

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Ing. Petr Kolářek

**OPTIMALIZACE RADIAČNÍ OCHRANY V JADERNÉ
ELEKTRÁRNĚ**

**OPTIMIZATION OF RADIATION PROTECTION AT
NUCLEAR POWER PLANT**

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: Prof. Ing. Oldřich Matal, CSc.

VUT-FSI, Brno

Oponenti: Prof. Ing. Jozef Lipka, DrSc.
Doc. RNDr. Miroslav Doložilek, CSc.
Ing. Aleš John

STU-FEI, Bratislava
VUT-FSI, Brno
ČEZ-EDU

Datum obhajoby: 27. 2. 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

nákladově přínosová analýza, ALARA, radiační ochrana, finanční ekvivalenty dávek, 1.blok Jaderné elektrárny Temelín, radiační ozáření

KEYWORDS

Cost-Benefit Analysis, ALARA, Radiation Protection, Dose Equivalents, TEMELIN - 1 REACTOR, Radiation Doses

Práce je uložena na oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

© Petr Koláček, 2002
ISBN 80-214-2095-2
ISSN 1213-4198

Obsah

1	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
2	ZÁKLADNÍ POJMY A CÍL PRÁCE	6
3	ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	7
4	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	9
4.1	Řešení Systému ALARA	9
4.1.1	Příprava personálu	9
4.1.2	Vstupní data	10
4.1.3	Nový mechanismus ALARA	10
4.1.4	Výsledky	14
4.1.5	Hodnocení	15
4.2	Validace a aplikace Systému ALARA	15
4.2.1	Použití Systému ALARA v Jaderné elektrárně Dukovany	15
4.2.2	Realizace Systému ALARA v Jaderné elektrárně Temelín	18
5	ZÁVĚR	19
6	LITERATURA	21
7	SUMMARY	22
8	AUTOROVO CURICULUM VITAE	23

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V současnosti jsou zdroje ionizujícího záření běžnou součástí řady průmyslových a medicínských odvětví. Kromě svého pozitivního významu však tyto zdroje představují pro personál i okolní obyvatelstvo možné nebezpečí. To znamená, že existuje riziko negativních zdravotních následků ozáření. Oblast, která se zabývá kontrolou ozáření, snížením či zamezením následků ozáření pro zaměstnance, držitele povolení, obyvatelstvo a životní prostředí, je všeobecně nazývána **radiační ochrana**.

Uvedené riziko musí být opodstatněné, menší než stanovená hodnota a minimální (resp. optimální). Otázkou však je stanovení optimální hodnoty ozáření. Přesněji řečeno, jak limitovat ozáření pracovníků, jaké se mají vynakládat náklady na ochranné pomůcky, jak má být provedeno stínění, jakou volit třídu spolehlivosti komponentů zařízení, kolik pracovníků se má činnosti zúčastnit, do jaké míry se má provádět dekontaminace, jaká má být prováděna diagnostika atd. Hledání vhodného řešení je označováno jako **optimalizace radiační ochrany**.

Optimalizací radiační ochrany je myšlen systém, který stanovuje takové podmínky práce v prostředí se zdroji ionizujícího záření, že jsou splněny následující podmínky [1]

- i. veškerá rizika ozáření osob v souvislosti s činnostmi prováděnými se zdroji ionizujícího záření musí být opodstatněná přínosem pro společnost,
- ii. ozáření všech osob musí být tak nízké, jak je rozumně možné při uvážení hospodářských a společenských hledisek,
- iii. osobní dávky (individuální i kolektivní) musí být nižší, než jsou stanovené limity

Takto formulovaný přístup je označován jako princip ALARA (z angličtiny: **As Low As Reasonably Achievable**) [1], což je jinými slovy optimalizace radiační ochrany. Rozumí se jí postupy k dosažení a udržení takové úrovně radiační ochrany, aby riziko ohrožení života, zdraví osob a životního prostředí bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek. [2]

Bylo navrženo několik různých postupů. Jedná se například o postupy nazývané

- Tolerance rizika,
- Analýza efektivity využití nákladů,
- Nákladově přínosová analýza,

- Diferenční nákladově přínosová analýza,
- Rozšířená nákladově-přínosová analýza.

Poslední z nich je zároveň stanoven závaznou vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb. [2] pro prokazování rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany.

Společným rysem všech uvedených postupů jsou následující hlediska:

- 1) hodnotí jednotlivé činnosti izolovaně, bez vzájemných vazeb,
- 2) neumožňují poskytnout současný průkaz rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany pro soubor činností,
- 3) nezohledňují společenský požadavek na maximální úrovně kolektivní efektivní dávky,
- 4) nevytváří celkový systém uplatňování optimalizace radiační ochrany z hlediska organizačního členění a informačních toků.

2 ZÁKLADNÍ POJMY A CÍL PRÁCE

Pro formulaci cíle práce je nutné uvést nejprve následující nové definice.

Činnost je každá aktivita v jaderné elektrárně, která je realizována za určitým účelem. V této práci jsou na mysli činnosti realizované v kontrolovaném pásmu.

Varianta (činnosti) je postup, kterým je činnost realizována, je charakterizována konkrétním pracovním postupem, použitím konkrétních opatření radiační ochrany a velikostí a distribucí čerpání osobních dávek.

Systém ALARA je optimalizační systém radiační ochrany, který zahrnuje všechny složky a fáze optimalizace, včetně celé organizační struktury, která se na uplatňování optimalizace podílí.

Proces ALARA je optimalizační proces radiační ochrany, při němž jsou navrhována opatření radiační ochrany. Tato opatření jsou hodnocena a je nalezeno a prezentováno optimální řešení chápané jako „rozumně dosažitelná úroveň radiační ochrany“. Proces ALARA je částí Systému ALARA.

Mechanismus ALARA je optimalizační mechanismus radiační ochrany, kdy jsou zvažovány výhody a nevýhody navrhovaných opatření. Mechanismus ALARA je částí Procesu ALARA.

Hlavním cílem práce je vytvoření funkčního systému, jenž by dokázal optimalizovat radiační ochranu v provozu jaderné elektrárny. Cíle práce jsou následně zaměřeny do dvou oblastí, a to:

- a) teoretická analýza problematiky se zahrnutím legislativních podmínek s návrhem vhodného řešení a
- b) praktická aplikace výsledků navrženého řešení se zohledněním požadavků plynoucích ze specifiky jaderné elektrárny.

Každý, kdo využívá jadernou energii nebo provádí činnosti vedoucí k ozáření, je povinen dodržovat takovou úroveň radiační ochrany, aby riziko ohrožení života, zdraví osob a životního prostředí bylo tak nízké, jak lze rozumně dosáhnout při uvážení hospodářských a společenských hledisek [3].

Cílem této práce je nalezení takového Systému ALARA, který by stanovil uvedenou úroveň radiační ochrany, resp. prokázal, že této úrovni bylo dosaženo. Stanovená úroveň musí být určena se zřetelem na hospodářskou a společenskou přijatelnost. Nejprve budou popsány funkce, jež budou dále hodnoceny z hlediska požadovaného Systému ALARA.

Je hledán takový Systém ALARA, který nalezne taková opatření radiační ochrany x_1, x_2, \dots, x_n , že bude platit pro soubor i -tých prací

$$\sum_{ij} E_{ij} (x_1, x_2, \dots, x_n) \leq e_{\text{optim}} ,$$

kde e_{optim} je optimální hodnota kolektivní efektivní dávky pro soubor i -tých prací a

$$\sum_i F_i (x_1, x_2, \dots, x_n) \leq f_{\text{max}} ,$$

kde f_{max} je hospodářsky přijatelná hodnota provozních nákladů na zajištění radiační ochrany souboru i -tých prací. Systém musí být schopen prokázat, že každé jiné řešení opatření radiační ochrany není optimální. Nalezené řešení musí splňovat všechny výše uvedené podmínky společenské přijatelnosti. V teoretickém rozboru budou provedeny analýzy obou zkoumaných funkcí a používaných ALARA mechanismů. Tento mechanismus je hlavní součástí systému ALARA. S ohledem na společenskou přijatelnost nemůže vést Systém ALARA ke zvýšení celkové kolektivní efektivní dávky.

Závěry analýz budou použity jako východisko pro návrh systému, který bude tvořen formulací zkoumaných funkcí a ALARA mechanismem. Vše bude zasazeno do organizačního rámce s nastavenými vazbami. Návrh vlastního rámce vychází z autorových praktických zkušeností a specifík Jaderné elektrárny Dukovany a Jaderné elektrárny Temelín.

3 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

S ohledem na současný stav řešené problematiky, požadavky platné legislativy v České republice a cíl práce byl vytvořen ucelený nový Systém ALARA včetně úpravy mechanismu. V první části práce je provedeno vytvoření Systému ALARA a v části druhé je realizována jeho validace ve čtyřech stupních, a to na jedné činnosti, dále na hypotetickém souboru činností a

konečně na reálném souboru činností. Na závěr je popsána realizace Systému ALARA v podmínkách ČEZ-ETE.

Pro vytvoření nového mechanismu je využita formulace stanovení finančních nákladů opatření radiační ochrany i -té činnosti

$$F_i = s_1x_1 + s_2x_2 + \dots + s_nx_n \quad (3.1)$$

Pro vyjádření celkových nákladů j -té varianty i -té činnosti je využito vyjádření nákladově přínosové analýzy. J -tá varianta je charakterizována celkovými náklady jP_i , pro něž platí

$${}^jP_i = {}^jF_i + {}^jD_i, \quad (3.2)$$

kde jF_i jsou finanční náklady na opatření radiační ochrany první varianty i -té činnosti a jD_i je finanční ekvivalent kolektivní efektivní dávky i -té činnosti. Finanční vyjádření D_i kolektivní efektivní dávky i -té činnosti je stanoveno vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb. [2]:

$$D_i = \sum_{a=1}^4 R_Y S_a N_{ai} \bar{E}_{ai}, \quad (3.3)$$

kde součinitel S_a nabývá níže uvedených hodnot, N_{ai} je počet osob a -té skupiny vykonávající i -tou práci, R_Y je koeficientem inflace, Y je posledním dvojčíslicím roku, k němuž byl tento koeficient stanoven a \bar{E}_{ai} je průměrná hodnota efektivní dávky jednotlivce a -té skupiny obdržena při i -té činnosti. Zároveň platí základní podmínka limitování osobních dávek, že efektivní dávky musí být menší než základní limity pro pracovníky se zdroji stanovenými vyhláškou SÚJB 184/97 [2].

Součinitel S_a , má index, který nabývá hodnot 1, 2, 3 nebo 4 a odpovídá číslu oblasti, které jsou níže specifikovány [2]:

- 1) bude-li průměrná efektivní dávka v rozsahu 0 až jedna desetina základních limitů, je použit součinitel $S_1 = 500\,000 \text{ Kč.Sv}^{-1}$,
- 2) bude-li průměrná efektivní dávka v rozsahu jedné desetin až tří desetin základních limitů, je použit součinitel $S_2 = 1\,000\,000 \text{ Kč.Sv}^{-1}$,
- 3) bude-li průměrná efektivní dávka vyšší než tři desetin základních limitů, je použit součinitel $S_3 = 2\,500\,000 \text{ Kč.Sv}^{-1}$,
- 4) dojde-li k ozáření v důsledku radiačních nehod, je použit součinitel $S_4 = 5\,000\,000 \text{ Kč.Sv}^{-1}$.

Převedení hodnoty kolektivní efektivní dávky na finanční náklady je hlavním znakem nákladově přínosové analýzy, která však může mít i jiné způsoby vyjádření (např. [4]).

Toto vyjádření vychází z rozšířené nákladově přínosové analýzy. Jako optimální varianta $P_{i,\text{optim}}$ je chápáno řešení s nejnižší hodnotou provozních nákladů vyjádřené pomocí nákladově přínosové analýzy jako

$$P_{i,\text{optim}} = \min \{ {}^1 P_i, {}^2 P_i, \dots, {}^{n_i} P_i \}, \quad (3.4)$$

kde ${}^j P_i$ jsou provozní náklady j -té varianty i -té činnosti. Tento vztah zároveň vyjadřuje přijatelnost hospodářských hledisek. Míra společenské přijatelnosti je vyjádřena formulací z vyhlášky SÚJB č. 184/97 Sb. [2], a to

$$\sum_{aj} N_{aj} \bar{E}_{aj} < \sum_{aj} N_{a1} \bar{E}_{a1} \quad , \quad (3.5)$$

kde N_{aj} je počet osob a -té skupiny vykonávající činnost j -tou variantou a \bar{E}_{aj} je průměrná hodnota efektivní dávky jednotlivce a -té skupiny obdržena při j -té variantě, kde $j > 1$.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Výsledky práce jsou rozděleny do dvou částí - řešení Systému ALARA a validace a realizace systému na hypotetických i praktických úlohách.

4.1 Řešení Systému ALARA

Systém ALARA je, jednoduše řečeno, posloupnost kroků, které umožňují strukturovaný přístup k problému či k rozhodnutí.

Tento nový systém je rozvržen do pěti etap.

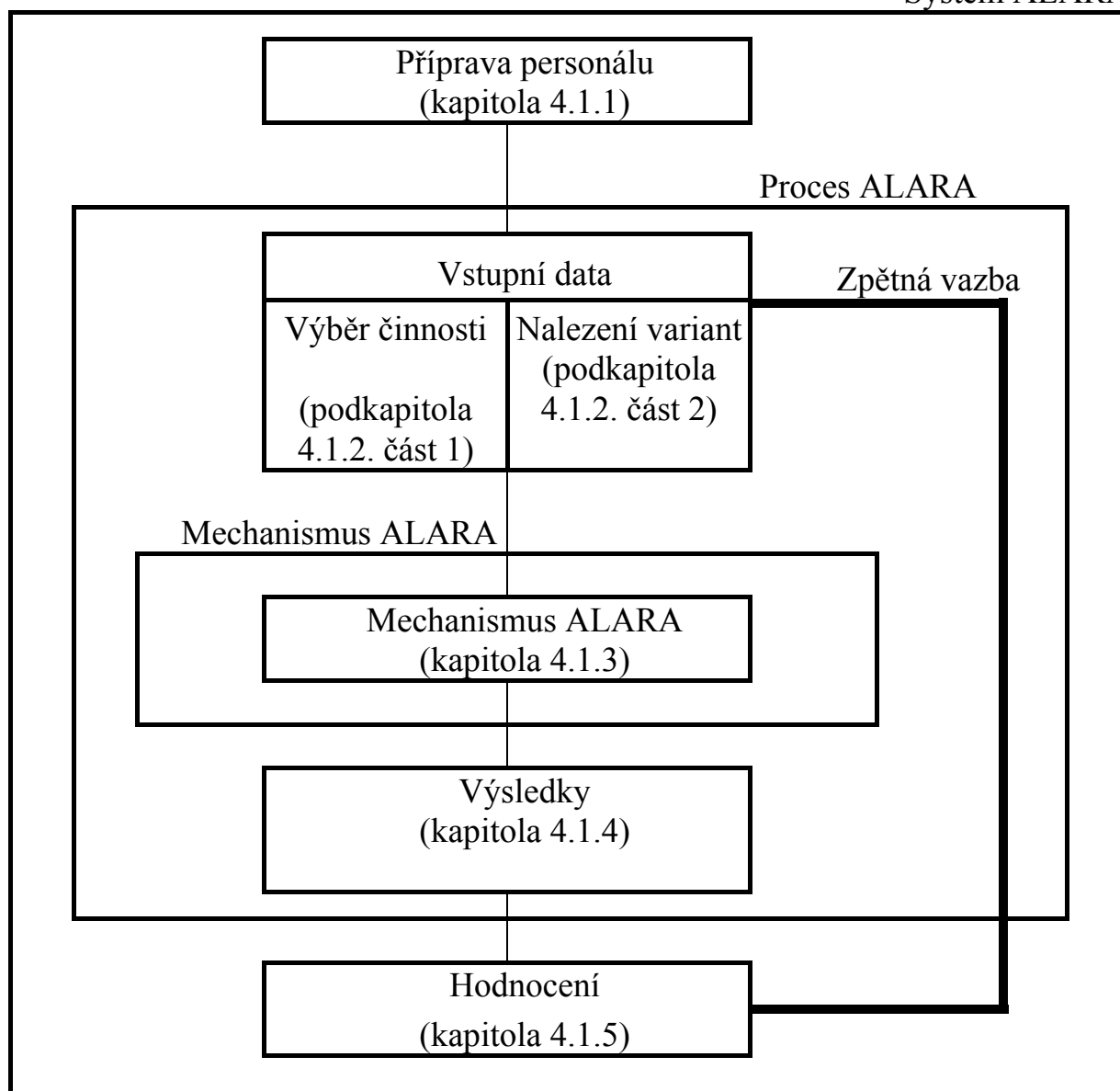
Jsou jimi

- příprava personálu,
- vstupní data,
- mechanismus ALARA,
- výsledky a
- hodnocení.

Blokové schéma je uvedeno na obrázku 4.1.

4.1.1 PŘÍPRAVA PERSONÁLU

Každý pracovník absolvuje kurz pro samostatnou práci v kontrolovaném pásmu [2]. Tuto přípravu zajišťuje Centrum přípravy a vzdělávání, Brno [5, 10]. Teoretickou přípravou personálu, který se podílí na jednotlivých etapách Systému ALARA, je také pověřeno Centrum přípravy a vzdělávání, Brno.



4.1.2 VSTUPNÍ DATA

Vstupní data zahrnují údaje, které jsou podkladem pro rozhodovací mechanismus. Charakterizována jsou následujícími oblastmi:

- 1) výběr činností,
- 2) nalezení variant,
 - a) provozní náklady variant a
 - b) kolektivní efektivní dávky variant.

4.1.3 NOVÝ MECHANISMUS ALARA

Autorem vytvořený mechanismus vychází ze vztahů (3.1) až (3.5). Hlavním přínosem je současné hodnocení více činností a jejich variant. Proto je nutno náklady na radiační ochranu i předpokládané kolektivní efektivní dávky

přisoudit konkrétní činnosti a variantě jejího provedení. Převedení na varianty je jádrem nového řešení. Nechť l -tý pracovník obdrží při j -té variantě i -té činnosti efektivní dávku ${}^jE_{il}$. Pak kolektivní efektivní dávka j -té varianty i -té činnosti jE_i je modifikován jako

$${}^jE_i = \sum_l {}^jE_{il} . \quad (4.1)$$

Finanční ekvivalent kolektivní efektivní dávky j -té varianty i -té činnosti jD_i vychází ze vztahu (3.3) a je autorem modifikován pro j -tou variantu i -té činnosti, takže

$${}^jD_i = \sum_{a=1}^4 R_Y S_a {}^jN_{ai} {}^j\bar{E}_{ai} , \quad (4.2)$$

kde ${}^j\bar{E}_{ai}$ je předpokládaná průměrná efektivní dávka pracovníka při j -té variantě i -té činnosti zařazeného do a -té kategorie a ${}^jN_{ai}$ je předpokládaný počet pracovníků při j -té variantě i -té činnosti zařazených do a -té kategorie. Neboť platí, že

$$\sum_l {}^jE_{ail} = {}^jN_{ai} {}^j\bar{E}_{ai} , \quad (4.3)$$

kde ${}^jE_{ail}$ je předpokládaná efektivní dávka l -tého pracovníka při j -té variantě i -té činnosti zařazeného do a -té kategorie. Dosazením (4.3) do (4.2) vzniká modifikovaný původní vztah pro finanční ekvivalent kolektivní efektivní dávky j -té varianty i -té činnosti jako

$${}^jD_i = \sum_{a=1}^4 R_Y S_a \left(\sum_l {}^jE_{ail} \right) . \quad (4.4)$$

Nechť je vybrán časový interval reprezentující období, pro něž jsou plánovány činnosti a je hledána optimální podoba opatření radiační ochrany, neboli průkaznost dosažení rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany plánovaných činností v daném časovém období (vzhledem k orientaci na práci v období odstavek jeví se vhodným časovým intervalem období kalendářního roku).

Finanční náklady na radiační ochranu jsou vyjádřeny následujícím vztahem. Nechť jF_i jsou finanční náklady j -té varianty i -té činnosti a x_1, x_2, \dots, x_n jsou opatření radiační ochrany včetně nákladů na práci. Pak podle (3.1)

$${}^j F_i = {}^j s_{i1} x_1 + {}^j s_{i2} x_2 + \dots + {}^j s_{in} x_n, \quad (4.5)$$

kde ${}^j s_{i1}, {}^j s_{i2}, \dots, {}^j s_{in}$ jsou koeficienty kvantitativního vyjádření množství x_1, x_2, \dots, x_n příslušné j -té variantě i -té činnosti. Počet variant i -té činnosti je n_i , přičemž vždy první je implicitní (dosud používaná).

Odlíšnost nového mechanismu od mechanismů uvedených v literatuře spočívá v hodnocení souboru prací, jež budou realizovány ve zvažovaném časovém období. Nechť existuje soubor n prací, kdy i -tou prací lze provést n_i variantami označenými j . Pak i -tá činnost provedená j -tou variantou je označena jako ${}^j C_i$. Řetězcem činností je označena n -prvková množina ${}^v \underline{C} = \{ {}^{j_1} C_1, {}^{j_2} C_2, \dots, {}^{j_n} C_n \}$, kde j_i je prvek množiny $\{1, 2, \dots, n_i\}$. Nechť jsou vytvořeny všechny možné řetězce činností a jejich variant v uvedeném časovém období. Způsob tvorby řetězců je patrný z tabulky 4.2. Počet řetězců n_v je

$$n_v = \prod_{i=1}^n n_i.$$

Tudíž v je prvek množiny $\{1, 2, \dots, n_v\}$. Pro finanční náklady na radiační ochranu v -tého řetězce ${}^v \underline{F}$ podle (3.14) platí, že

$${}^v \underline{F} = \sum_i f_i \sum_r {}^{j_k} s_i x_r, \quad (4.6)$$

kde j_k je pro každé i prvkem množiny $\{1; 2; \dots, n_i\}$. Potom v -tý řetězec je chápán jako v -tá kombinace $\{j_1; j_2; \dots, j_n\}$ s opakováním. Koeficient f_i vyjadřuje kolikrát i -tá činnost proběhne ve vybraném časovém intervalu. Obdobně je definována kolektivní efektivní dávka v -tého řetězce ${}^v \underline{E}$ jako

$${}^v \underline{E} = \sum_i f_i \sum_r {}^{j_k} E_i, \quad (4.7)$$

kde ${}^{j_k} E_i$ je kolektivní efektivní dávka j_k -té kombinace i -té činnosti.

Součet finančních ekvivalentů kolektivních efektivních dávek ${}^v \underline{D}$ je modifikací (4.7) a po dosazení (4.4) platí, že

$${}^v \underline{D} = \sum_i f_i \sum_{a=1}^4 R_Y S_a \sum_r {}^{j_k} E_{ai}. \quad (4.8)$$

Celkové provozní náklady ${}^v \underline{P}$ pro v -tý řetězec činností jsou vyjádřeny podle (3.2) jako

$${}^v \underline{P} = {}^v \underline{F} + {}^v \underline{D}. \quad (4.9)$$

Pro aktuální řetězec činností jsou celkové provozní náklady ${}^1 \underline{P}$ vyjádřeny jako

$${}^1 \underline{P} = {}^1 \underline{F} + {}^1 \underline{D}. \quad (4.10)$$

Protože je společensky nepřijatelné úmyslně zvyšovat ozáření z důvodu ekonomických úspor, je zavedena další nová podmínka, která vybere takové řetězce v různé od 1, že pro ně platí

$${}^v \underline{E} \leq {}^1 \underline{E}. \quad (4.11)$$

Tato úprava je možná, neboť na řetězec činností lze nahlížet jako na činnost jedinou složenou z řady suboperací. Tímto jsou vybrány pouze takové řetězce, jejichž celková kolektivní efektivní dávka je stejná nebo menší, než u dosavadně používaných variant.

Následně jsou vybrány pouze takové řetězce v , pro něž platí, že

$${}^v \underline{P} < {}^1 \underline{P}. \quad (4.12)$$

Pokud tuto podmínku žádné v nespĺňuje, je optimálním řešením činností ve zvažovaném časovém období, jehož celkové náklady jsou ${}^0 \underline{P}$, použití vždy prvních variant uvažovaných činností a platí tedy

$${}^0 \underline{P} = {}^1 \underline{P}.$$

Pokud existuje aspoň jedno v , pak optimální řešení radiační ochrany uvažovaného souboru činností je řetězec činností, pro jehož celkové náklady ${}^0 \underline{P}$ platí, že

$${}^0 \underline{P} = \arg \min_v {}^v \underline{P}. \quad (4.13)$$

Tento vztah, který je obdobou (3.4) znamená pro vybranou kombinaci některou z následujících vlastností:

- ◆ kolektivní osobní dávky řetězce činností jsou stejné a finanční náklady jsou menší, než u aktuálně používaného řetězce činností,
- ◆ kolektivní osobní dávky řetězce činností jsou menší a finanční náklady jsou stejné, než u aktuálně používaného řetězce činností,
- ◆ kolektivní osobní dávky řetězce činností jsou menší nebo stejné a finanční náklady jsou menší, než u aktuálně používaného řetězce činností,

- ◆ kolektivní osobní dávky řetězce činností jsou menší a finanční náklady jsou větší, než u aktuálně používaného řetězce činností, avšak finanční zvýšení je menší než finanční ekvivalent ušetřených dávek (což je situace, kdy má držitel povolení ze zákona povinnost tuto úpravu provést).

Nechť je předpokládána úloha, že z důvodů především prestižních (což jsou v současné společenské situaci důvody často významnější než ekonomické) je potřeba snížit celkovou roční kolektivní efektivní dávku (KED), a to o hodnotu ΔKED vůči hodnotě ${}^1 E$. Při takovéto úloze se většinou jedná o řetězec činností pro následující rok.

Úloha odpovídá na otázku, jaké náklady je třeba na toto snížení kolektivní efektivní dávky vynaložit a které činnosti a jakým způsobem změnit. Následně jsou vybrána všechna v taková, že pro ně platí

$${}^v E \leq {}^1 E - \Delta KED. \quad (4.14)$$

Pokud existuje aspoň jedno v , pak optimální způsob řešení radiační ochrany uvažovaného souboru činností je řetězec činností, pro jehož celkové náklady ${}^o P$ platí vztah (4.13). Nechť nalezené $v=x$. Pak hodnota ΔF , pro niž platí

$$\Delta F = {}^x F - {}^1 F, \quad (4.15)$$

představuje finanční náročnost opatření radiační ochrany, pro snížení kolektivní efektivní dávky o ΔKED .

Úloha je velice významná a pokrývá velké spektrum možných vzniklých situací, kdy z důvodů možných mimořádných situací s neplánovaným ozářením budou intenzivně hledány postupy, které povedou ke snížení kolektivní osobní dávky ve zbývajícím čase kalendářního roku. Na významu taktéž optimalizační postup nabude v okamžiku projednávání variant prodloužení projektové životnosti elektráren.

Na základě tohoto nového autorova návrhu byl firmou EDU SOFTWARE vytvořen program „Optimalizace čerpání osobních dávek. Verze 1.2“. [11] Vytvořený program byl odladěn na zvolených příkladech uvedených v kapitole 4.2. Pro jeho validaci bylo využito srovnání s programem OPTI-RP [6] využívajícím nákladově přínosovou analýzu.

Celý mechanismus byl publikován v [12].

4.1.4 VÝSLEDKY

Po spuštění programu vede výpočet k:

- a) rozumně dosažitelné úrovni radiační ochrany,

- b) řešení na požadovanou úroveň KED,
- c) posouzení vhodné techniky,
- d) snížení a stanovení celkových finančních nákladů na radiační ochranu a
- e) podpoře plánování kolektivní efektivní dávky.

4.1.5 HODNOCENÍ

Po realizaci činností (nejen nově realizovaných, ale i po mechanismu ALARA nezměněných) je provedeno přehodnocení údajů a výpočet je realizován pro další časový interval. Hodnoceno je snížení kolektivní efektivní dávky a finančních nákladů na radiační ochranu. Snížení těchto hodnot je prezentováno jako **přínos Systému ALARA**.

4.2 Validace a aplikace Systému ALARA

V rámci zavedení a použití autorem zpracovaného nového Systému ALARA byl zvolen čtyřstupňový postup. Nejprve byl Systém použit na příkladě uvedeném v literatuře podle [7]. V druhém stupni byl zvolen hypotetický příklad souboru činností. Bylo provedeno srovnání s řešením doporučeným v [7]. Srovnání prokázalo, že pro použití na jediné činnosti je dosahováno shodných výsledků. Při souboru činností jsou však výsledky původního mechanismu správnější. Třetím krokem bylo zkušební použití Mechanismu ALARA na soubor prací na parních generátorech 3.bloku JE Dukovany (viz kapitola 4.2.1). Posléze bylo přikročeno k zavedení tohoto nového Systému ALARA v JE Temelín (viz kapitola 4.2.2).

4.2.1 POUŽITÍ SYSTÉMU ALARA V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ DUKOVANY

Ve třetím stupni byl nový Systém ALARA aplikován na pilotní projekt v Jaderné elektrárně Dukovany, a to na souboru prací realizovaných na třetím bloku na parních generátorech. Aplikace opět obsahuje srovnání s programem OPTI-RP [6]. Postup byl aplikován v ČEZ-EDU v roce 2000 a přispěl ke snížení kolektivní efektivní dávky i provozních nákladů.

Další varianty byly stanoveny pro pět činností C1 až C5.

- C1 Provedení kontrol v II.O PG dle požadavků programu zajištění jakosti
- C2 Montáž hladinového separátoru
- C3 Demontáž primárních vík horkého a studeného kolektoru PG
- C4 Výměna horní části horkého kolektoru PG 4 (1YB14W01)
- C5 Dekontaminace plošin horkého a studeného kolektoru PG při kontrolách manipulátory KWU a UNIKOP

Tabulka 4.1 – Charakteristika variant činností C1, C2, C3, C4, C5 kde f je četnost, x_i jsou cenou jednotky určitého opatření radiační ochrany, s_i je počet těchto jednotek použitých na příslušné variantě, F je cena opatření radiační ochrany, E je kolektivní efektivní dávka, D je finanční ekvivalent kolektivní efektivní dávky a P jsou celkové náklady (tedy součet F a D)

Název:	C1
Varianta:	1
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_1 = 1000$	1
F [Kč]	1000
E [mSv]	5,5
D [Kč]	16053,7
P [Kč]	17053,7

Název:	C2
Varianta:	1
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	36
F [Kč]	18000
E [mSv]	1,5
D [Kč]	4378,3
P [Kč]	22378,3

Název:	C3
Varianta:	1
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	25
$x_3 = 80000$	1
F [Kč]	92500
E [mSv]	0,5
D [Kč]	291,9
P [Kč]	92791,9

Název:	C4
Varianta:	1
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_1 = 1000$	32
$x_2 = 500$	0
$x_4 = 2000$	0
F [Kč]	32000
E [mSv]	0
D [Kč]	0
P [Kč]	32000

Název:	C5
Varianta:	1
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	1,5
$x_5 = 100$	1
$x_6 = 500$	0
F [Kč]	850
E [mSv]	0
D [Kč]	0
P [Kč]	850

Název:	C1
Varianta:	2
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_1 = 1000$	0
F [Kč]	0
E [mSv]	9,0
D [Kč]	26269,8
P [Kč]	26269,8

Název:	C2
Varianta:	2
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	1
F [Kč]	500
E [mSv]	0,5
D [Kč]	291,9
P [Kč]	791,9

Název:	C3
Varianta:	2
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	0
$x_3 = 80000$	0
F [Kč]	0
E [mSv]	5
D [Kč]	14594,3
P [Kč]	14594,3

Název:	C4
Varianta:	2
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_1 = 1000$	0
$x_2 = 500$	1
$x_4 = 2000$	1
F [Kč]	2500
E [mSv]	0
D [Kč]	0
P [Kč]	2500

Název:	C5
Varianta:	2
x_i [Kč]	s_i [-]
$x_2 = 500$	0,5
$x_5 = 100$	0
$x_6 = 500$	1
F [Kč]	750
E [mSv]	0
D [Kč]	0
P [Kč]	750

Jednotlivé položky opatření radiační ochrany v tabulce 4.1 jsou:

- x_1 – cena hodiny práce jednoho montéra Vítkovic: 1000 Kč
- x_2 - cena hodiny práce jednoho pomocného pracovníka Vítkovic a cena práce pracovníka radiační kontroly provozu: 500 Kč
- x_3 – cena dekontaminačních prací PG
- x_4 – cena plastové folie – velké
- x_5 – cena čisticích prostředků
- x_6 – cena plastové folie - malé

V tabulce 4.1 jsou pod označením (Varianta 1) uvedeny charakteristiky variant pěti činností doposud používaných. Pod označením (Varianta 2) jsou charakteristiky autorem navržených variant.

Tabulka 4.2 – Řetězce ${}^v\mathbf{C}$ podle variant činností

Řetězec ${}^v\mathbf{C}$	Činnost					${}^v\mathbf{E}$ [mSv]
	C1	C2	C3	C4	C5	
${}^1\mathbf{C}$	1	1	1	1	1	7,5
${}^2\mathbf{C}$	1	1	1	1	2	7,5
${}^3\mathbf{C}$	1	1	1	2	1	7,5
${}^4\mathbf{C}$	1	1	1	2	2	7,5
${}^5\mathbf{C}$	1	1	2	1	1	12
${}^6\mathbf{C}$	1	1	2	1	2	12
${}^7\mathbf{C}$	1	1	2	2	1	12
${}^8\mathbf{C}$	1	1	2	2	2	12
${}^9\mathbf{C}$	1	2	1	1	1	6,5
${}^{10}\mathbf{C}$	1	2	1	1	2	6,5
${}^{11}\mathbf{C}$	1	2	1	2	1	6,5
${}^{12}\mathbf{C}$	1	2	1	2	2	6,5
${}^{13}\mathbf{C}$	1	2	2	1	1	11
${}^{14}\mathbf{C}$	1	2	2	1	2	11
${}^{15}\mathbf{C}$	1	2	2	2	1	11
${}^{16}\mathbf{C}$	1	2	2	2	2	11
${}^{17}\mathbf{C}$	2	1	1	1	1	11
${}^{18}\mathbf{C}$	2	1	1	1	2	11
${}^{19}\mathbf{C}$	2	1	1	2	1	11
${}^{20}\mathbf{C}$	2	1	1	2	2	11
${}^{21}\mathbf{C}$	2	1	2	1	1	15,5
${}^{22}\mathbf{C}$	2	1	2	1	2	15,5
${}^{23}\mathbf{C}$	2	1	2	2	1	15,5
${}^{24}\mathbf{C}$	2	1	2	2	2	15,5
${}^{25}\mathbf{C}$	2	2	1	1	1	10
${}^{26}\mathbf{C}$	2	2	1	1	2	10
${}^{27}\mathbf{C}$	2	2	1	2	1	10
${}^{28}\mathbf{C}$	2	2	1	2	2	10
${}^{29}\mathbf{C}$	2	2	2	1	1	14,5
${}^{30}\mathbf{C}$	2	2	2	1	2	14,5
${}^{31}\mathbf{C}$	2	2	2	2	1	14,5
${}^{32}\mathbf{C}$	2	2	2	2	2	14,5

Algoritmus programu „Optimalizace čerpání osobních dávek“ sestaví řetězce činností z tabulky 4.1 jako kombinace různých variant jejich provedení. V tabulce 4.2 jsou popsány řetězce $\checkmark C$ podle variant činností.

Potom jsou vybrány pouze ty řetězce z tabulky 4.2, jež se vyznačují kolektivní efektivní dávkou stejnou či menší než řetězec číslo 1 ($\checkmark C_1$), jehož kolektivní efektivní dávka je 7,5 mSv. Vybrány jsou řetězce ($\checkmark C_1, \checkmark C_2, \checkmark C_3, \checkmark C_4, \checkmark C_9, \checkmark C_{10}, \checkmark C_{11}, \checkmark C_{12}$). Jednotlivé řetězce a číselné charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 - Přehled vybraných řetězců a jejich hodnot

Řetězec $\checkmark C$	$\checkmark E$ [mSv]	$\checkmark P$ [Kč]
$\checkmark C_1$	7,5	165073,9
$\checkmark C_2$	7,5	164973,9
$\checkmark C_3$	7,5	134573,9
$\checkmark C_4$	7,5	134473,9
$\checkmark C_9$	6,5	143487,5
$\checkmark C_{10}$	6,5	143387,5
$\checkmark C_{11}$	6,5	113987,5
$\checkmark C_{12}$	6,5	113887,5

Výsledkem optimalizačního procesu bylo pro rok 2000 doporučení změnit u činností 2, 4 a 5 provedení prací. Předpokladem bylo snížení KED o 1 mSv a současně snížení nákladů o 29.600 Kč.

Během generální opravy 3. bloku v roce 2000 byly aplikovány všechny tři nově navržené varianty řešení. Očekávaného snížení kolektivní efektivní dávky bylo dosaženo a skutečnou hodnotou bylo 1,2 mSv.

Výsledkem nákladově přínosové analýzy podle [7] je provést změnu u činností 2, 3, 4 a 5. Rozdíl vůči výsledku nového Mechanismu ALARA je pouze u činnosti číslo 3. Rozdíl je tedy ve 20% rozhodnutí – činností. Přijetí výsledku tohoto mechanismu by však vedlo k nárůstu celkové kolektivní efektivní dávky o 3,5 mSv. To je ovšem s ohledem na požadavek nezvyšování kolektivní efektivní dávky nepřijatelné.

4.2.2 REALIZACE SYSTÉMU ALARA V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN

Nejvýznamnější přínos této práce je užití teoretického řešení problému v novém Systému ALARA v Jaderné elektrárně Temelín.

Užití nového Systému ALARA je dokumentováno v [13] a [8]. Nový Systém ALARA byl prezentován před zástupci mise OSART v říjnu 2001 jako oficiální a hlavní způsob řešení optimalizace radiační ochrany v Jaderné elektrárně Temelín. Mechanismus ALARA je realizován pomocí programu [11].

V současné době obsahuje soubor 71 sledovanou činnost, nebo-li je nyní hodnoceno 48 řetězců posuzovaných činností.

I když je Jaderná elektrárna Temelín v období aktivního spouštění (1. blok), přesto byly aplikací nového Systému ALARA sníženy kolektivní efektivní dávky [18].

5 ZÁVĚR

Cílem dizertační práce byla teoretická analýza optimalizace radiační ochrany (ALARA) se zahrnutím legislativních podmínek platných v České republice a praktická aplikace výsledků teoretického řešení se zohledněním požadavků plynoucích ze specifiky jaderné elektrárny a hospodářské a společenské přijatelnosti.

Byl proveden teoretický rozbor problematiky ALARA. Byla provedena analýza známých algoritmů (technik), které provádějí výběr realizace činností. Výsledkem analýzy byla volba rozšířené nákladově přínosové analýzy pro nový Systém ALARA, což odpovídá i návodu vyplývajícímu z vyhlášky SÚJB č. 184/1997 Sb.

Autorem byl vyvinut nový Systém ALARA, který zahrnuje přípravu personálu, zpracování vstupních dat, mechanismus ALARA, formulace výsledků a byl definován způsob hodnocení výsledků.

Součástí řešení je nový vývojový diagram programu Optimalizace dávek [11], který je schopen zpracovat databázi údajů a nalézt optimální řešení radiační ochrany a provádění činností, který byl zaveden do praxe. Pomocí tohoto programu bylo v disertační práci (kapitola 5) provedeno řešení příkladu doporučeného literaturou [4], dále školského příkladu a skutečných činností prováděných na parních generátorech 3.bloku Jaderné elektrárny Dukovany. Doporučená opatření, která byla výsledkem ALARA analýzy, byla na Jaderné elektrárně Dukovany v roce 2000 přijata k praktickému využívání.

Na základě požadavků ČEZ a.s. byl systém jako celek zaveden v Jaderné elektrárně Temelín.

Práce detailně rozebírá strukturu navrhovaného systému a možnosti, které se při jeho vytvoření a použití nabízejí. Především řeší úlohu optimálního provedení radiační ochrany. Dalším výsledkem je nalezení optimálního provedení radiační ochrany při předem zadané kolektivní efektivní dávce, či stanovení celkových nákladů na radiační ochranu. Díky vazbě variant na stejné koeficienty (jednotkové ceny materiálů, práce, přístrojů etc.) lze kdykoliv změnit tyto hodnoty a opět v krátkém čase nalézt optimální řešení.

Podstatným významem je zcela nové řešení, které odpovídá požadavkům zákona č. 18/97 Sb. a vyhlášky SÚJB č. 184/1997 Sb. a je společensky a ekonomicky přijatelné.

Navržený systém byl srovnán se standardně užívaným programem v rámci EU. Výsledkem srovnání je skutečnost, že nový systém dosahuje ekonomicky a společensky přijatelnějších výsledků a je sladěn s legislativou České republiky. Zároveň poskytuje řešení při zadání cílové kolektivní efektivní dávky.

Obecným cílem je zvyšovat radiační bezpečnost v jaderných zařízeních. Toho lze dosáhnout jen postupným, dlouhodobým vzděláváním pracovníků, využíváním nových postupů a vyhodnocováním výsledků činností. V tomto lze i spatřit smysl této práce.

Závěrem je třeba zdůraznit, že Systém ALARA může být užitečným pomocníkem při rozhodování, ale nelze zapomínat, že při rozhodování pouze napomáhá, nic víc. Nemůže sám o sobě rozhodnutí provést. Konečná odpovědnost totiž zůstává na člověku, který přijímá rozhodnutí.

Seznam zkratk:

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ČEZ-EDU	Elektrárna Dukovany, ČEZ a.s.
ČEZ-ETE	Elektrárna Temelín, ČEZ a.s.
EU	Evropská unie
JE	jaderná elektrárna
JEZ	jaderně energetické zařízení
KED	kolektivní efektivní dávka
NRPB	National Radiation Protection Board (Velká Británie)
PG	parní generátor
RC	regionální centrum
RMS	Dálkový systém radiační kontroly (použitý v ČEZ-ETE)
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
ÚVVVR	Ústav pro výzkum, výrobu a využití radionuklidů

6 LITERATURA

- [1] Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, report ICRP n.26, Ann. ICRP 1 (3). ICRP Oxford 1977.
- [2] Vyhláška 184 SÚJB ze dne 24. července 1997 o požadavcích na zajištění radiační ochrany. Sbírka zákonů České republiky.
- [3] Zákon 18 ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využití jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů. Sbírka zákonů České republiky.
- [4] Stokell P.J., Croft J.R., Lochard J., Lombard J.: EUR 13796 - Alara: From theory towards practice. Luxembourg 1991.
- [5] Hájek R.: Výcvikový program přípravy pracovníků se zdroji ionizujícího záření. Výcvikový program ŠKVS, Brno. ČEZ, a.s. Praha 1997.
- [6] Lefaure C., Schieber C., Croft J.: OPTI-RP. Verze 1.0. Kontrakt č. F13P – CP920033. Počítačový program. CEPN/NRPB.
- [7] Oudiz, A., Croft, J. R., Fleishman, A. B., Lochard, J., Lombard, J., Webb, G. M.: What is ALARA? CEPN Report No. 100, Report to the CEC, September 1986. Oxford 1986.
- [8] Vokálek J.: Program zajištění jakosti ev. č.: 27.08.01 Řízení radiační ochrany v ČEZ-ETE. ČEZ-ETE. Temelín 2000.
- [9] Křivánek R.: Studijní projekt výukového programu principu ALARA v podmínkách provozu VVER. Diplomová práce FS VUT. Brno 1994.

Publikace autora

- [10] Koláček P.: NPP staff training in theory of radiation protection. Proc. of the: 1st International Symposium on Safety and Reliability Systems of PWRs and BWRs. May 22-26, 1995. Brno.
- [11] Koláček P., Kadlec R.: Optimalizace čerpání osobních dávek.(OptimCOD) Počítačový program. ČEZ. Brno 2000.
- [12] Koláček P.: Řešení postupu prokázání rozumně dosažitelné úrovně radiační ochrany použitý v Jaderné elektrárně Temelín. Bezpečnost jaderné energie. (přijato k vydání)
- [13] Koláček, P.: Pracovní postup ev. č.: 27.08.01.01 Implementace principu ALARA. ČEZ-ETE. Temelín 2000.
- [14] Koláček P.: Radiační bezpečnost a radiační kontrola. Skripta ČEZ, a.s. Brno 1998.
- [15] Koláček P.: Radiační bezpečnost a radiační kontrola pro JE VVER 440. Skripta ČEZ, a.s. Brno 1998.
- [16] Koláček P.: Radiační bezpečnost a radiační kontrola pro JE VVER 1000. Skripta ČEZ, a.s. Brno 1998.
- [17] Koláček P.: Implementation of ALARA Principle at the Nuclear Power Plant Temelin. Proc. of the 4th International Symposium on Safety and Reliability Systems of PWRs and VVERs. Brno May 14-17, 2001. Brno, (ISBN 80-238-7405-5)

- [18] Koláček P., Hak J., Vokálek J.: ALARA principle implementation on the Temelin NPP. Proc. of the XXIV.Days of Radiation Protection, conference proceedings. Demänovská dolina. November 26-29, 2001, (ISBN 80-88806-26-27)

7 SUMMARY

This thesis deals with theoretical analysis of radiation protection optimization (ALARA), which conforms to the legislation accepted by the Czech republic. It involves the practical application of theoretical solution with regards to specific requirements for nuclear power plants and acceptable from economic and social point of view.

The new ALARA system, including **ALARA tool**, was established based on the present situation of the ALARA principle, Czech legislative requirements and the thesis aim. While the first part contains the new ALARA system, in the second part this system is applied.

The author created a procedure of securing reasonably achievable level of radiation protection, which is in full compliance with the requirements of the act 18/97 Coll. (so called „atomic act“ of the Czech Republic). This procedure is called the ALARA system and it consists of five components:

- preparation and education of personnel
- input data
- ALARA tool
- results
- evaluation

The personnel preparation is done it two levels of schooling. All workers who enter the Temelin NPP controlled area are trained in the first level. The special course of ALARA in the second level is for ALARA experts. Both types of courses are realized by the author in Czech nuclear power plants.

Input data include the ALARA tool database. They are distributed in following areas: selecting of activities, determining of variants, costs of radiation protection equipment of variants, and collective effective dose of variant.

The new ALARA system is based on **extended cost-benefit analysis**, but it is substantially modified. All variants of activities are evaluated simultaneously. The algorithm for comparison of individual combinations of all variants mentioned is provided. These combinations represent all possibilities for realization of a collection of activities during a time period considered. Using the period between two starts of refueling is evident. The aim is to find such a combination that meets the following two requirements:

The same or lower value of the time period by collective effective dose (CED) reached by presently used performance of activities.

The minimum of the overall costs, i.e. the total of the radiation protection costs and of the health detriment costs (CED).

The aim is to find reasonably achievable level of radiation protection, solution for given CED, evaluation of a **good practice** and a CED plan support. The reduction of CED and radiation protection costs is appreciated. The lowering of these values is presented as a benefit of the ALARA system.

The developed ALARA system was applied on the individual standard example and the hypothetical collection of five activities. As a proof of its functionality the ALARA system was applied in the actual activities performed during the overhaul of the steam generators at the Dukovany NPP. As a result of the ALARA analysis, the recommended measures were used at Dukovany NPP in 2000. A new original procedure on the reasonably achievable norm of radiation protection was implemented in the Temelin NPP.

The main result of this thesis is the new ALARA system being fully in line with the requirements of act 18/97 Coll. and regulatory guide 184/97 Coll. and it is socially and economically acceptable. The new system was compared with the OPTI-RP. The new ALARA system reaches better results from the point of view of social and economic acceptability.

8 AUTOROVO CURICULUM VITAE

V r. 1988 úspěšně zakončil studium na Fakultě jaderného a fyzikálního inženýrství ČVUT Praha, obor jaderné inženýrství - dozimetrie. Během studia na FJFI se podílel na rozvíjení metod použití a vyhodnocení chemických dozimetřů, na nichž pracoval již v době střední školy v Biofyzikálním ústavu ČSAV v Brně. Absolvoval praxi v ÚVVVR Praha a spolupracoval s Výzkumným ústavem klinické a experimentální onkologie v Brně při řešení úlohy kolimace vysokoenergetických svazků.

Po ukončení školy nastoupil do závodu Chirana Incentrum do funkce vědecko-výzkumného pracovníka. Zde pracoval na problémech spojených s připravovanou výrobou elektronových urychlovačů. Ve stejné funkci pracoval od r. 1989 ve Výzkumném ústavu energetických zařízení Brno, kde se zabýval bezdemontážní diagnostikou rotačních strojů JE Dukovany, Jaslovské Bohunice a Mochovce.

Od r. 1991 pracuje na Školicím a výcvikovém středisku jaderně energetických zařízení Brno (ŠKVS JEZ) ve funkci výcvikového inženýra. Specializuje se na problematiku radiační bezpečnosti a radiační kontroly, je spoluautorem

modulového systému přípravy personálu jaderně energetických zařízení a koncepce přípravy personálu radiační bezpečnosti a radiační kontroly JE. Úzce spolupracuje s pracovišti na ČEZ-EDU a ČEZ-ETE, především s ohledem na nové způsoby měření ionizujícího záření v JE a při aplikaci principu ALARA.

V r. 1992 absolvoval školení skupiny „C“ v ŠKVS JEZ a o rok později ukončil doplňkové pedagogické studium na VUT Brno, v r. 1993 zahájil doktorandské postgraduální studium na VUT Brno na téma „Optimalizace radiační ochrany“.

Je autorem a spoluautorem učebních textů z oblasti radiační bezpečnosti a radiační kontroly a scénářů výukových filmů. Absolvoval kurs specialistů systému RMS v USA a ČEZ-ETE nutného pro zajištění přípravy specialistů radiační ochrany pro JE VVER 1000. V r. 1997 absolvoval ve Velké Británii kurs radiační ochrany.

V roce 1998 absolvoval roční praxi v ČEZ-EDU ve funkcích technik radiační bezpečnosti směny a technik dozimetrických laboratoří. V roce 2000 absolvoval roční praxi v ČEZ-ETE ve funkci technik radiační kontroly provozu.

Od roku 1998 je garantem školení pro vstup do KP ČEZ-EDU a od 1.10.1999 i pro KP ČEZ-ETE. Je garantem odborné přípravy vybraných pracovníků se zdroji ionizujícího záření podle vyhlášky SÚJB č.146/1997 Sb.

V roce 2001 se stal členem celostátní odborné zkušební komise SÚJB pro oblast velmi významných zdrojů a odborné zkušební komise při Regionálním centru SÚJB Brno.