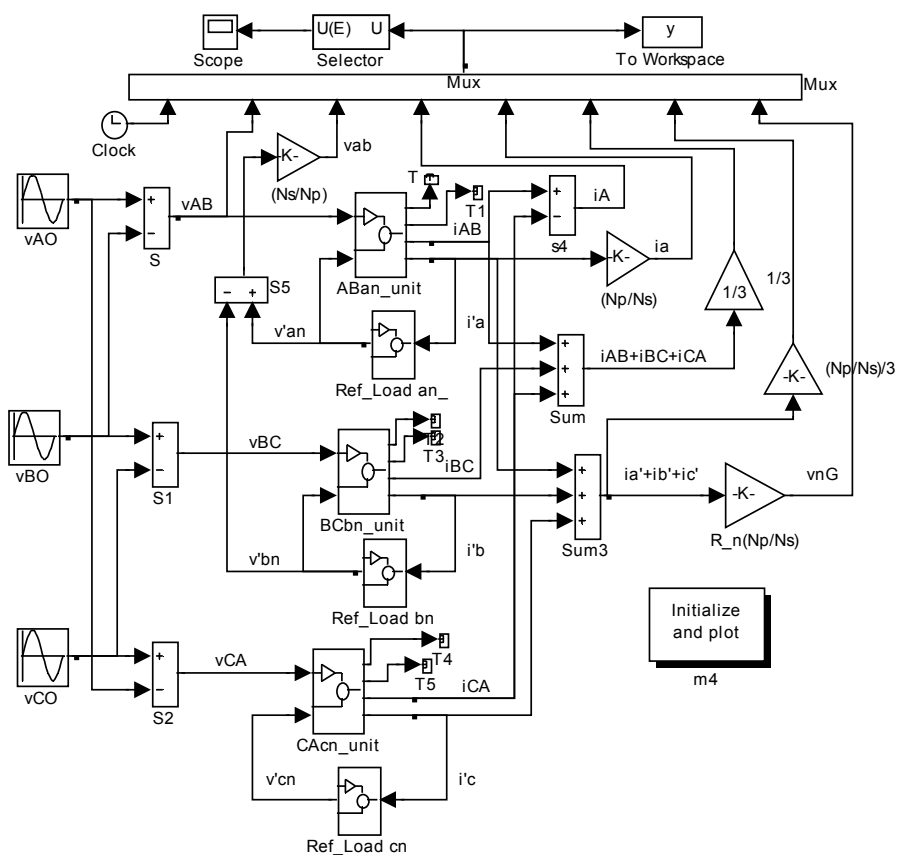
Pro účely modelování ES nebo její části v rámci realizace RTDS je nutné popsat prvky ES – transformátory, dostatečně obecným způsobem s uvažováním téměř všech nelinearit. Mnohdy je účelné pro modelování použít i netradiční přístup [10].

## 2. Modely transformátorů

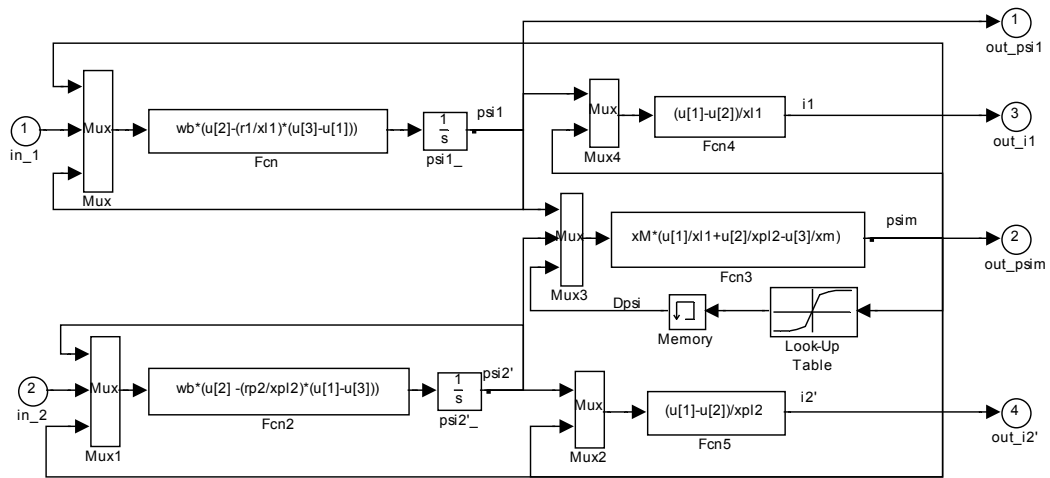
Matematicko-fyzikální popis transformátorů daný soustavou nelineárních diferenciálních rovnic; uvedených například v literatuře [4], [6] nebo [14]; se odvozuje stejným způsobem jako u všech elektrických strojů, tedy i u matematicko-fyzikálního popisu v literatuře [1], [5] uvedeném modelování synchronních generátorů.

### 2.1. Modely v prostředcích SIMULINK

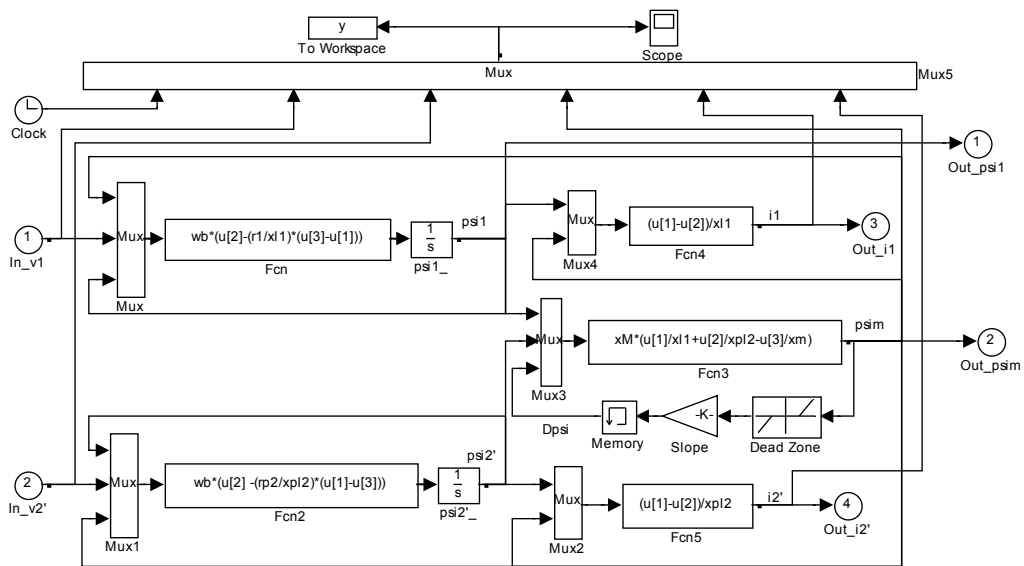
V příspěvku jsou uvedena blokově orientovaná schémata (obrázky 1.,2.,3.,4.) z kterých vyplývá rozdíl při modelování bez a s uvažováním nelineární charakteristiky magnetického sycení.



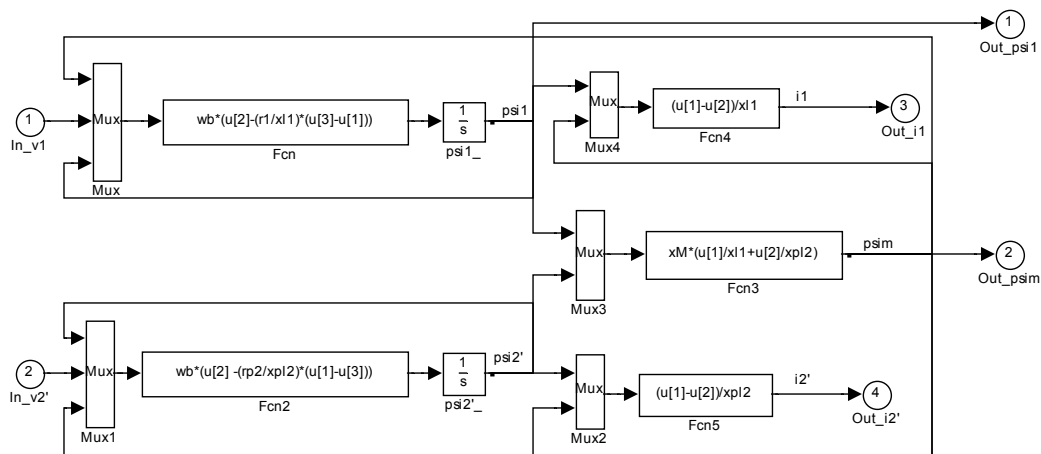
Obr. 1. Trojfázový třívinutový transformátor.



Obr. 2. Podmodely „Lock-Up Table“: ABan\_unit, BCbn\_unit, CACn\_unit.

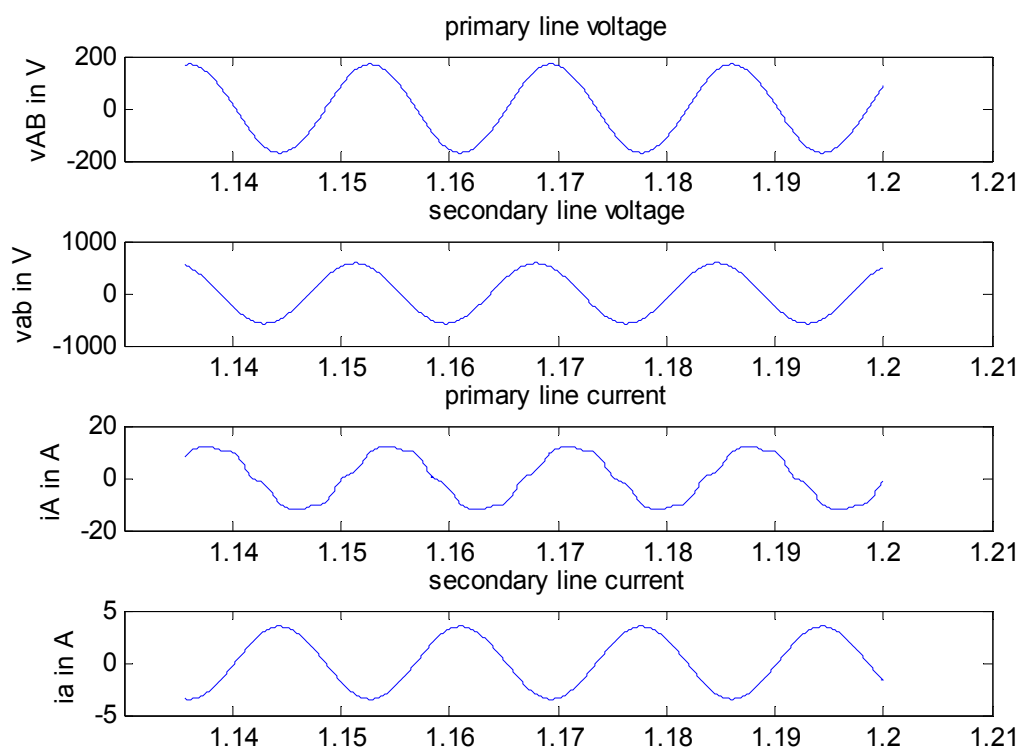


Obr. 3. Podmodely „Dead Zone“: ABan\_unit, BCbn\_unit, CACn\_unit.

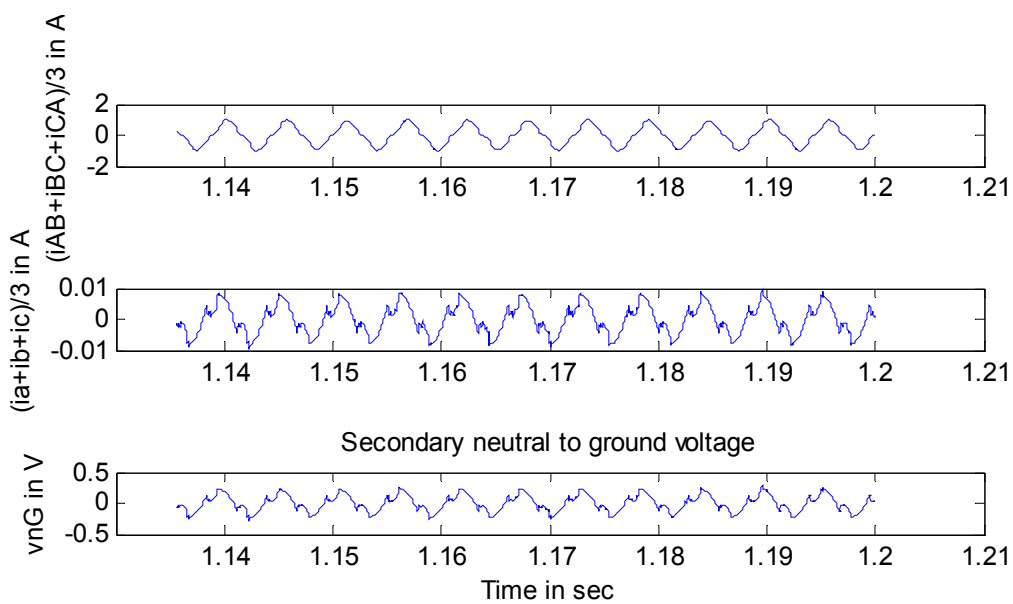


**Obr. 12.** Podmodely „Linear“: ABan\_unit, BCbn\_unit, CAcn\_unit.

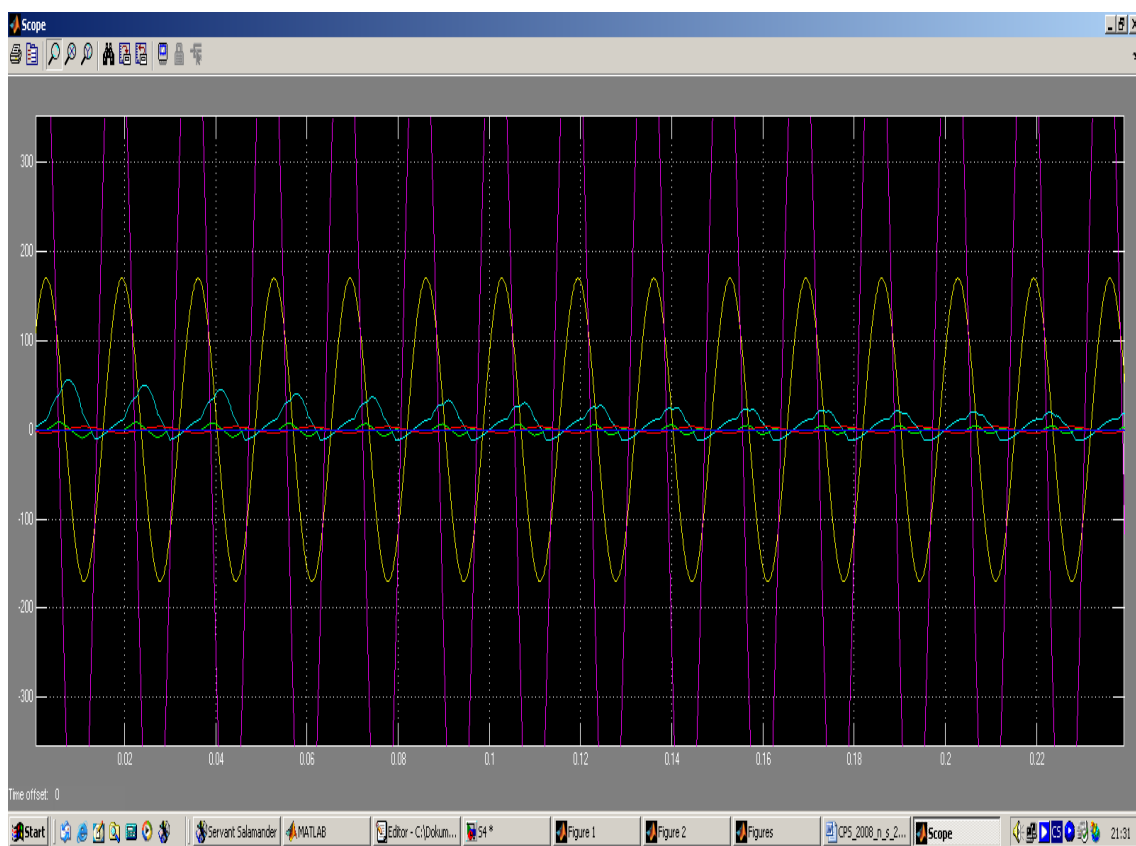
Z uvedených schémat v jazyku SIMULINK je zřejmá bloková struktura modelů transformátorů a na základě simulačních výsledků lze konstatovat, že prostředí MATLAB a jeho toolboxy (SIMULINK, SimPowerSystem) jsou vyhovující pro modelování jak elektromechanických tak i elektromagnetických přechodových jevů – viz další typové ilustrativní časové průběhy veličin na obrázcích Obr.5.a.,b.,c. Na těchto časových průbězích je evidentní výskyt vyšších harmonických, o jejichž využití v ochranách bude zmínka v následující podkapitole 2.2.



Obr.5.a. Simulované průběhy síťových napětí a proudů



Obr.5.b. Simulované průběhy proudů a zemního napětí



Obr.5.c. Simulované průběhy veličin na osciloskopu SIMULINK

## 2.2. Aplikace modelování při návrhu a testování ochran.

Ochrany transformátorů jsou ovlivňovány vyššími harmonickými, které se za určitých provozních podmínek a stavů v hodnotách veličin vyskytují, a lze je využít i pro zlepšení funkcí elektrických číslicových ochran.

Při modelování a využívání RTDS pro testování ochran je nutné modelovat realisticky transformátor s možností simulace následujících jevů:

2.2.1. Transformátor s nárazovými proudy bohatými na harmonické složky, vyskytující se 2.harmonická se používá pro blokování ochran proti nárazu [3], [11], [12].

Možné variability řešení dokládá literatura [9], kde ve schématu blokování proti nárazu je uvedena kromě 2.harmonické i 5.harmonická.

2.2.2. Přebuzení transformátoru s nelineárními magnetickými vlastnostmi, které generuje vyšší harmonické (3., 5., 7.harmonickou). Pro blokování ochran proti přebuzení se používá 3.harmonická [3], resp. 5.harmonická [11], [12] ?

V literatuře [11] je uvedeno, že pro blokování lze použít kombinaci 2. a 5.harmonické. Jiná situace je však při „internal fault“ – vnitřním zkratu, kdy vzniká v sekundárním vinutí 3.harmonická, která ale nemůže být použita pro blokování.

2.2.3. Přesycení proudových transformátorů, přičemž proudy v sekundárních vinutích PTP obsahují značné množství harmonických. Převládá při něm 3.harmonická - viz [3], resp. 2.harmonická ? – viz výsledky konkrétních zkoušek zapínání transformátorů a jejich rozklad Fourierovou analýzou [12].

Je tedy zřejmé, že na rozdíl od literatury [11], [12], je trochu odlišný popis provozních stavů a zahrnutí vyšších harmonických do algoritmů ochran uveden v literatuře [3]. Tam je řečeno, že nárazový magnetizační proud obsahuje výraznou 3.harmonickou, která vzniká díky nelinearitě magnetizační charakteristiky. V třífázovém systému vyvolá 3.harmonickou netočivá složka trojnásobné frekvence, která pokud se nemůže uzavřít přes neuzemněnou nulu - střed hvězdy, způsobí otáčení nulového bodu právě touto trojnásobnou frekvencí (Pozn: uzavřená nula nebo spojení do trojúhelníka tento problém vyřeší pouze částečně).

Další harmonickou v nárazových magnetizačních proudech je 2.harmonická, vznikající hlavně na začátku přechodného děje. Zjednodušeně lze říci, že při připojení transformátoru je v každé fázi jiná stejnosměrná složka, takže jde o fázovou nesouměrnost při níž zpětná složka, otáčející se proti sousledné složce dvojnásobnou frekvencí, vyvolá právě 2.harmonickou [13].

Uvedené variability řešení ochran jsou dány případ od případu konkrétním zařízením a soustavou, ale ani obecně nejsou všechny případy a možnosti systémově zpracovány a generalizovány. Proto je potřebné na základě provozních měření a simulačních výsledků ověřit širší možnosti řešení.

Například, transformátor ve stavu naprázdno můžeme popsat diferenciální rovnicí podle literatury [7]:

$$u = U_{\max} \sin(\omega t + \alpha) = R_1 i_0 + L_1 \frac{di_0}{dt} \quad (1.1)$$

kde  $R_1$  je činný odpor primárního vinutí,

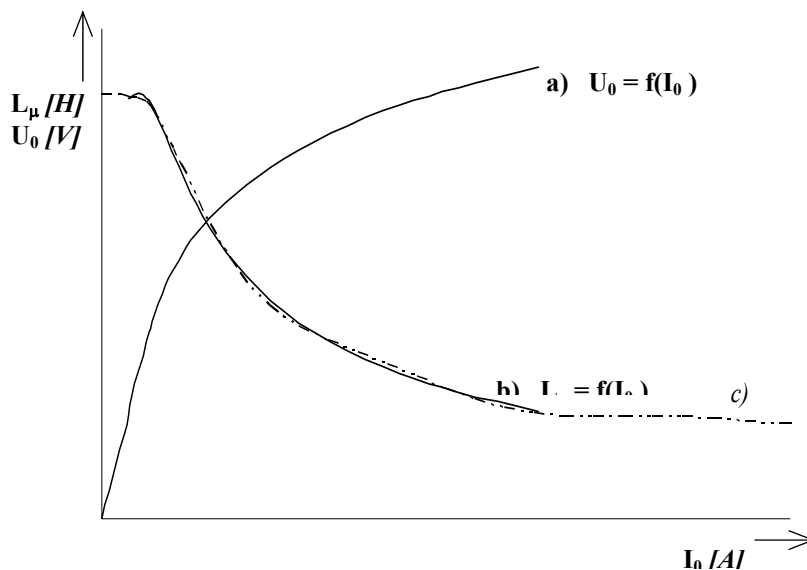
$L_1$  je celková indukčnost primárního vinutí, t. j.

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} \quad (1.2)$$

přičemž  $L_{\mu} = f(I_0)$ , t. j.  $L_{\mu}$  je funkcí magnetizačního proudu  $I_{\mu} \cong I_0$ . Tuto závislost lze určit z měření naprázdno tak, že pro každou naměřenou hodnotu napětí  $U$  a příslušného proudu  $I_0$  vypočítáme reaktanci, resp. indukčnost

$$X_{\mu} = \frac{U_0}{I_0}, \text{ resp. } L_{\mu} = \frac{X_{\mu}}{2\pi f} \quad (1.3)$$

Vypočtené hodnoty zpracujeme tabulkově nebo graficky (Obr. 6). Odpor reprezentující ztráty v železe  $R_{Fe}$  zanedbáme. Na obr.6 je vidět souvislost závislosti  $L_{\mu} = f(I_0)$  se závislostí  $U_0 = f(I_0)$ , která vyplývá z charakteristiky naměřené ve stavu naprázdno  $I_0 = f(U_0)$ , a je překreslená do souřadnic  $U_0 = f(I_0)$ .



Obr. 6. **a)** Charakteristika  $U = f(I_0)$  ve stavu naprázdno s aproximací do nulové hodnoty proudu a napětí, **b)** Závislost magnetizační indukčnosti od proudu naprázdno  $L_{\mu} = f(I_0)$  vypočítaná z charakteristiky a), **c)** aproximační křivka magnetizační indukčnosti pro účely simulace.

Nejnepříznivější stav nastane, pokud připojení na síť se uskuteční v okamžiku nulového napětí, tzn. když časová změna napětí je největší. Podle vztahu (1.1) je ustálená složka proudu

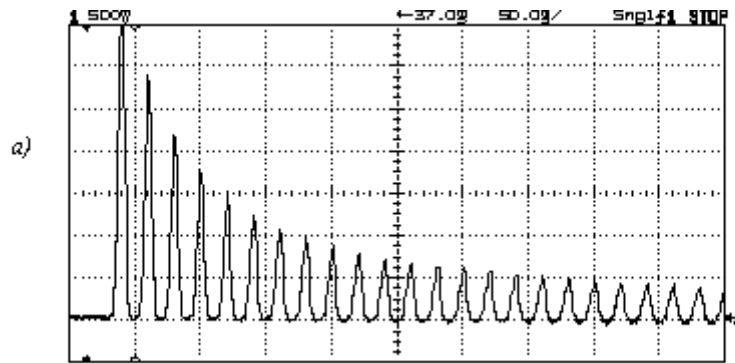
$$i' = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -I_{\max} \cos \omega t \quad (1.4)$$



a přechodná složka proudu

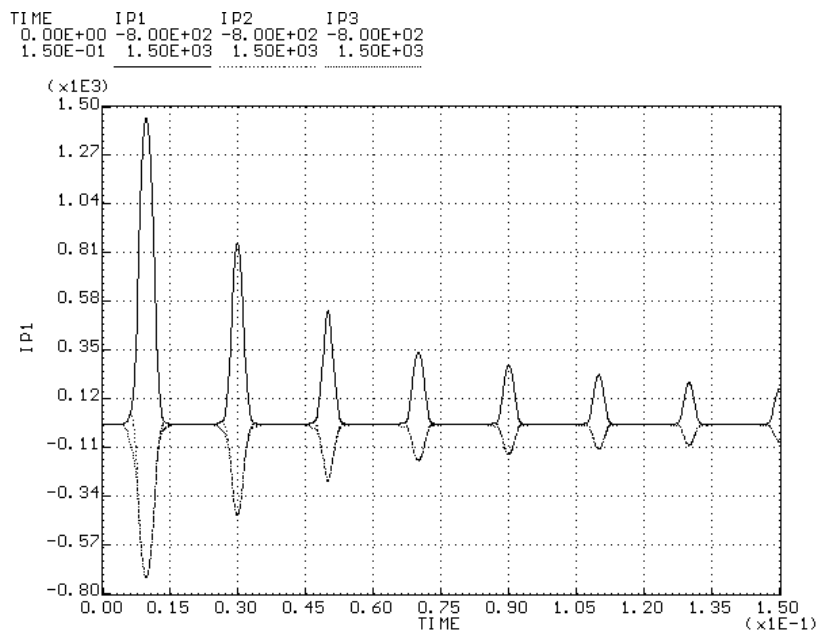
$$i'' = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} \sin \frac{\pi}{2} e^{-\frac{0}{L_1} t} = \frac{U_{\max}}{\omega L_1} = I_{\max} \quad (1.5)$$

má konstantní hodnotu rovnou maximální hodnotě ustáleného proudu  $i'$ , protože neuvažujeme odpor, tedy tlumení je nulové. Na Obr.7 je znázorněný oscilografický průběh se silně vyvinutou jednosměrnou složkou [7], [8].

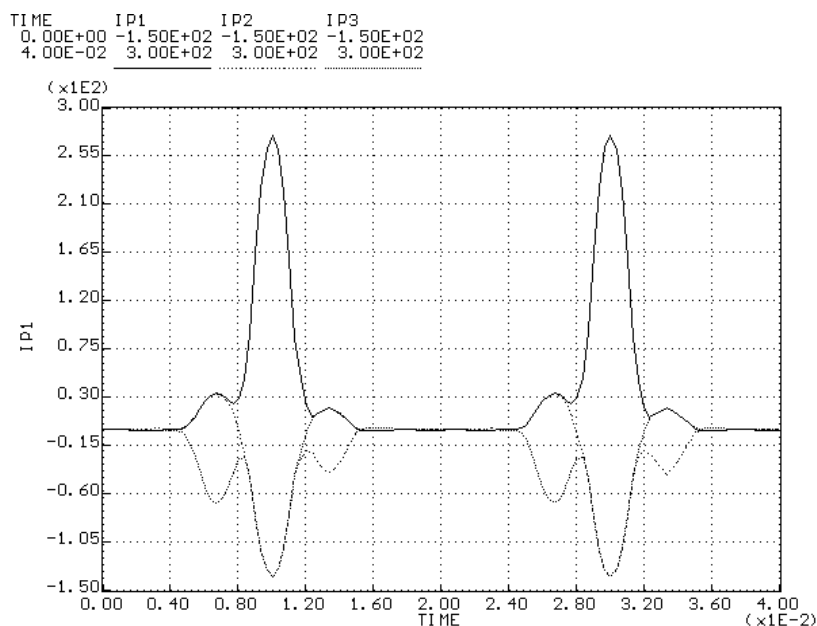


Obr.14. Průběh proudu naprázdno – oscilografický záznam

Uvedeme nyní typové průběhy nárazového magnetizačního proudu při zapnutí transformátoru naprázdno [14]. V prvním případě na Obr.8.a. je průběh připojení v okamžiku kdy napětí fáze  $a$  prochází nulou a to pro model bez uvažování hystereze. V druhém případě na Obr.8.b. je také průběh připojení v okamžiku kdy napětí fáze  $a$  prochází nulou ale pro model s uvažováním hystereze.



Obr.8.a. Simulovaný průběh nárazového magnetizačního proudu při připojení v okamžiku kdy fáze  $a$  prochází nulou.



Obr.8.b. Simulovaný průběh pouze prvních dvou amplitud nárazového magnetizačního proudu při připojení v okamžiku kdy fáze  $\alpha$  prochází nulou a při maximální počáteční remanenci.

Na popsané nárazové proudy musí být pochopitelně nastavena rozdílová ochrana RO transformátoru. Nabíjecí proud může mít hodnoty dvojnásobku jmenovitého proudu  $I_n$  přičemž nastavení ochrany je více než  $0,3 I_n$ , protože v trojfázových transformátorech se vyvíjí 2.harmonická v každé fázi rozdílně. Aby jsme zabránili nežádoucímu vypnutí transformátoru je po dobu zapínání transformátoru na 1 sec rozdílová ochrana blokována a nadproudová ochrana je v této době nastavená na  $2,5 I_n$ .

Praktický důvod pro zkoumání a modelování uvedených dějů je skutečnost, že při zapínání transformátoru (i při dálkovém zapínání z centrálního dispečinku) může 2.harmonická prostřednictvím ochrany nežádoucím způsobem odepnout transformátor – viz odstavec 2.2.1.

#### 4. Modelování a verifikace

Pro účely testování ochran a automatik, je důležité aby přilehlé úseky byly modelované co nejpřesněji, ale ostatní části soustavy mohou být modelované jako ekvivalentní modely. Abychom dostali akceptovatelný dynamický model je potřebné identifikovat a získat ostatní systémové údaje, především údaje o generátorech, které jsou zapojené blízko modelované oblasti [1].

První krok procesu verifikace představuje redukci plnorozsahového modelu vhodného pro plné testování dynamické stability na malou verzi modelu, která bude reprezentovat stejnou konfiguraci chráněného systému jako tradičně používaný model pro testování ochranných relé. Takový model detailně ověří ochrany vedení a vliv jevů (zkratů, vypnutí, atp.) se vzdálenými generátory nahrazenými pouze statickým zdrojem napětí. Tímto způsobem bude potvrzena správnost testování ochran tradičními způsoby, ale zároveň ukáže možnosti lepšího testování ochran a systémových ochranných automatik při použití digitálního simulátoru RTDS.

## 6. Závěr

Předpokládané výsledky a efekty RTDS lze shrnout do následujících bodů:

1. Spolupráce expertů na ochrany a expertů na dynamickou stabilitu s využíváním RTDS přináší významné zlepšení výsledků.
2. Lepší pochopení jevů dynamické stability může pomoci pečlivě studovat tyto jevy.
3. Testování ochran může pomoci zlepšit nastavení ochran a návrh takovýchto ochran v České a Slovenské přenosové soustavě.

Každý simulační program má svoje specifická omezení. V tomto příspěvku bylo cílem v krátkosti ukázat možnosti programu MATLAB-SIMULINK-SimPowerSystem. Pomocí tohoto programu byli vytvořené modely SG a transformátorů. V příspěvku bylo ukázáno, že takové modely jsou vhodné i pro realizaci RTDS.

## Literatura

- [1] Neuman, P.: Dynamické modely vhodné pro simulaci elektrizační soustavy ve stavech blízkých kritickým pro analýzu i trénink dispečerů. Sborník odborného semináře Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizační soustavy, 12.ročník PODĚBRADY 2007.
- [2] Plumptre F. and S. Brettschneider: Validation of Out-of-Step Protection With a Real Time Digital Simulator - RTDS.
- [3] Janiček F., V. Chladný, A. Beláň, Ž. Eleschová: Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave. STU v Bratislavě, 2004.
- [4] Arrillaga J. and C.P. Arnold: Computer Analysis of Power Systems. John Wiley & Sons, Chichester, 1994.
- [5] Hora O., S. Navrátil, a kol.: Regulace elektrických strojů. SNTL Praha, 1976.
- [6] Kubín P., J. Kyncl, Z. Brettschneider: Nonlinear time domain transformer model assessment. 4th International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA 2007, Stará Lesná, Slovak Republic.
- [7] Hrabovcová, V. ; Rafajdus, P.; Hudák, P; Franko, M: Meranie a modelovanie elektrických strojov, EDIS – Žilinská univerzita v Žiline, ISBN 80-8070-229-2, Žilina, 2004.
- [8] Bašta J., J. Chládek, I. Mayer: Teorie elektrických strojů. SNTL Praha, 1968.
- [9] Mekic F., et al: Power Transformer Characteristics and Their Effect on Protective Relays. 33rd Western Protective Relay Conference, October 17-19, 2006.
- [10] Mayer D.: Elektrodynamika v energetice. BEN, Praha 2005.
- [11] Phadke A.G. and J.S. Thorp: Computer Relaying for Power Systems. John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [12] Haňka L.: Rozbory vybraných poruch v energetické soustavě v uplynulém období. Seminář pro pracovníky v oboru ochran - středisko SOLA FIDE, Janské Lázně, 2007.
- [13] Mühlbacher J., K. Noháč: Vliv sycení magnetického obvodu třífázového transformátoru na nárazové magnetizační proudy bez uvažování hystereze. Energetika, ročník 54, č. 10, 2004.
- [14] Mühlbacher J.: Vliv sycení magnetického obvodu třífázového transformátoru na nárazové magnetizační proudy s uvažováním hystereze. Energetika, ročník 54, č. 12, 2004.