

Petr KONEČNÝ¹, Pavel MAREK²

APLIKACE METODY SBRA V RÁMCI UNIVERZÁLNÍHO MKP SOFTWARE

ÚVOD

Dlouhodobý vývoj pravděpodobnostních posudků spolehlivosti s využitím simulačních nástrojů se nyní nachází v období přechodu od analýzy prvků a dílců k modelování systémů (viz. např. MAREK a KONEČNÝ, 2006). Modelování systémů vede ke stále častějšímu užití stochastického MKP. S jeho využitím se také vynořují nové problémy. Mezi jinými je to problematika vhodné definice funkce spolehlivosti, nebo-li: „Vede porucha v jednom elementu k poruše celého systému?“. Jaké je tolerovatelné poškození apod. Další oblastí je připravenost dostupných komerčních MKP k aplikaci přímé metody Monte Carlo s řádově miliony simulačních cyklů. Samostatnou otázkou k diskuzi stále zůstává také zavedení vnějšího zatížení (osamělých břemen) do konstrukce. I přes tyto otázky a problémy je vhodné aplikace stochastického MKP rozvíjet, k čemuž se snaží přispět i tento příspěvek.

MOTIVACE

Na Pennsylvania State University vyvstala potřeba modelovat stochastický problém difuze chloridů ŽB mostovkou (KONEČNÝ et al., 2006) s ohledem na stochastickou interakci vlivu trhliny a poruchy ochranného epoxidového povlaku ocelové výztuže s ohledem na vznik koroze. Náročnost úlohy vedla k hledání vhodného nástroje umožňujícího stochastickou analýzu metodou SBRA (MAREK et al., 1995) při užití MKP transformačního modelu.

MKP A SBRA

Kombinace MKP modelu a pravděpodobnostního přístupu k posudku spolehlivosti SBRA (MAREK et al., 1995, 2003) je úkol poměrně náročný. Jako slibné cesty se jeví tři varianty umožňující aplikovat dostupný MKP systém v rámci metodiky SBRA. První variantou je vygenerovat náhodně proměnné externím programem a jejich užití v rámci smyčky univerzálního MKP programu doporučený v (KRÁLIK a VARGA, 2004, 2005 či MICKA, 2005, ŠEDIVÝ a BROŽOVSKÝ, 2006). Dalšími variantami je užití simulačního nástroje P. Praxe v kombinaci s MKP nástrojem CALFEM (PRAKS, 2006), či doprogramování SBRA modulu do programového balíku ANSYS. První varianta (program na generování náhodně proměnných kombinovaný s ANSYSem) je rovněž vyvíjen (GUŠTAR a MAREK, 2006), ale k jeho aplikaci nebylo v předmětném případě přistoupeno vzhledem k nutnosti pracovat s dvěma různými programovými balíky. S dalších variant byla zvolena kombinace pravděpodobnostního modulu PDS (ANSYS, 2005) doplněného o SBRA modul, a to vzhledem ke své univerzalitě.

Mimo rámec příspěvku je širší diskuze na téma spolehlivostní software (viz. např. KŘIVÝ et al., 2006) jako např. naprogramování samostatného programového vybavení pro spolehlivostní analýzu určitého typu problému (KALA, 2003 nebo KŘIVÝ, 2005, KŘIVÝ a MAREK, 2006 – program MDC 1.0), nebo tvorbu obecného spolehlivostního software, umožňujícího načítat program ve formě externí knihovny, jako je tomu v případě programu FREET (NOVÁK et al., 2002), který

¹ Ing., VŠB – TU Ostrava, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, L. Podéště 1875, 708 33 Ostrava-Poruba, (+420) 59 732 1384, petr.konecny@vsb.cz;

² Prof., Ing., DrSc., Č IA ČR, ÚTAM AV ČR, Č IA ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9 a VŠB-TU Ostrava, FAST, ul. L. Podéště 1875, 70833 Ostrava-Poruba, marekp@itam.cas.cz

ovšem není vybaven pro aplikaci useknutých histogramů, nebo nově programu MONTE (viz. MATERNA et. al., 2006).

SBRA MODUL

SBRA modul obohacuje univerzální MKP programový balík ANSYS umožňující stochastické řešení komplikovaných inženýrských úloh o nástroj dovolující charakterizovat náhodně proměnné za pomoci useknutých histogramů dle (MAREK et al., 1995). Tento modul je naprogramovaný v prostředí skriptovacího jazyka APDL (ANSYS, 2005) a řídí generování náhodně proměnných pro úlohy zapsané ve formě APDL makra s využitím ANSYS PDS systému (ANSYS, 2005).

Struktura

Aplikace SBRA modulu je provedena jako mezikrok spojující Pravděpodobnostní modul PDS programového balíku ANSYS a MKP makro vytvořené uživatelem (viz. Obr).

ANSYS umožňuje provádět stochastickou analýzu MKP úloh, přičemž náhodně proměnné umožňuje charakterizovat parametrickými rozděleními, umožňuje rovněž řídit Monte Carlo simulaci včetně vyhodnocení výsledků simulace – postprocesingu. Mezi parametrická rozdělení patří i rovnoměrné, které je možno využít jako generátor náhodných čísel pro SBRA modul.

SBRA modul pak umožňuje generovat náhodně proměnné popsané useknutými histogramy na základě náhodně proměnné o rovnoměrném rozdělení z PDS a funkcí pro jejich generování dle parametrů shodných se vstupy pro program Anthill (viz. www.sbra-anthill.com) předat tyto makru, řešícím MKP úlohu. Základ SBRA modulu je naprogramován dle algoritmů Praxe P. (2002).

MKP ANALÝZA S VYUŽITÍM SBRA MODULU

Tvorba MKP makra

Prvním krokem je vytvoření vhodného konečně prvkového modelu odpovídajícího řešené úloze (viz. MKP makro na Obr. 1)., a to např. s využitím uživatelského rozhraní (GUI – Graphic User Interface) programu ANSYS. Každá operace je programem interpretována do formy příkazů pro jádro programu. Tyto příkazy se ukládají do tzv. „log“ souboru (viz. dále).

Model sestává zejména z:

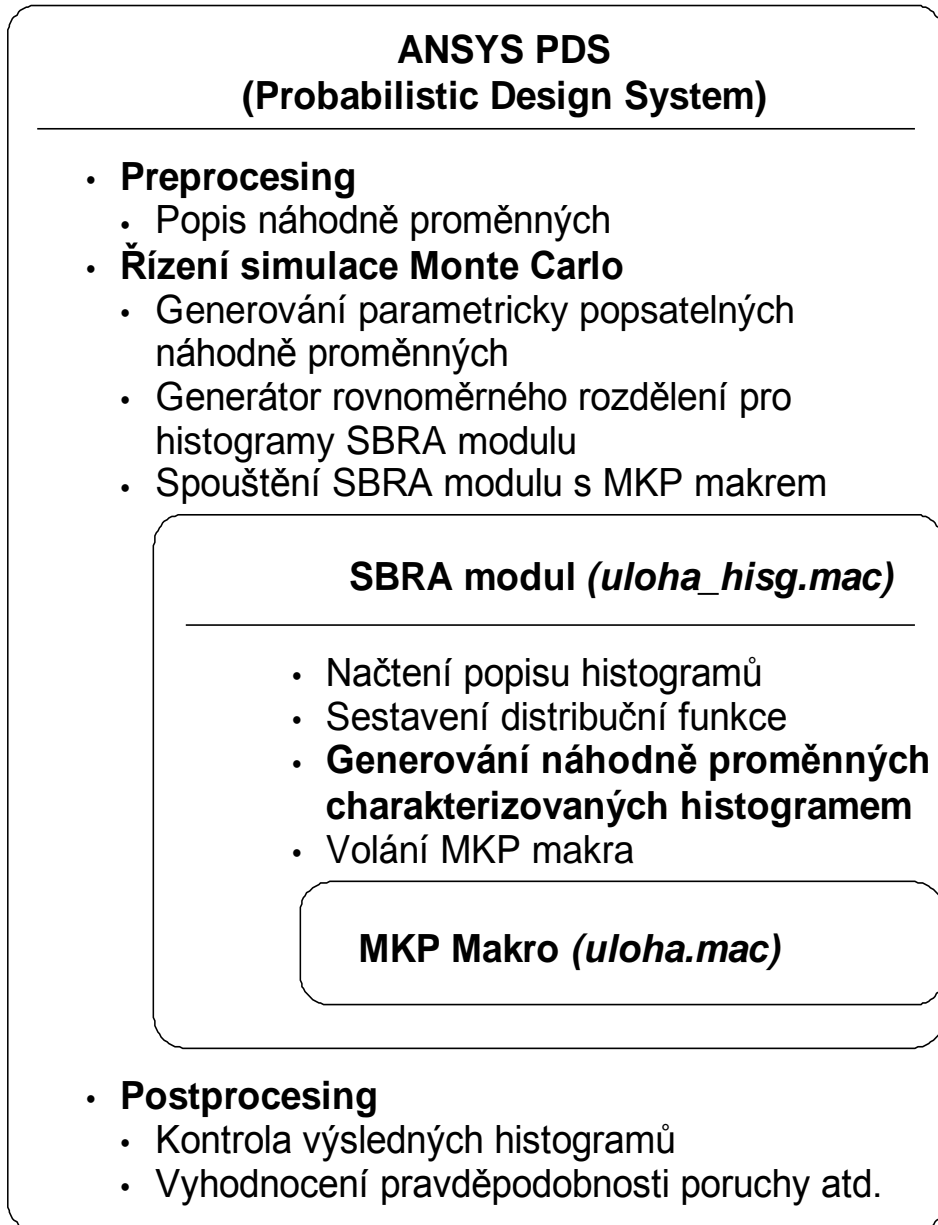
- definice prvku a jeho vlastností,
- vykreslení geometrie,
- tvorby prvků modelu (elements)
- zavedení okrajových podmínek (podepření, zatížení),
- výběru typu analýzy,
- řešení,
- přiřazení výsledků do vhodných parametrů, např funkce spolehlivosti *SF*.

S využitím příkazů zapsaných v „log“ souboru je možno sestavit vhodné makro, které umožní automatizaci úlohy v rámci programu ANSYS. Makro je samozřejmě možno sestavit, při dostatečné znalosti příkazů ANSYSu, i bez využití GUI přímo v textovém editoru, neboť se jedná o běžný textový soubor s příponou „mac“. MKP model tedy můžeme nazvat *uloha.mac*.

Aby bylo možno úlohu využít k pravděpodobnostnímu posudku spolehlivosti je nutné deterministické hodnoty v makru nahradit proměnnými, zvanými v ANSYSu parametry. Tyto parametry je vhodné nadefinovat na počátku makra.

Úprava SBRA modulu

Náhodně proměnné charakterizované useknutými histogramy aplikovatelné v MKP makru je nutno nadefinovat s využitím nadřazeného makra nazvaného např. *uloha_hisg.mac*, které představuje spolu s knihovnou užitých maker (*pdshisg,mlib*) vlastní SBRA modul.



Obr.1 SBRA modul v rámci stochastického modulu MKP programu ANSYS

Náhodně proměnná je popsána textovým řetězcem následovně:

```
input='nazev_promenne,nominal_hodnota,histogram,soubor.DIS' $ *use,inputvar
```

kde jsou:

input dočasná proměnná popisující parametry histogramu,

nazev_promenne představuje název náhodně proměnné veličiny,
nominal_hodnota reprezentuje nominální hodnotu náhodně proměnné veličiny,
histogram identifikuje proměnnou typu histogram,
soubor.DIS název aplikovaného histogramu.
*use,inputvar ukládá parametry náhodně proměnné do paměti.

Tento řetězec ukládaný dočasně do proměnné *input* nesmí být delší 32 znaků a musí za ním následovat volání funkce **use,inputvar*.

Po načtení charakteristik histogramu následuje voláním funkce *creahis* tvorba distribuční funkce:

```
*use,creahis,'nazev_promenne'
```

Funkce *creasam* následně z distribuční funkce vybírá s využitím generátoru náhodných čísel (rovnoměrného rozdělení) realizaci náhodně proměnné:

```
*use,creasam,'nazev_promenne'
```

SBRA modul ještě obsahuje příkaz pro volání MKP makra:

```
uloha_hisg,1,arg1,arg2,...,ar17
```

V APDL může být makro spuštěno až se 17 argumenty *arg1 - ar17*.

Aplikace stochastického modulu ANSYS PDS

Takto připravený model je možno přímo využít v pravděpodobnostním modulu programu ANSYS, přiřadit jednotlivým parametrům vhodné rozdělení pravděpodobnosti, zvolit výstupní proměnné a provést simulaci přímou metodou Monte Carlo. Spuštění simulace už může být ovládáno přímo z uživatelského rozhraní ANSYSu.

V příkazové řádce se příkazem *uloha_hisg* spustí řešená úloha. Dojde k aktivaci nadefinovaných parametrů úlohy. V nabídce ANSYSu se vybere volba *Prob Design*, provede se přiřazení MKP makra *uloha_hisg*. Nyní je možno nadefinovat Náhodně proměnné vstupy, což budou při aplikaci histogramů rovnoměrné rozdělení sloužící jako generátor pro výběr z příslušné distribuční funkce, lze užít jak nabídky *Probabilistic definitions – Random Input*, tak příkaz:

```
PDVAR,nazev_promenne_RND,UNIF,0,1,0,0
```

Následně je třeba nastavit vyhodnocované parametry. Tedy v první řadě funkci spolehlivosti *SF*, a to v nabídce *Probabilistic definitions – Random Output* nebo příkazem:

```
PDVAR,SF,RESP
```

Jako vyhodnocované parametry je rovněž vhodné uvést proměnné definované v SBRA modulu *uloha_hisg*, (vstupní proměnné popsané histogramem) takže je vhodné ještě zapsat příkaz:

```
PDVAR,nazev_promenne,RESP
```

Korelaci mezi proměnné charakterizované histogramy je možno zavést dle (PHOON ET AL., 2004) korelováním jejich příslušných generátorů rovnoměrného rozdělení *nazev_promenne_RND* s využitím nabídky *Probabilistic definitions – Correlation*.

Nyní je možno přejít k vlastní simulaci Monte carlo. V nabídce *Prob Method – Monte Carlo Sims* je nutno vybrat *Latin Hypercube Sampling*, neboť nabídka *Direct Monte Carlo* není ve verzi ANSYS 10.0 dostupná. Pro simulaci dle histogram je aplikace LHS v principu stejná, neboť ANSYS PDS je využíván jen pro generování rovnoměrného rozdělení. Dále se stanoví počet simulací. Je rovněž možno aplikovat příkazy:

PDMETH,nazev_simulace,LHS

PDLHS,n_sim_,1,RAND, 'ALL ', , , ,CONT

kde *nazev_simulace* reprezentuje název databáze do které se budou ukládat výsledky simulace a *n_sim* je zmiňovaný počet simulací. Úlohu je pak již možno spustit v nabídce *Run – Exec serial – Run serial*, nebo taky příkazem:

PDEXE,nazev_simulace,SER,0.

Po proběhnutí simulace Monte Carlo je pak možno přejít k postprocesingu. V nabídce *Probabilistic Results – Statistics* je možno sledovat histogramy, křivky trvání zatížení (kumulativní distribuční funkci), pravděpodobnosti a odhady kvantilů. V části *Probabilistic Results – Trends* je možno sledovat korelace jednotlivých parametrů, či zobrazit 2D závislost mezi náhodně proměnnými zvanými v metodě SBRA „mravenišť“.

ZÁVĚR

Analýzu spolehlivosti s využitím transformačního modelu představovaného obecným MKP software v rámci rámce metody SBRA je možno řešit s využitím výše popsaného modulu pro ANSYS. Jedná se o další z kroků přibližujících aplikaci pravděpodobnostní přístupy na stále širší okruh problémů inženýrské spolehlivosti. Vývoj postupuje od počátečních krůčků (MAREK, P. et al. 1995), přes rozsáhlé příklady aplikací (MAREK, P. et al. 2003), po dnešní aplikaci stochastické analýzy MKP v rámci SBRA, kde vývoj rovněž navazuje na práce (KRÁLÍK a VARGA, 2004, 2005, MICKA, 2005, PRAKS, 2006, KONEČNÝ, 2005).

Navržený přístup v sobě skýtá výhodu aplikace pravděpodobnostního posudku metodou SBRA s využitím obecného MKP řešiče v rámci jednoho software, který umožňuje přípravu náhodně proměnných, simulaci Monte Carlo, i vyhodnocení pravděpodobnosti poruchy včetně citlivostní studie a grafických výstupů. Aplikace programovacího jazyka pod obecným MKP v sobě však skrývá cenu řádově vyšší výpočetní náročnosti než postup navrhovaný např. v (MATERNA et al., 2006, PRAKS, 2006).

Modul byl úspěšně otestován na příkladě 2D difuze chloridů ŽB mostovkou (viz. KONEČNÝ, et. al, 2006), což je úloha o cca. tisících stupních volnosti, kdy pravděpodobnosti iniciace koroze vychází v procentech. Na posudky bezpečnosti je potřeba řádově nižší pravděpodobnost poruchy, a tedy mnohem více simulačního času. Jako vhodná se jeví aplikace sofistikovanější simulační metody, jako Importance Sampling, nebo LHS.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl vypracován v rámci grantového projektu GAČR 103/04/1451, který je zaměřený na rozvoj a aplikaci pravděpodobnostní metody SBRA pro posuzování spolehlivosti konstrukcí. Zvláštní dík náleží panu profesoru Paul J. Tikalsky, neboť zárodky SBRA modulu vznikaly během stáže P. Konečného na Pennsylvania State University.

LITERATURA

- [1] MAREK, P., KONEČNÝ, P. (eds.) (2006) Sborník referátů VII. ročníku celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, téma: Od pravděpodobnostního posudku spolehlivosti prvků a dílců stavebních konstrukcí k pravděpodobnostnímu posudku systémů. 5. 4. 2006, Praha, DT Ostrava, pp. 5–8, ISBN 80-02-01770-6.
- [2] KONEČNÝ, P., TIKALSKY, P., TEPKE, D. (2006): Výpočet koncentrace chloridů v ŽB mostovce s využitím MKP a přístupu SBRA. In MAREK, P., KONEČNÝ, P. (ed.) Sborník referátů VII. ročníku celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, 5. 4. 2006, Praha, DT Ostrava, pp. 147–156, ISBN 80-02-01770-6.
- [3] MAREK, P., GUŠTAR, M., ANAGNOS, T. (1995): *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1995, ISBN 0-8493-8286-6.

- [4] Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo Simulation. Basics, Exercises, Software. MAREK P., BROZZETTI J., GUŠTAR M., TIKALSKY P., Editors. (2003): Second extended edition. ITAM - Academy of Sciences of Czech Republic, Prosecká 76, 190 00 Prague 9, Czech Republic. ISBN 80-86246-19-1.
- [5] GUŠTAR, M., MAREK, P. (2006). Výpočet pravděpodobnosti poruchy systémů s využitím simulačních metod a metody Monte Carlo. In MAREK, P., KONEČNÝ, P. (ed.) Sborník referátů VII. ročníku celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, 5. 4. 2006, Praha, DT Ostrava, pp. 43–50, ISBN 80-02-01770-6.
- [6] KRÁLIK, J., VARGA, T. (2004): Pravděpodobnostná analýza združeného rámu ocelového rámu za požiaru. Sborník referátů V. Ročníku celostátní akce se zahraniční účastí „Spolehlivost konstrukcí“, DT Ostrava, 24. 3. 2005. ISBN 80-248-0573-1.
- [7] KRÁLIK, J., VARGA, T. (2005): Pravděpodobnostná a deterministická analýza požiarnej odolnosti združeného ocelového rámu v systéme Anhill a ANSYS. Sborník referátů VI. Ročníku celostátní akce se zahraniční účastí „Spolehlivost konstrukcí“, DT Ostrava, 6. 4. 2005. ISBN 80-02-01708-0.
- [8] Programový systém ANSYS (2005), ANSYS Inc. Theory, Release 10.1, SAS IP.
- [9] PRAKS, P. (2006): Analýza spolehlivosti s iteračními řešiči, disertační práce Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB – TU Ostrava.
- [10] PRAKS, P. (2002). Numerical aspects of Simulation Based Reliability Assessment of Systems. Proceedings: International Colloquium Euro-SiBRAM'2002. Volume II. Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague, June 2002. ISBN 80-86246-17-5. (in English).
- [11] MICKA, M. (2005): Pravděpodobnostní výpočet konstrukce s programy ANSYS a Anhill, Výzkumný záměr AV0Z 20710524, ÚTAM AV ČR Praha.
- [12] KONEČNÝ, P. (2005): Využití metody konečných prvků při posudku spolehlivosti metodou SBRA, Teze disertační práce, Fakulta stavební VŠB – TU Ostrava.
- [13] KALA, Z. (2003): Chapter 24.3 Reliability Assessment of an Unbraced Frame with Leaning Columns using Stochastic Finite Element Method, in MAREK P., BROZZETTI J., GUŠTAR M., TIKALSKY P., Editors. (2003).
- [14] KŘIVÝ, V. (2005): Výpočetní program MCD 1.0. pro pravděpodobnostní posouzení spolehlivosti rámu metodou SBRA. Katedra konstrukcí FAST VŠB TU Ostrava.
- [15] KŘIVÝ, V., MAREK, P. (2006): Pravděpodobnostní stabilitní posudek ocelového rámu s polotuhými spoji metodou SBRA, in Konstrukce, září-říjen, 5/2006, pp. 10-12.
- [16] ŠEDIVÝ, M. a BROŽOVSKÝ, J. (2006) Výpočet prostorové příhradové konstrukce s využitím MKP a metody SBRA, In MAREK, P., KONEČNÝ, P. (ed.) Sborník referátů VII. ročníku celostátní konference se zahraniční účastí Spolehlivost konstrukcí, 5. 4. 2006, Praha, DT Ostrava, pp. 147–156, ISBN 80-02-01770-6.
- [17] KŘIVÝ V., VÁCLAVEK, L., MAREK, P., VALIHRACH, J. (2006): Probabilistic Reliability Assessment of Structural Systems in the Computer Era, Eight International Conference on Computational Structures Technology, Las Palmas, Španělsko.
- [18] PHOON, K., K., QUEK, S., T., HUANG, H. (2004): Simulation of non-Gaussian Processes using fractile correlation, in Probabilistic Engineering Mechanics, vol 19, p. 287-292, 2004
- [19] MATERNA, A., BROŽOVSKÝ, J., KONEČNÝ, P. (2006): Příspěvek k analýze stavebních konstrukcí s uvažováním náhodného charakteru vybraných vstupních veličin, in Sborník vědeckých prací FAST VŠB-TU Ostrava.

Reviewer: Ing. Milan Guštar, Ph.D.