

# Petriho sítě při vyhodnocování produkční pohotovosti multi-stavových systémů

Monika Kochaničková, Radim Briš

**Cílem článku je demonstrovat společné použití Petriho sítí a simulace Monte Carlo při vyhodnocování produkční pohotovosti multi-stavových systémů s provozními smyčkami na příkladě z oblasti ropného průmyslu. Modelový příklad zahrnuje velké množství problémů, s nimiž se lze setkat při pravděpodobnostních analýzách vztahujících se k výrobním procesům. Petriho sítě poskytují nezbytnou flexibilitu pro popis komplexního výrobního zařízení a reálných aspektů chování systému, jako je degradace komponent, zálohování komponent, korektní a preventivní údržba, limitovaný počet opravářských týmů a prioritizace oprav.**

## Úvod

V mnoha průmyslových odvětvích roste potřeba využívání reálnějších modelů při vyhodnocování spolehlivosti a produkční pohotovosti multi-stavových a multi-výstupních zařízení [5]. Zvyšující se složitost výrobních zařízení, strategie jejich údržby a rekonfigurace v podstatě znemožňuje použití analytických modelů. V omezené míře lze využít Markovský model, ale jen pro poměrně malé systémy. Zbývá tedy nasadit simulační metody. Simulace využívající metodu Monte Carlo poskytuje dobré výsledky, ale může být mimořádně časově náročná, pokud požadujeme spolehlivé a přesné výsledky.

V posledních letech se při modelování složitých dynamických systémů stále více využívají modely založené na teorii Petriho sítí [1], jejichž základy byly vytvořeny v 60. letech minulého století. V současné době existuje celá řada typů Petriho sítí (Petri Nets), které nacházejí své uplatnění při analýze vlastností a chování rozličných systémů v různých oblastech lidské činnosti [3], přes výrobní, telekomunikační a kontrolní systémy, počítačové po workflow management.

Petriho síť je univerzální grafický nástroj pro návrh, modelování a analýzu složitých systémů. Grafická reprezentace modelů je jejich hlavní výhodou. Vytvořené modely jsou srozumitelné i pro člověka, který není obeznán s detaily teorie Petriho sítí. Jedná se vlastně o orientované grafy, kde uzly reprezentují stavy a akce, zatímco hrany popisují, jakým způsobem může systém přejít z jednoho stavu do druhého provedením určité akce. Na rozdíl od jiných nástrojů umožňují explicitní popis jak stavů tak akcí. Je možné implementovat simulátory chování Petriho sítí a formulovat metody formální analýzy. Petriho síť (PN) nabízí možnost hierarchického popisu, tzn. možnost konstruovat rozsáhlé PN modely skládáním z menších PN modelů. Při změnách v modelovaném systému není třeba měnit kompletně strukturu PN modelu. Petriho síť nabízí interaktivní simulaci, kde výsledky mohou být prezentovány přímo v PN diagramu. Graf, kterým je Petriho síť popsána, dovoluje poměrně snadné vyjádření jevů, jakými jsou synchronizace, vzájemné vyloučení nebo paralelní výpočty.

V tomto článku se pokusíme na konkrétním příkladě ropného zařízení ukázat možnosti využití Petriho sítí ve spojení se simulační metodou Monte Carlo při vyhodnocování produkční pohotovosti. Zaměříme se

zde na stochastické Petriho síť [4], [6], které umožňují pracovat s časovou a stochastickou informací. V rámci EU projektu SAFERELNET byla vytvořena případová studie [7] spolehlivosti průmyslových procesů z oblasti těžby a zpracování ropy, z jejichž popisných údajů vycházíme. Uváděný modelový příklad [2] zahrnuje velké množství situací a problémů, se kterými se analytici setkávají při analýze spolehlivosti výrobních systémů. Jde v podstatě o multi-stavový a multi-výstupní systém s provozními smyčkami, s komponentami podléhajícími zvláštním režimům údržby, s omezeným počtem opravářských týmů a s nastavenými prioritami oprav.

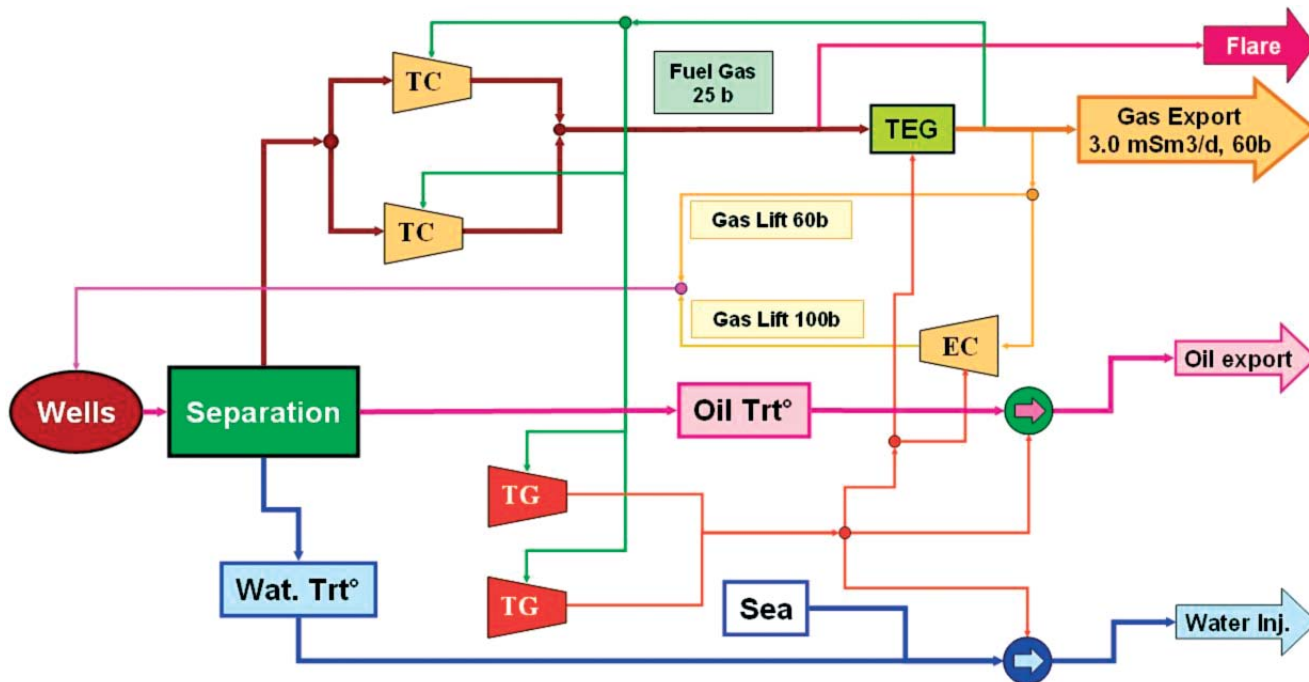
## 1. Popis funkcí systému

Základní funkce modelovaného systému ropného zařízení jsou vidět na obr. 1. Vytěžená ropa přicházející z vrtu se v separační jednotce zbavuje nečistot, vody a plynů. Takto získaná ropa, stejně jako plyn a voda jsou dále zpracovávány. Plyn je na své cestě k výstupu ze systému upravován pomocí dvou turbo-kompresorů a jednotky TEG (Tri-Ethylen Glycol). Ropa je po zpracování (Oil Trt) exportována přes čerpací jednotku. K získané vodě je přimíchána mořská voda a pak je použita k injeckáži.

Většina komponent potřebuje ke své činnosti elektřinu, proto jsou v systému instalovány dva turbo-generátory (TG). Každý z nich produkuje 13 MW. Zde se v systému objevuje první produkční smyčka, protože plyn produkovaný jednotkou TEG je používán, skrz spojení s turbo-generátory, pro výrobu elektřiny využívané jednotkou TEG.

Turbo-kompresory a turbo-generátory jsou poháněny pohonným plynem (Fuel Gas) z výstupu jednotky TEG. Každý z nich spotřebuje  $0,1 \cdot 10^6 \text{ Sm}^3$  za den. Zde se objevuje druhá smyčka systému, protože kompresovaný plyn z turbo-kompresorů je potřebný pro výrobu pohonného plynu a naopak pohonný plyn je nutný pro běh turbo-kompresorů.

Pro vytlačení ropy na povrch se využívá tlaku plynu. Při poklesu tlaku plynu se do ložiska vhání plyn elektro-kompresorem (EC), jde o tzv. „Gas-Lift“. Když je EC v poruše, plyn je brán přímo z výstupu TEG jednotky a injektován s nižším tlakem, což se samozřejmě projeví na produkci.



Obr.1 Schéma produkčního systému se třemi různými výstupy: plyn, ropa a voda

Přechod	Frekvence (1/hodina)			
	TC	TG	EC	TEG
0 → 1	$6,70 \cdot 10^{-4}$	$7,90 \cdot 10^{-4}$	–	–
1 → 2	$2,12 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-3}$	–	–
0 → 2	$7,40 \cdot 10^{-4}$	$7,70 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$5,70 \cdot 10^{-5}$
1 → 0	$3,30 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	–	–
2 → 0	$4,80 \cdot 10^{-2}$	$3,80 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-1}$

Tab.1 Frekvence poruch a oprav komponent

## 2. Poruchy komponent

Pro účely tohoto příkladu se předpokládá, že porucha může nastat jen u komponent TC, TG, EC a TEG. Všechny ostatní komponenty systému jsou považovány za spolehlivé. Turbo-kompresory a stejně i turbogenerátory se mohou nacházet v jednom ze tří stavů: **0** = Jako nový, **1** = Degradovaný, **2** = Porouchaný. Komponenty TEG a EC jsou dvoustavové: **0** = Jako nový, **2** = Porouchaný.

Komponenta je ve stavu „Porouchaný“, když nastane kritická porucha, která se projeví okamžitou ztrátou funkčnosti komponenty. Stav „Degradovaný“ je takový, kdy komponenta stále ještě pracuje, ale je větší pravděpodobnost, že přejde do stavu „Porouchaný“. V modelu se pro zjednodušení předpokládá exponenciální rozdělení trvání přechodů degradací a poruch komponent. Hodnoty frekvencí poruch a oprav jsou uvedeny v tab. 1.

## 3. Konfigurace produkce

V případě, že nastane porucha, systém je rekonfigurován, aby se minimalizoval dopad, za prvé na export produkce ropy, a za druhé na export produkce plynu.

**TEG porucha.** Když je jednotka TEG vyřazena z činnosti, produkce plynu je ztracena („Export Gas“, „Gas-Lift“, „Fuel Gas“). Z toho důvodu se zastaví oba TG. Dojde k zastavení celého provozu systému, protože nelze používat plyn, který neprošel TEG zpracováním.

**EC porucha.** Porouchá-li se EC, „Gas-Lift“ tlak klesne, tudíž klesne i těžba z vlastního vrtu. Nakonec se sníží „Export Oil“ a „Export Gas“.

**TC porucha.** Pokud se porouchá jeden TC, „Export Oil“, „Water Injection“, „Fuel Gas“ a „Gas-Lift“ jsou zachovány. Oba TG běží. Nekompresovaná část plynu hoří. Jsou-li oba TC v poruše, veškerá produkce (ropa, plyn, voda) se zastaví.

TG porucha. Když se poškodí jeden TG, „Export Oil“, „Export Gas“, „Fuel Gas“ a „Gas-Lift“ jsou zachovány. Oba TC běží. Elektro-kompresor a „Water Injection“ jsou zastaveny díky nižší úrovni produkce elektřiny. V důsledku této situace „Export Oil“ a „Export Gas“ klesá. Porouchají-li se oba TG, veškerá produkce je zastavena, protože jednotka TEG nemůže být poháněna elektřinou.

## 4. Strategie údržby

### 4.1 Korektivní údržba

Pro opravy komponent je k dispozici pouze jeden tým opravářů. V jednom časovém okamžiku může být opravována vždy jen jedna komponenta systému. Pokud ve stejném čase čeká více porouchaných komponent na opravu, pak jsou opravovány podle toho, do které prioritní úrovně spadají. Priorita oprav každé komponenty systému je závislá na stavu systému. Priorita oprav komponent pro základní model systému je definována v tab. 2.

Priorita	Komponenta	Podmínky systému
1	TEG	–
1	TG	druhý TG je v poruše
1	TC	druhý TC je v poruše
2	EC	–
2	TC	druhý TC není v poruše
3	TG	druhý TG není v poruše

Tab.2 Priorita oprav komponent pro základní model

Nejvyšší priorita (priorita 1) se týká poruch, vedoucích okamžitě k úplné ztrátě produkce (porucha TEG, obou TG nebo obou TC). Střední priorita (priorita 2) je používána v případě, když část exportu ropy je ztracena (porucha EC nebo jednoho TC). Nejnižší priorita (priorita 3) je aplikována na poruchy, kde nedochází ke ztrátě exportu ropy (porucha jednoho TG).

### 4.2 Preventivní údržba

Pravidelné preventivní údržbě podléhají obě komponenty TG, TC a komponenta EC. Předpokládá se, že preventivní údržbu vykonává jiný tým než tým korektivní údržby. Za účelem udržení co nejvyšší úrovně produkce, je preventivní údržba dané komponenty započata pouze, je-li systém v perfektním stavu, tzn. žádné zařízení není právě v poruše, žádné není opravováno nebo na něm není prováděna preventivní údržba.



Typ údržby	Komponenta	Perioda (hodin)	Průměrná doba údržby (hodin)
1	TC, TG	2160	4
2	EC	2666	113
3	TC, TG	8760	120
4	TC, TG	43800	672

Tab.3 Strategie preventivní údržby

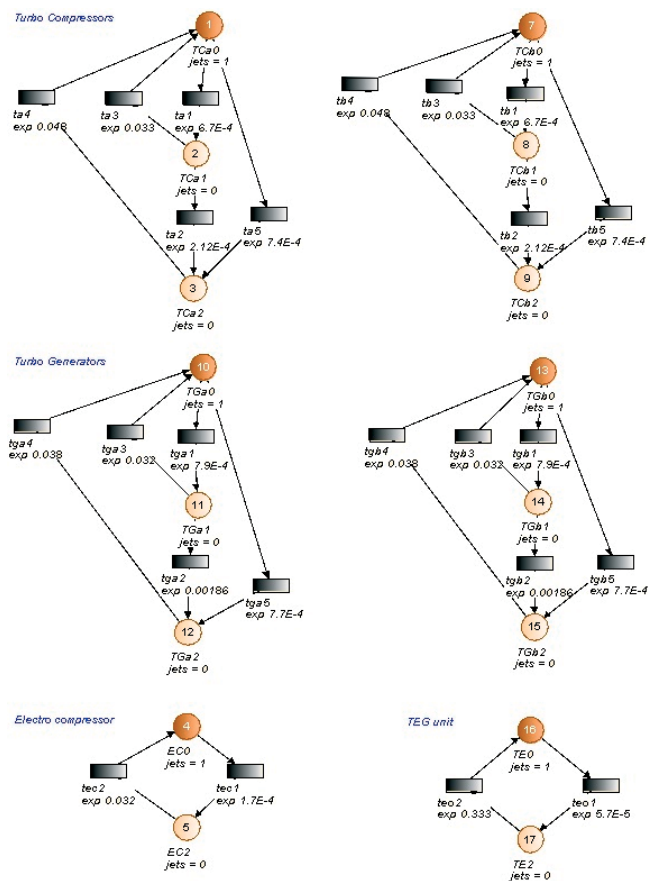
Samozřejmě dojde-li k poruše některé z komponent v době, kdy již probíhá preventivní údržba jiné komponenty, tato preventivní údržba pokračuje dál a je nastartována korektivní údržba (oprava) podle priorit oprav pro komponentu, která je v poruše.

Celkem jsou prováděny 4 odlišné typy preventivní údržby. Každý z nich je charakterizován jinou frekvencí a dobou trvání údržby, jak je možno vidět v tab. 3.

### 5. Model Petriho sítě

Pro tento složitý systém je analytický přístup těžko aplikovatelný. Počet možných konfigurací systému je velmi vysoký. Model systému se skládá z několika menších stochastických Petriho sítí (SPN), které reprezentují jednotlivé komponenty systému. SPN model turbo-kompresoru obsahuje tři místa, reprezentující jednotlivé stavy, v nichž se tato komponenta může nacházet. Místo TC0 reprezentuje případ, kdy turbo-kompresor je ve stavu 0 („Jako nový“). Místo TC1 označuje stav 1 („Degradovaný“) a místo TC2 představuje stav 2 („Porouchaný“). Podobně to platí i pro turbo-generátor. Uvažovaný systém obsahuje dva TG a dva TC. V rámci odlišení budou v následujícím textu označovány jako TGA, TGB a TCA, TCB.

Komponenty TEG a EC se mohou nacházet ve dvou stavech, proto jejich SPN modely obsahují dvě místa. Místo s indexem 0 reprezentuje stav „Jako nový“ a místo s indexem 2 označuje stav „Porouchaný“. Aktuální stav komponenty je specifikován pomocí pozice tokenu v jednotlivých SPN modelech. Na obr. 2 je aktuální pozice tokenu vyznačena hodnotou proměnné „jets = 1“.



Obr.2 Základní SPN modely komponent systému

Message	Podmínky provedení přechodu
Me_TEG	=? RA
Me_EC	=? ((RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ (¬(TCa <sub>2</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> ) ∨ ¬(TGA <sub>2</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> ))))
Me_TGa	=? ((RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> ) ∨ (RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ EC <sub>0</sub> ∧ ¬(TCa <sub>2</sub> ∨ TCb <sub>2</sub> )))
Me_TGb	=? ((RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ TGA <sub>2</sub> ) ∨ (RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ EC <sub>0</sub> ∧ ¬(TCa <sub>2</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> )))
Me_TCa	=? ((RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> ) ∨ (RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ EC <sub>0</sub> ∧ ¬(TGA <sub>2</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> )))
Me_TCb	=? ((RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ TCa <sub>2</sub> ) ∨ (RA ∧ TE <sub>0</sub> ∧ EC <sub>0</sub> ∧ ¬(TGA <sub>2</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> )))

Tab.4 Podmínky aktivace procesu opravy jednotlivých komponent

Všechny přechody těchto SPN modelů jsou exponenciální s frekvencemi poruch a oprav, uvedenými v tab. 1.

Uvažovaný systém obsahuje 6 komponent využívajících společný opravářský tým. Priority oprav jsou v SPN modelu formulovány pomocí tzv. „messages“, které je možno použít k definici podmínek pro provedení daného přechodu Petriho sítě. „Messages“ jsou velmi užitečné pro synchronizaci chování podsítí, které pracují samostatně. V tab. 4 jsou definovány tyto podmínky pro přechody reprezentující provádění oprav jednotlivých komponent.

Když je komponenta v porouchaném stavu a čeká na opravu, přechod PN představující opravu komponenty zjistí, zda je daná podmínka splněna. Podmínka „?RA“ je splněna, pokud opravářský tým (repair team) je volný, a je nesplněna, pokud tým je nedostupný. Pro definici podmínek jsou používány klasické logické operátory – negace, logický součin a logický součet.

Analýzou systému bylo zjištěno, že systém produkuje 6 rozdílných kvantit plynu a 3 různá množství ropy a vody. Systém se tedy může nacházet 7 odlišných úrovních produkce. V tab. 5 představuje nultá úroveň plnou produkci a zbývajících 6 úrovní má produkci ropy, plynu či vody vždy určitým způsobem redukovánou.

V SPN modelu bylo potřeba těchto 7 produkčních úrovní definovat pomocí logických podmínek jako 7 stavů systému, na které je nutno se z hlediska analýzy spolehlivostních ukazatelů zaměřit. V tab. 6 jsou uvedeny definice produkčních úrovní pro případ, kdy v systému není prováděna preventivní údržba. Produkční úroveň 0 (plná produkce) je definována jako stav, kdy se žádný token nenachází v místech TCa<sub>2</sub>, TCb<sub>2</sub>, TGA<sub>2</sub>, TGB<sub>2</sub>, EC<sub>2</sub> (všechna tato místa na obr. 2 mají hodnotu proměnné „jets = 0“).

Produkční úroveň	Ropa (m <sup>3</sup> /d)	Plyn (Sm <sup>3</sup> /d)	Voda (m <sup>3</sup> /d)
0	23,300	3,0 · 10 <sup>6</sup>	7000
1	23,300	0,9 · 10 <sup>6</sup>	7000
2	21,200	2,7 · 10 <sup>6</sup>	0
3	21,200	1,0 · 10 <sup>6</sup>	0
4	21,200	2,6 · 10 <sup>6</sup>	6400
5	21,200	0,9 · 10 <sup>6</sup>	6400
6	0	0	0

Tab.5 Produkční úrovně s hodnotami produkované ropy, plynu a vody

Úroveň	Podmínky
0	¬TCa <sub>2</sub> ∧ ¬TCb <sub>2</sub> ∧ ¬TGA <sub>2</sub> ∧ ¬TGB <sub>2</sub> ∧ ¬EC <sub>2</sub> ∧ ¬TE <sub>2</sub>
1	(TCa <sub>2</sub> ∨ TCb <sub>2</sub> ) ∧ ¬TGA <sub>2</sub> ∧ ¬TGB <sub>2</sub> ∧ ¬EC <sub>2</sub> ∧ ¬TE <sub>2</sub>
2	¬TCa <sub>2</sub> ∧ ¬TCb <sub>2</sub> ∧ (TGA <sub>2</sub> ∨ TGB <sub>2</sub> ) ∧ ¬EC <sub>2</sub> ∧ ¬TE <sub>2</sub>
3	((TCa <sub>2</sub> ∧ TGA <sub>2</sub> ) ∨ (TGA <sub>2</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> ) ∨ (TCa <sub>2</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> ) ∨ (TGB <sub>2</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> ))
4	¬TCa <sub>2</sub> ∧ ¬TCb <sub>2</sub> ∧ ¬TGA <sub>2</sub> ∧ ¬TGB <sub>2</sub> ∧ EC <sub>2</sub> ∧ ¬TE <sub>2</sub>
5	((TCa <sub>2</sub> ∨ TCb <sub>2</sub> ) ∧ ¬TGA <sub>2</sub> ∧ ¬TGB <sub>2</sub> ∧ ¬EC <sub>2</sub> ∧ ¬TE <sub>2</sub> )
6	(TCa <sub>2</sub> ∧ TCb <sub>2</sub> ) ∨ (TGA <sub>2</sub> ∧ TGB <sub>2</sub> ) ∨ TE <sub>2</sub>

Tab.6 Definice produkčních úrovní systému

## 6. Rozšíření základního modelu o studenou zálohu TG

Do SPN modelu systému byl přidán třetí turbo-generátor jako studená záloha pro výrobu elektřiny. Selhání zálohy při startu není bráno v úvahu. Třetí TG je nastartován v případě poruchy komponenty TGA (popř. TGB). V okamžiku, kdy je komponenty TGA (popř. TGB) opravena, třetí turbo-generátor se vrátí do pozice studené zálohy (STAND-BY).

Přidáním komponenty studené zálohy bylo potřeba v SPN modelu provést drobné modifikace priorit oprav, modifikace podmínek pro aktivaci opravných přechodů a modifikaci definic produkčních úrovní.

## 7. Numerické výsledky

Pro základní výpočty průměrné pohotovosti byl použit software MOCA-RP, umožňující práci se stochastickými Petriho sítěmi a provádění simulací nad vytvořenými SPN modely. Pro všechny výpočty byl počet Monte Carlo pokusů nastaven na  $10^5$ . Sledované období bylo nastaveno na  $5 \cdot 10^5$  hodin. Výpočty byly prováděny na počítači Pentium4@3.40GHz.

Pro sledování vlivu preventivní údržby a efektu studené zálohy byly brány v úvahu následující 4 modifikace modelu daného systému:

- případ A – systém je provozován bez provádění preventivní údržby,
- případ B – komponenty TG, TC a EC podléhají strategii preventivní údržby podle tab. 3,
- případ C – jako případ A, ale do systému je přidán třetí TG jako studená záloha,
- případ D – komponenty TG, TC a EC podléhají strategii preventivní údržby podle tab. 3 a do systému je přidán třetí TG jako studená záloha.

V tab. 7 je možno vidět očekávané hodnoty produkce ropy, plynu a vody pro všechny sledované případy. Tab. 8 demonstruje dopad preventivní údržby komponent a dopad studené zálohy TG na roční produkci všech tří výstupů systému.

Case	Ropa km <sup>3</sup> /d	Plyn kSm <sup>3</sup> /d	Voda m <sup>3</sup> /d
A	23,19	2921,35	6693,60
B	23,15	2891,74	6626,86
C	23,28	2934,29	6990,27
D	23,06	2880,70	6921,94

Tab.7 Očekávané hodnoty produkce ropy, plynu a vody

### 7.1 Případ A – systém bez preventivní údržby

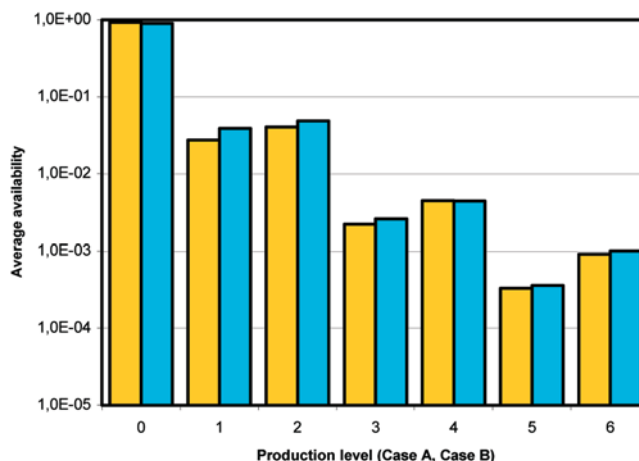
Základní model systému je označen jako případ A. Zahrnuje korektivní údržbu podle pravidel stanovených v kapitole 4.1 a nezahrnuje preventivní údržbu. Výpočetní čas byl 2 minuty. Ze získaných výsledků je patrné, že systém se z 92,4 % nacházel v úrovni plné produkce (úroveň 0).

### 7.2 Případ B – systém s preventivní údržbou

V případě B vzrostl výpočetní čas na 35 minut. Systém se z 90,3 % nachází v úrovni plné produkce. Porovnání numerických výsledků střední pohotovosti všech 7 produkčních úrovní pro případy A a B je možno vidět na obr. 3. Je vidět, jak střední pohotovost vzroste, je-li na vybrané komponenty aplikována preventivní údržba. Na druhé straně, tabulka 8 ukazuje, že preventivní údržba nepatrně snižuje produkci.

Case	Ropa 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Plyn 10 <sup>6</sup> Sm <sup>3</sup>	Voda 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
A	8,463	1066,292	2,443
B	8,449	1055,486	2,419
C	8,499	1071,016	2,551
D	8,416	1051,456	2,526

Tab.8 Porovnání hodnot roční očekávané produkce



Obr.3 Porovnání hodnot střední pohotovosti na různých produkčních úrovních pro případ A a případ B

### 7.3 Případ C – systém bez preventivní údržby a se studenou zálohou

Výpočetní čas byl 40 minut. Podle získaných výsledků se systém se z 96,4 % nacházel v úrovni plné produkce. Vliv studené zálohy TG je patrný v tabulce 8. Přítomnost studené zálohy zvyšuje výslednou produkci.

### 7.4 Případ D – systém s preventivní údržbou a se studenou zálohou

Výpočetní čas vzrostl na téměř 1,5 hodiny. Systém se na 94,3 % nachází ve stavu plné produkce (úroveň 0). Efekt preventivní údržby je obdobný jako v případě B. Záloha TG snižuje pravděpodobnost, že se systém bude nacházet v produkční úrovni 6 (veškerá produkce je zastavena).

## Závěr

Použití stochastických Petriho sítí ve spojení s Monte Carlo simulací se ukázalo být velmi užitečné, protože jejich prostřednictvím lze efektivně modelovat dynamické chování složitých systémů s pomocí jen několika málo grafických prvků. Modely Petriho sítí jsou velmi flexibilní a lze najít způsob, jak modelovat téměř každé další omezení systému. Velikost modelu roste lineárně s počtem komponent, čímž se vyhneme kombinatorické stavové explozi objevující se v Markovském přístupu. Grafický vzhled umožňuje využít uživatelsky přívětivé mechanismy krokování simulace, nepostradatelné pro efektivní vyhledání chyb v návrhu modelu. Jednou z dalších výhod je fakt, že umožňují integraci různých deterministických a stochastických procesů. Dovolují brát v úvahu rozličné reálné aspekty jako strukturální závislosti mezi komponentami a podsystémy se společnými módy nebo sdílenými zdroji.

Výzkum zde uvedený je podporován Akademií věd České republiky v rámci projektu „Modelování a kvantifikace spolehlivosti dynamických systémů“ (T401940412).

## Literatura

- [1] BERNARDI, S., BOBBIO, A., DONATELLI, S.: Petri nets and dependability. In: Lectures on Concurrency and Petri Nets, Reisig W. and Rozenberg G., Springer Verlag 2004; LNCS, Vol 3098: 125-179.
- [2] BRIŠ, R., KOCHANÍČKOVÁ, M.: Stochastic Petri net approach to production availability evaluation of special test case. In: Soares CG & Zio E, editors. Safety and Reliability for Managing Risk. Vol.2: Taylor & Francis Group London 2006. p.1569-1575.
- [3] GIRAULT, C., VALK, R.: Petri Nets for Systems Engineering. Springer-Verlag; 2001.

[4] HAAS, P. J.: Stochastic Petri Nets. Modelling, Stability, Simulation. Springer-Verlag; 2002.

[5] LISNIANSKI, A., LEVITIN, G.: Multi-State system reliability. Assessment, Optimization, Applications. World Scientific, 2003.

[6] MARSAN, M.A., BALBO, G., CONTE, G., DONATELLI, S., FRANCESCINIS, G.: Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets. John Wiley & Sons; 1995.

[7] SIGNORET, J. P.: SAFERELNET – Production Availability Test Case Version 1, Document of TOTAL – DGEP/TDO/EXP/SRF 04-013; 2000.

### **Ing. Monika Kochaníčková**

71

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká Fakulta  
Katedra informatiky  
Tomkova 40, 779 00 Olomouc, ČR  
e-mail: monika.kochaniczkova@upol.cz

### **Doc. Ing. Radim Briš, CSc.**

VŠB Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra aplikované matematiky  
17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba, ČR  
e-mail: radim.bris@vsb.cz