

# HODNOCENÍ ŽIVOTNOSTI ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ V ELEKTRÁRNÁCH

## ASSESSMENT OF COMPONENTS SERVICE LIFE IN POWER INDUSTRY

Milan Holický

České vysoké učení technické v Praze, Kloknerův ústav

### Abstrakt

Uvedené operativní postupy hodnocení životnosti energetických zařízení navazují na nový evropský dokument pro hodnocení existujících konstrukcí, který vychází z mezinárodní normy ISO, na evropské předpisy CEN i na další mezinárodní dokumenty. Příspěvek zahrnuje pokyny pro hodnocení životnosti všech druhů zařízení vystavené libovolnému zatížení a příklady stanovení zbytkové životnosti zařízení v elektrárnách.

### Abstract

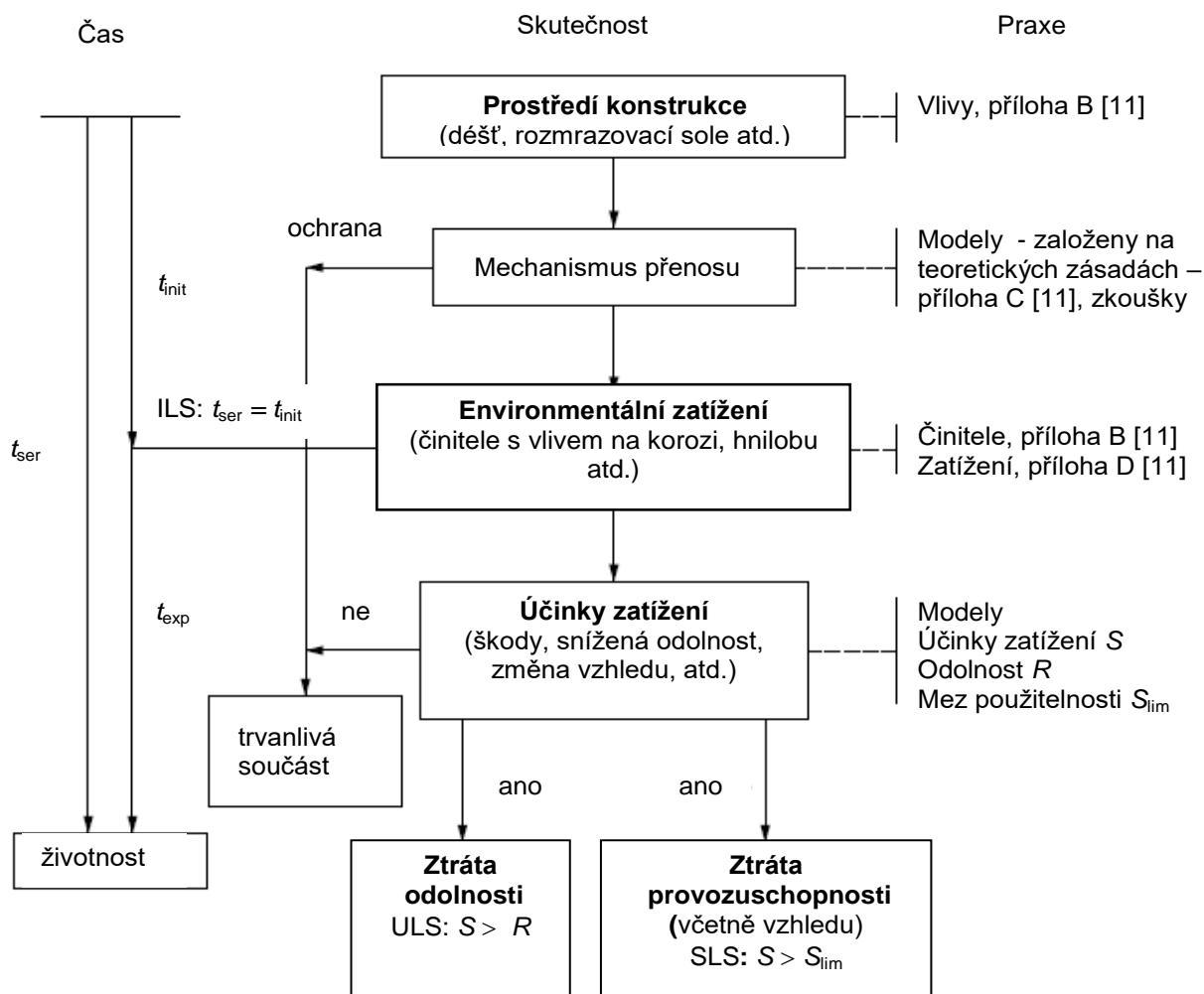
Presented operational rules for assessment of components service life are closely linked to International Standards ISO, to new European document CEN on assessment of existing structures and to further international documents. The contribution covers instructions for assessment of all kinds of components exposed to arbitrary actions and examples of assessing remaining working life of components in power industry.

### Úvod

Při hodnocení životnosti nových i existujících energetických zařízení v elektrárnách se uplatňují pravděpodobnostní metody, které jsou podkladem nových dokumentů ISO i CEN. Mezinárodní organizace pro standardizaci ISO vydala nedávno dvě nové normy pro hodnocení existujících konstrukcí (popsané v publikaci [1]) a navrhování konstrukcí na trvanlivost [2], které se opírají o pravděpodobnostní postupy. Vycházejí dále z obecných požadavků dokumentů Fib [3] a [4], i z dokumentů mezinárodních organizací CEB a RILEM. Doplnující pokyny pro existující konstrukce poskytují dokumenty ISO zavedené v normách ČSN ISO 13823 a v ČSN ISO 13822. Ověřování životnosti uplatňuje různé pravděpodobnostní postupy včetně analýzy rizik [1], které umožňují přihlížet k nejistotám základních veličin a k následkům nepříznivého stavu zařízení (snížení funkční způsobilosti nebo v krajním případě poruchy). Stanovená úroveň spolehlivosti zařízení (pravděpodobnost  $P_f$  nebo index spolehlivosti  $\beta$ ) se porovná s požadovanou (optimální nebo směrnou) úrovní spolehlivosti. Ve specifických případech se může uplatnit i funkční (morální) hledisko stanovení životnosti, které se opírá o ekonomickou optimalizaci efektivnosti zařízení.

### Definice pojmu životnost

Životnost (doba funkční způsobilosti)  $t_{ser}$  jakéhokoli zařízení (konstrukce) energetických systémů je obecně závislá na odolnosti zařízení  $R(t)$  a vnějších vlivech (zatížení)  $S(t)$ . Obě souhrnné veličiny  $R(t)$  a  $S(t)$  jsou zpravidla náhodné veličiny závislé na čase  $t$ . Se zřetelem na náhodné vlastnosti veličin  $R(t)$  a  $S(t)$  je nezbytné při definici životnosti  $t_{ser}$  stanovit pravděpodobnost oslabení nebo porušení funkční způsobilosti zařízení. Zjednodušeně se vymezují mezní stavy "použitelnosti" (serviceability limit states SMS) a extrémní mezní stavy "poruchy" (ultimate limit states ULS). V některých případech je účelné uvažovat také „iniciační“ mezní stav (initiation limit state ILS), který je ohraničen časem  $t_{init}$ , např. pro stanovení počátku procesu degradace (koroze) zařízení. Následující doba expozice  $t_{exp}$  po iniciaci degradace určuje celkovou dobu životnosti  $t_{ser}$ . Schematické znázornění takto formulované definice pojmu životnost je zachyceno na obr. 1.



Obr. 1: Definice pojmu životnost (ČSN ISO 13823)

### Pravděpodobnostní aspekty

Při ověřování životnosti zařízení (konstrukce) je nezbytné přihlížet k pravděpodobnosti dosažení příslušných mezních stavů, jak naznačuje obr. 2 (publikace [1] a [2]). Pravděpodobnostní podmínku dosažení mezního stavu v čase  $t$  lze zapsat ve tvaru

$$P_f(t) = P\{R(t) - S(t) < 0\} < P_{tar} \quad (1)$$

kde  $R(t)$  označuje odolnost zařízení a  $S(t)$  účinky vnějších vlivů (zatížení),  $P_f(t)$  označuje pravděpodobnost jevu, že vnější vlivy  $S(t)$  překročily odolnost  $R(t)$ ,  $P_{tar}$  označuje směrnou hodnotu pravděpodobnosti (target probability).

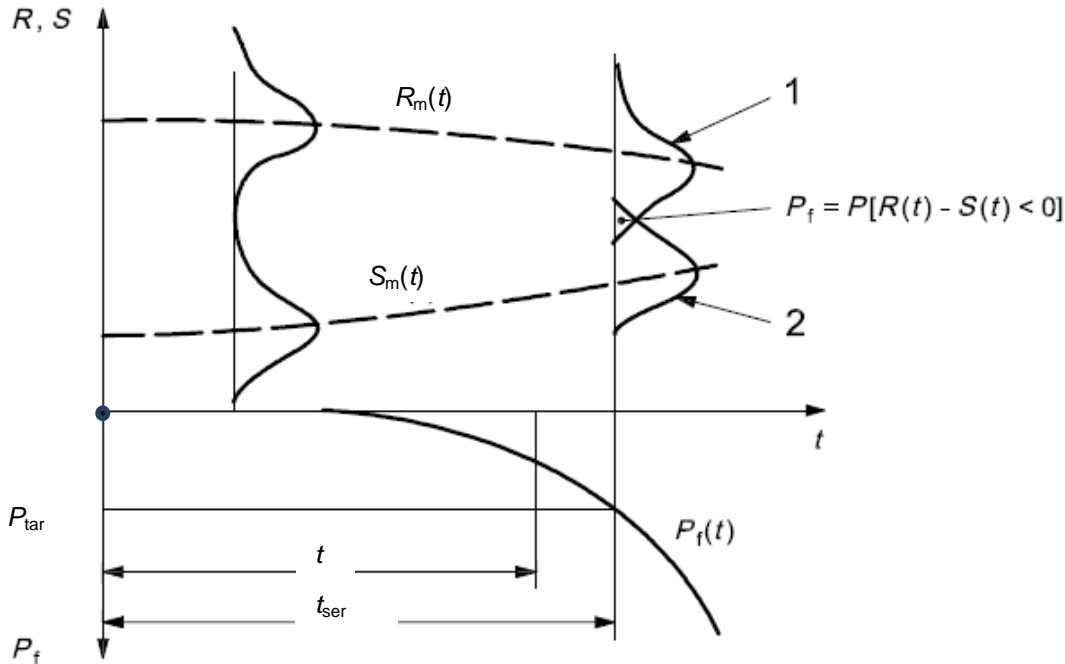
Pro stanovenou hodnotu směrné pravděpodobnosti  $P_{tar}$  lze na základě rovnice (1) určit životnost  $t_{ser}$  nebo  $t_{init}$ . Pokud rozhodují mezní stavy použitelnosti (SLS) uplatňují se zpravidla vyšší směrné pravděpodobnosti 0,05 nebo 0,01, pokud rozhodují mezní stavy poruchy (ULS) pravděpodobnosti 0,01 nebo 0,001. Při stanovení počátku procesu degradace  $t_{init}$  se uvažují větší pravděpodobnosti 0,2, 0,5. Predikce životnosti  $t_{ser,P}$  pak vyplývá z rovnice

$$P_f(t_{ser,P}) = P\{R(t_{ser,P}) - S(t_{ser,P}) < 0\} = P_{tar} \quad (2)$$

Vypočtená pravděpodobnost poruchy  $P_f(t)$  nebo index spolehlivosti  $\beta = -\Phi^{-1}(P_f(t))$ , kde symbol  $\Phi$  označuje distribuční funkci normálního rozdělení, se porovnává s doporučenou směrnou hodnotou pravděpodobnosti  $P_{tar}$ , popř.  $\beta_{tar}$ . Při návrhu se ověřuje nerovnost

$$P_f(t) < P_{tar}, \text{ popř. } \beta > \beta_{tar} \quad (3)$$

Pravděpodobnosti poruchy lze stanovit různými způsoby, např. metodou FORM nebo přímou integrací, zpravidla s využitím různých softwarových produktů.



Obr. 2: Časová závislost rozdělení  $R(t)$  (1) a zatížení  $S(t)$  (2)

## Zatížení

V ČSN ISO 13823 jsou uvedeny pokyny pro zatížení a vlivy vnějšího prostředí, které mají vliv na trvanlivost zařízení a mohou působit vně nebo uvnitř konstrukce nebo na její části. Zatížení vlivem vnějšího prostředí způsobuje degradaci nebo deformace materiálů. Mezi tato zatížení patří koroze, smršťování a další vlivy. Příklady zatížení jsou uvedeny v ČSN ISO 13823. Zatížení vlivem vnějšího prostředí lze v obvyklých případech klasifikovat jako zatížení proměnné, pro které je možno stanovit charakteristické a další reprezentativní hodnoty zatížení podle ČSN EN 1990. Charakteristické hodnoty základních veličin a dílčí součinitele lze aktualizovat na základě nově dostupných informací.

## Životnost železobetonové konstrukce

Životnost chladicích věží závisí často na karbonataci betonu. Iniciační mezní stav ILS je zde definován jako jednoduchý požadavek, že časově závislá hloubka karbonatace  $S(t)$  (účinek zatížení) je menší než tloušťka krycí vrstva betonu, zde označená jako odolnost  $R$ . Pravděpodobnost dosažení mezního stavu ILS kdy  $S(t) > R$  se stanoví na základě vztahu

$$P_f(t) = P\{S(t) > R\} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi_S(x, t) \Phi_R(x) dx \quad (4)$$

kde  $\varphi_S(x,t)$  označuje hustotu pravděpodobnosti účinku zatížení  $S(t)$  a  $\Phi_R(x)$  distribuční funkci odolnosti  $R$ ,  $x$  označuje a obecný bod hloubky betonu.

Z velkého počtu měření hloubky karbonatice  $S(t)$  na chladicích věžích několika tepelných elektráren pro nechráněný povrch betonu se stanovily následující vztahy pro průměr  $\mu_S(t)$ , variační koeficient  $V_S(t)$  a šikmost  $\alpha_S(t)$ , kde

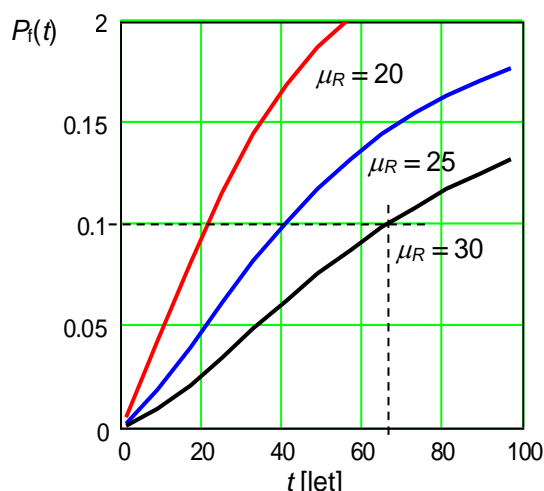
$$\mu_S(t) = 5 t \times 0,2 \text{ mm}, V_S(t) = 0,1 t \times 0,2, \alpha_S(t) = 0,2 t \times 0,2 \quad (5)$$

kde  $t$  je čas v letech. Nejvhodnějším teoretickým modelem je stanoveno rozdělení Gama. Pro tloušťku krycí vrstvy bez závislosti na čase se stanovily následující parametry

$$\mu_R = 20, 25 \text{ a } 30 \text{ mm}, V_R = 0,35, \alpha_R = 0,35 \quad (6)$$

Nejvhodnějším modelem krycí vrstvy je zde beta rozdělení s dolní mezí v nule. V příloze A normy ČSN ISO 13823 se pro obě základní veličiny  $S(t)$  a  $R$  uvádí normální rozdělení, které však představuje pouze počáteční (apriorní) typ rozdělení, které je třeba zpřesnit (aktualizovat) na základě dostupných informací.

Pro výše uvedené teoretické modely a jejich parametry, dané ve vztazích (5) a (6), pravděpodobnost poruchy  $P_f(t)$  podle vztahu (4) je zachycena na obr. 3. Graf na obr. 3 lze použít pro predikci životnosti  $t_{ser,P} = t_{init}$  na základě směrné pravděpodobnosti  $P_{tar}$  a průměrné hodnoty krycí vrstvy  $\mu_R$ . Pokud je například směrná hodnota  $P_{tar} = 0,10$ , pak průměr  $\mu_R = 20$  mm odpovídá  $t_{ser,P} \sim 23$  let, pro  $\mu_R = 30$  mm odpovídá  $t_{ser,P} \sim 65$  let (obr. 3). Predikce životnosti však významně závisí na předpokládaných teoretických modelech přijatých pro odolnost  $R$  a zatížení  $S(t)$  a na stanovené směrné hodnotě pravděpodobnosti  $P_{tar}$ .



Obr. 3: Pravděpodobnost  $P_f(t)$  pro parametry podle vztahů (5) a (6)

### Životnost ocelového prvku

Příklad hodnocení zbytkové životnosti ocelových prvků (desek rychlozávěřů vodních elektráren nebo výztuže železobetonových konstrukcí) se opírá o zjednodušený model koroze oceli [8]. Pro stanovení pravděpodobnosti poruchy  $P_f(t)$  a odpovídajícího indexu spolehlivosti  $\beta$  se uplatní vhodné pravděpodobnostní metody řady základních veličin. Hloubku koroze  $d_{corr}(t)$  v čase  $t$  lze odhadnout na základě vztahu

$$d_{corr}(t) = A t^B \quad (7)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou parametry výpočetního modelu, pro které se uvádějí hodnoty: pro parametr  $A$  rozmezí od 0,03 až 0,13, pro parametr  $B$  hodnoty v úzkém intervalu 0,6 do 0,7. Pro nerovnoměrnou důlkovou korozi platí přibližně

$$A = 0,06 \text{ mm a } B = 0,7 \quad (8)$$

Předpokládá se zde, že u oceli stáří 50 let postupně dochází k rozvoji důlkové koroze s průměrným úbytkem materiálu z jedné strany do 1 mm a asi s pravděpodobností 30% lokálního oslabení prvku z opačné strany. Model (7) s parametry (8) vede po padesáti letech k průměrné hloubce koroze 1,3 mm.

Funkce mezního stavu je vyjádřena rozdílem časově závislé odolnosti  $M_R(t)$  (uvažuje se odolnost železobetonové desky) a ohybového momentu  $M_E$  od účinků zatížení tlakem  $q$ :

$$M_R(t) - M_E = \xi_R b (d - 1,33 d_{\text{corr}}(t))^2 f_y / 4 - \delta q L^2 / 12 \quad (9)$$

Tab. 1 uvádí teoretické modely všech základních veličin. Mez kluzu oceli  $f_y$ , tloušťka desky  $d$ , parametr koroze  $A$  a zatížení od vodního tlaku  $q$  se uvažují jako náhodné veličiny s normálním (N) nebo lognormálním (LN) rozdělením. Rozpětí desky  $L$ , šířka desky  $b$ , parametr koroze  $B$  a dynamický součinitel  $\delta$  se považují za nenáhodné (deterministické) veličiny (DET). Ve funkci mezního stavu (9) se také uvažuje nejistota zjednodušeného modelu odolnosti prostřednictvím veličiny  $\xi_R$ .

Tab 1: Teoretické modely základních veličin

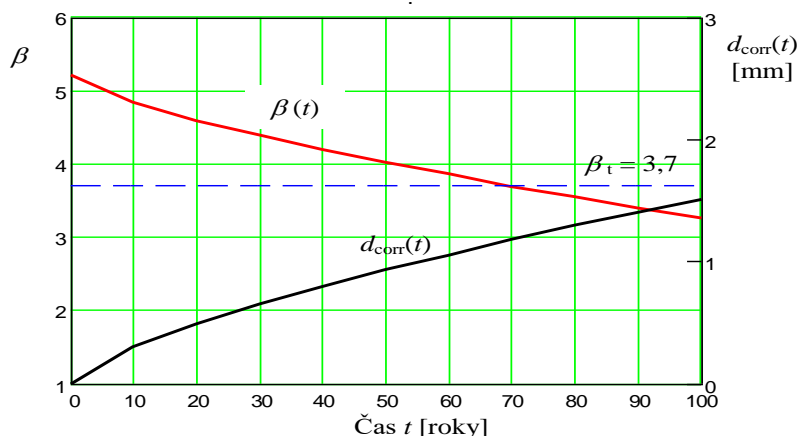
Základní veličiny	Symbol	Rozdělení	Jednotka	Charakteristická hodnota	Průměr	Variační koeficient
Mez kluzu	$f_y$	LN	MPa	235	280	0,08
Rozpětí krycí desky	$L$	DET	m	0,75	0,75	-
Tloušťka krycí desky	$d$	N	mm	18	18	0,03
Šířka krycí desky	$b$	DET	m	1	1	-
Parametr koroze	$A$	N	mm	-	0,06	0,10
Parametr koroze	$B$	DET	-	-	0,7	-
Zatížení od tlaku vody	$q$	N	kN/m <sup>2</sup>	157,6	157,6	0,10
Dynamický součinitel	$\delta$	DET	-	1,3	1,3	-
Nejistota odolnosti	$\xi_R$	DET	-	0,85	0,85	-

Obr. 4 ukazuje klesající index spolehlivosti  $\beta(t)$  a vzrůstající korozní úbytky  $d_{\text{corr}}(t)$  z jedné strany tabule v závislosti na čase  $t$ . V obr. 4 je rovněž vyznačena směrná hodnota indexu spolehlivosti  $\beta_{\text{tar}}(80) = \beta_{\text{tar}} = 3,7$  pro požadovanou zbytkovou životnost 80 let, která je stanovena na základě požadované hodnoty indexu pro jeden rok  $\beta(1) = 4,7$  ze vztahu:

$$\Phi(\beta(80)) = (\Phi(\beta(1)))^{80} = (\Phi(4,7))^{80} = \Phi(3,7) \quad (10)$$

$\Phi(\beta(80)) = (\Phi(\beta(1)))^{80} = (\Phi(4,7))^{80} = \Phi(3,7)$  Vztah (10) platí za předpokladu, že pravděpodobnosti vzniku poruch konstrukce v jednotlivých letech jsou vzájemně nezávislé.

Pravděpodobnost překročení mezního stavu a odpovídající hodnoty indexu spolehlivosti  $\beta(t)$  sledované ocelové desky jsou stanoveny na základě funkce mezního stavu (9) s využitím komerčně dostupného softwarového produktu COMREL a vlastního programu vytvořeném v prostředí matematického softwaru MATHCAD.



Obr. 4: Index spolehlivosti  $\beta(t)$  a hloubka koroze  $d_{\text{corr}}(t)$  [mm] v závislosti na čase  $t$

Z obr. 4 je patrné, že celková životnost tabulí, při které index spolehlivosti  $\beta(t)$  klesne na hodnotu 3,7, je přibližně 70 let, zbytková životnost do dosažení této meze indexu spolehlivosti je tedy asi 20 let.

### Závěrečné poznámky

Životnost zařízení  $t_{\text{ser}}$  je obecně závislá na odolnosti  $R(t)$  a zatížení  $S(t)$ , což jsou náhodné veličiny závislé na čase  $t$ . S ohledem na náhodné vlastnosti veličin  $R(t)$  a  $S(t)$  je životnost zařízení  $t_{\text{ser}}$  definována na základě přiměřeného mezního stavu a směrné pravděpodobnosti  $P_{\text{tar}}$ . Ve specifických případech se také přihlíží k funkční (morální) způsobilosti zařízení.

### Poděkování

This work was supported by the Ministry of Culture of the Czech Republic under Grant DG16P02M050 “Optimisation of Observations and Assessment of Heritage Structures”.

### Literatura

- [1] Holický, M. (2019): *Hodnocení existujících konstrukcí*. České vysoké učení technické v Praze, Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha. ISBN 978-80-01-06523-5
- [2] Holický, M., Marková, J. (2007): *Zásady navrhování stavebních konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1990*. Informační centrum ČKAIT, s.r.o., Praha. ISBN 978-80-87093-27-6
- [3] fib (2006): *Model Code for service life design*. fib Bulletin No. 34, fib, Lausanne. ISBN 978-2-88394-074-1
- [4] fib (2012): *Model Code 2010 – Final draft, Volume 1 and Volume 2*. Bulletin No. 65 and No. 66, fib, Lausanne. ISBN 978-2-88394-105-2, ISBN 978-2-88394-106-9
- [5] Kühn, B., Lukić, M., Nussbaumer, A., Günther, H.-P., Helmerich, R., Herion, S., Kolstein, M.H., Walbridge, S., Androic, B., Dijkstra, O., Bucak Ö. (2008): *Assessment of existing steel structures: Recommendations for estimation of remaining fatigue life*. JRC Scientific and Technical Reports, European Communities, Luxembourg. ISSN 1018-5593
- [6] Holický, M. (2007): Probabilistic design of structures for durability. *Proceedings of European Safety and Reliability Conference Esrel*.
- [7] CEB (1997): *New approach to durability design: an example for carbonation induced corrosion*. Bulletin d'information / Comité Euro-International du Béton, 238, Lausanne.
- [8] Holický, M., Marková, J., Sedláček, K. (2010): Pravděpodobnostní hodnocení životnosti energetických zařízení. *Sborník 6. konference Zvyšování životnosti komponent energetických zařízení v elektrárnách*, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o., Srní.