

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

PROJEKCE A KONSTRUKCE VYHRAZENÝCH TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ ELEKTRO II

učební text

Tomáš Novák
Barbara Helštýnová
Karel Sokanský
Tomáš Mlčák
Petr Orság

Ostrava 2014



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Název: Projekce a konstrukce vyhrazených technických zařízení elektro II
Autor: Ing. Tomáš Novák, Ph.D., Ing. Barbara Helštýnová, prof. Ing. Karel Sokanský, CSc., Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D., Ing. Petr Orság
Vydání: první, 2014
Počet stran: 232
Studijní materiály pro studijní obor Měřicí a řídicí technika, FEI
Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost
Název: NETFEI - Rozvoj sítí a partnerství mezi Fakultou elektrotechniky a informatiky VŠBTUO a podnikatelským sektorem a institucemi terciálního vzdělávání
Číslo: CZ.1.07/2.4.00/31.0031
Realizace: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, KE
Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3536-5

OBSAH

1	ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY	6
1.1.	Podstata světla.....	6
1.2.	Zrakový systém, zrakové mechanismy.....	8
1.3.	Základní světelně technické pojmy	12
	Další zdroje	26
2	PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	27
2.1.	Základní parametry světelných zdrojů.....	28
	Další zdroje	41
3	SVÍTIDLA	42
3.1.	Druhy a třídění svítidel	43
3.2.	Skladba svítidel	48
3.3.	Elektrotechnické části.....	48
	Další zdroje	54
4	VYBRANÉ KAPITOLY Z MĚŘENÍ OSVĚTLENÍ.	55
4.1.	Základní pojmy.....	56
4.2.	Legislativa.....	60
4.3.	Měření denního osvětlení.....	60
4.4.	Měření umělého osvětlení.....	61
4.5.	Měření dalších parametrů osvětlení.....	63
4.6.	Kvalita měření osvětlenosti	65
	Další zdroje	66
5	VÝPOČTOVÉ METODY V OSVĚTLOVACÍ TECHNICE.....	67
5.1.	Tokové metody	67
5.2.	Bodové metody.....	69
5.3.	Požadavky na výpočetní program	71
	Další zdroje	75
6	DENNÍ A SDRUŽENÉ OSVĚTLENÍ	76
6.1.	Denní světlo.....	79
6.2.	Sdružené osvětlení	87
	Další zdroje	90
7	OSVĚTLOVÁNÍ VNITŘNÍCH PRACOVNÍCH PROSTORŮ	91

7.1.	Osvětlování vnitřních prostorů	91
7.2.	Osvětlování vnitřních pracovních prostor	100
7.3.	Osvětlení obytných prostor	102
7.4.	Nouzové osvětlení.....	106
	Další zdroje	111
8	ŘÍZENÍ PROVOZU OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV	112
8.1.	Řízení a regulace osvětlení.....	112
8.2.	Řídící a kontrolní systémy	114
8.3.	Inteligentní osvětlovací soustavy	118
	Další zdroje	121
9	BEZPEČNOST TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ.	122
9.1.	Bezpečnost konstrukčních řešení	122
10	SPOLEHLIVOST SYSTÉMU.	133
10.1.	Spolehlivost	133
11	HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI PODLE ČSN EN ISO 13849.	143
11.1.	Norma ČSN EN ISO 13849-1	143
12	Úvod do souboru norem IEC 61 508.....	160
12.1.	1.1 Funkční bezpečnost	160
12.2.	1.2 Historický vývoj	161
12.3.	1.3 Základy konstrukce podle IEC 61508.....	167
13	Životní cyklus bezpečnosti a jeho fáze	179
13.1.	2.1 Životní cyklus bezpečnosti.....	179
13.2.	2.2 Fáze životního cyklu funkční bezpečnosti.....	181
14	Management funkční bezpečnosti	192
14.1.	3.1 Cíle a požadavky	192
14.2.	3.2 Implementace managementu funkční bezpečnosti do organizační struktury podniku 193	
14.3.	3.3 Kvalifikace osob v rámci funkční bezpečnosti.....	195
14.4.	3.4 Řídící a technické činnosti funkční bezpečnosti	196
15	Ověřování systémů E/E/PE	199
15.1.	4.1 Hodnocení pravděpodobnosti poruchy hardware	199
15.2.	4.2 Výpočet diagnostického pokrytí a podílu bezpečných poruch.....	206
15.3.	4.3 Účinky systematických poruch souvisejících s hardware E/E/PE	207
16	Praktické příklady.....	213
16.1.	213

16.2.	5.1 Technologie tlakového zásobníku.....	213
16.3.	5.2 Technologie tlakového zásobníku s řídicím systémem.....	221
17	<i>Literatura</i>	229
18	<i>Zkratky</i>	231

1 ZÁKLADY SVĚTELNÉ TECHNIKY



Čas ke studiu: 100 MINUT



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Popis a vysvětlení zrakového systému a podstaty světla.
- Zrakové mechanismy.
- Základní světelně technické pojmy a veličiny – přehled.
- Základní výpočetní vztahy a pojmy.
- Světelně technické vlastnosti hmot.
- Barevné vlastnosti zdrojů a předmětů.



VÝKLAD

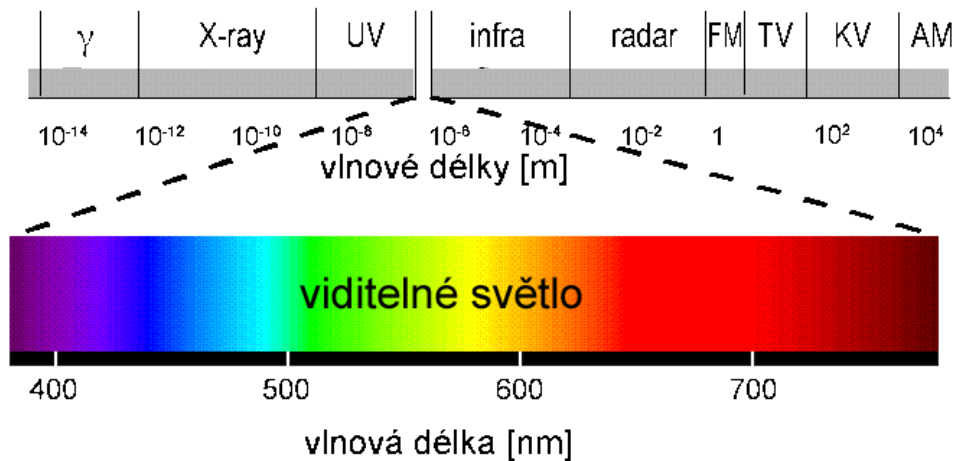
1.1. Podstata světla

Světlo je elektromagnetické záření, které je schopno prostřednictvím zrakového orgánu vzbudit zrakový vjem. Záření lze charakterizovat frekvencí anebo vlnovou délkou. Vlnové délky viditelného světla jsou v rozmezí 380 až 780 nm. S viditelným světlem sousedí ultrafialové záření na straně kratších vlnových délek a infračervené záření na straně delších vlnových délek. Ke vzniku světla v současných světelných zdrojích dochází z hlediska druhu dodávané energie a látky, ve které se tato energie mění na světelnou na těchto základních principech:

- inkandescencí neboli tepelným buzením vznikajícím při zahřátí pevné látky na vysokou teplotu,
- vybuzením atomů v elektrickém výboji,
- luminiscencí pevných látek,
- emisí fotonu při průchodu proudu polovodičem.

Typickým představitelem prvního typu světelných zdrojů jsou obyčejné a halogenové žárovky. Dodávanou energií je energie tepelná, vzniklá průchodem elektrického proudu wolframovým vláknem. Druhý typ představují všechny nízkotlaké a vysokotlaké výbojové zdroje, to znamená zářivky, rtuťové, sodíkové, halogenidové a nové typy výbojek popsané v kapitole světelné zdroje. Světlo zde vzniká při nepružných srážkách atomů, iontů a elektronů ve sloupci výboje, který se nachází v elektrickém poli. Třetí typ vzniku světla je založen na principu přeměny záření o kratší vlnové délce například ultrafialového na viditelné záření o delší vlnové délce. Tento jev nastává v tzv. luminoforu, což je u zářivky světlá vrstva látky nanesená na vnitřní povrch trubice. Zářivka bez luminoforu vyzařuje hlavně na vlnové délce $\gamma = 253 \text{ nm}$. Toto záření patří do oblasti ultrafialového záření. Při použití luminoforu se

ultrafialové záření transformuje do viditelné oblasti. Zářivka s luminoforem vyzařuje podstatně více světla než zářivka bez luminoforu. Poslední princip vzniku světla představují LED diody (světelné diody), i když i u těchto zdrojů lze využít k transformaci emitujícího UV záření luminoforů.



Obr. 1.1 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření

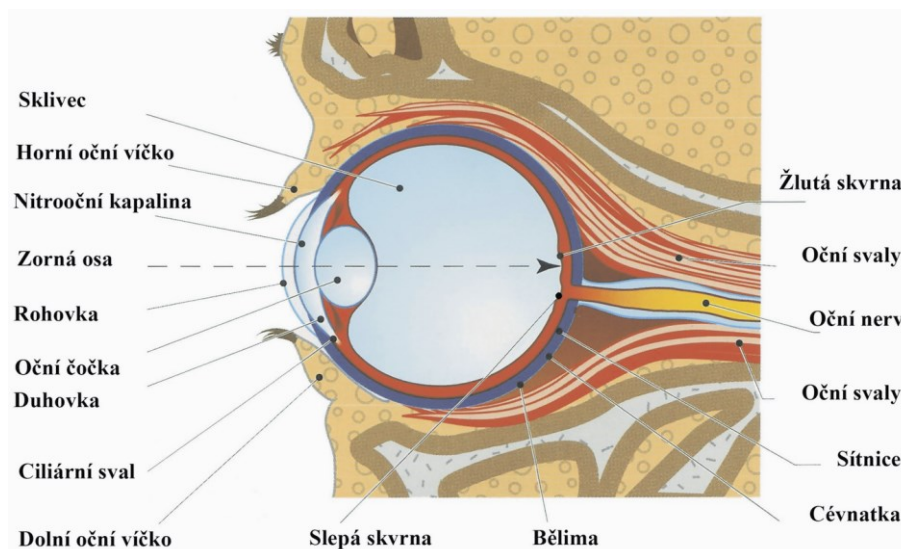
Druh záření	Označení	Vlnová délka λ (nm)	Kmitočet f (Hz)	Energie W_e (eV)
Ultrafialové	UV - C	100 ÷ 280	$(30 \div 10,7) \cdot 10^{14}$	12,4 ÷ 4,4
	UV - B	280 ÷ 315	$(10,7 \div 9,5) \cdot 10^{14}$	4,4 ÷ 3,9
	UV - A	315 ÷ 380	$(9,5 \div 7,89) \cdot 10^{14}$	3,9 ÷ 3,2
Viditelné	fialová	380 ÷ 430	$(7,89 \div 6,98) \cdot 10^{14}$	3,2 ÷ 2,9
	modrá	430 ÷ 490	$(6,98 \div 6,12) \cdot 10^{14}$	2,9 ÷ 2,5
	zelená	490 ÷ 570	$(6,12 \div 5,26) \cdot 10^{14}$	2,5 ÷ 2,2
	žlutá	570 ÷ 600	$(5,26 \div 5,0) \cdot 10^{14}$	2,2 ÷ 2,0
	oranžová	600 ÷ 630	$(5,0 \div 4,76) \cdot 10^{14}$	2,0 ÷ 1,9
	červená	630 ÷ 780	$(4,76 \div 3,84) \cdot 10^{14}$	1,9 ÷ 1,6
Infračervené	IR - A	780 ÷ 1400	$(3,84 \div 2,14) \cdot 10^{14}$	1,6 ÷ 0,9
	IR - B	1400 ÷ 3000	$(2,14 \div 1,0) \cdot 10^{14}$	0,9 ÷ 0,4
	IR - C	3000 ÷ 10000	$(1,0 \div 0,3) \cdot 10^{14}$	0,4 ÷ 0,12

Tab. 1.1 Jednotlivé složky optického záření

1.2. Zrakový systém, zrakové mechanismy

Viditelné světlo je zpracováno zrakovým orgánem ve zrakový vjem. Proces vnímání je velice složitý děj, při kterém fyziologické a také psychofyzikální vlivy mají větší vliv než jevy čistě optické. Zrakový orgán je definován jako soubor složený z oka, optických nervových drah, podkorových zrakových center a části mozkové kůry, jenž mění světelný podnět (záření) v komplex nervových podráždění vytvářejících zrakový vjem.

Zrak, jakožto jeden ze základních smyslů, umožňuje člověku získávat velké množství informací (80-90%) o prostředí, které ho obklopuje. Oko je smyslový orgán obsahující optický aparát a přijímající systém (sítnici), sloužící k vytvoření převráceného, souměrného a neskutečného obrazu. Sítnice je tvořena systémem fotoreceptorů (čípky cca 6,5 milionů, tyčinky cca 125 milionů) a dále velmi složitým systémem neuronů (nervových buněk) a nervových (reléových) spojů, které dopadající obraz registrují, provádějí jeho selekci, užitečnou část informace o obrazu zpřesní a transformují do přenosového systému nervových vláken formou nervových podráždění. Nervová vlákna z celé sítnice se sjednocují ve zrakovém nervu, který vyúsťuje v konečné fázi ve zrakovém mozgovém centru. Centrum nejen pasivně přijímá informace, nýbrž také systémem zpětných vazeb řídí funkci jak optického aparátu oka, tak i sítnice, aby přijímaná informace byla co nejpřesnější a zároveň aby byla oprostěna v co největší míře od rušivých vlivů působících na vstup zrakového ústrojí.



Obr. 1.2 Zrakový orgán

Vidění neboli zrakové vnímání je proces poznávání okolního prostředí. Jedná se o proces příjmu zrakové informace, rozlišení rozdílu (kontrastu) jasů a barev, tvarů, a na základě tohoto identifikace a analýza. To je poznávání předmětů a vztahů mezi nimi a nakonec zařazení do našeho vědomí, buď k okamžitému použití pro danou činnost, nebo k uložení do paměti. **Cílem vidění je tedy poznávání.**

Mezi základní zrakové mechanismy patří akomodace a adaptace.

Akomodace je samovolné přizpůsobení se oka vzdálenosti pozorovaného předmětu. Oko dosahuje akomodací zostření obrazu na sítnici. Akomodace je aktivní proces dosahovaný nervovou činností, při které se mění zakřivení čočky oka. Nejbližší bod, který může plně akomodované oko vidět ostře, se nazývá blízký bod. Tento bod se s přibývajícím věkem vzdaluje a to od 10 cm u dětí do 50 cm u padesátileté osoby.

Adaptace je přizpůsobení se oka různým hladinám osvětlenosti. Oko je schopno vnímat při osvětlenostech od hodnot 0,25 lx (rozeznání základních rysů obličeje) až do 10⁵ lx. Adaptace je dvojitá. Adaptace na tmu trvá až 40 minut. Adaptace na světlo trvá 5 až 7 minut.

Mezi nejznámější vady oka patří krátkozrakost, která se kompenzuje rozptylnými čočkami a dalekozrakost, která se kompenzuje spojnými čočkami. Pokles akomodační schopnosti věkem se nazývá stařecké vidění. Část prostoru, kterou může pozorovatel postřehnout upřeným pohledem bez pohybu oka a hlavy se nazývá **zorné pole**.

Pro posouzení zrakové obtížnosti prováděné práce je důležitý útvar tzv. kritický detail, který si oko umísťuje do centra zorného pole. Kritickým detailem je např. u žáka písmeno v sešitě, u hodináře kolečko nebo šroubek v hodinkách atd. Pro přímé rozlišení kritického detailu je rozhodující jeho bezprostřední okolí. Kritický detail s **bezprostředním okolím** tvoří pozorovaný předmět. Okolí navazující na bezprostřední okolí se nazývá pozadí, zbývající část zorného pole, která se na rozlišení kritického detailu podílí nepřímě, se nazývá vzdálené pozadí. Rozlišení předmětů je založeno na schopnosti zrakového orgánu rozeznat rozdíly jasů rozlišovaných detailů, které musí být dostatečné. **Kontrast jasů K** je definován na základě znalostí jasů rozlišovaného detailu L_a a jasů pozadí L_b dle vztahu:

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} \quad (1.1)$$

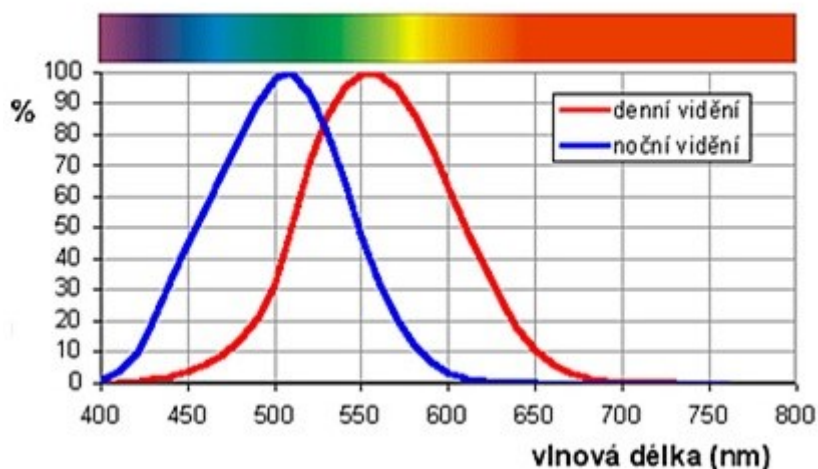
Kde: K ...kontrast (bezrozměrný)

L_a ...jas pozorovaného objektu ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

L_b ...jas pozadí ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

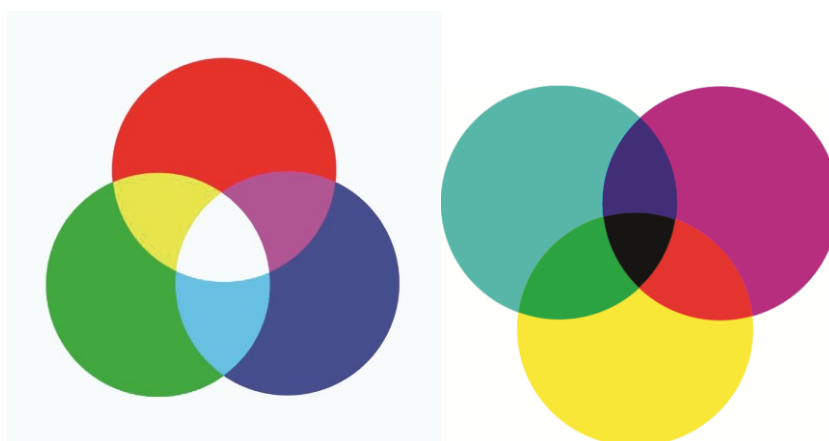
Nejmenší rozlišitelný rozdíl jasů se nazývá **práh rozlišitelnosti jasů**.

Zrakový orgán není stejně citlivý na záření všech vlnových délek. Největší citlivost oka při dobrém osvětlení je na vlnové délce okolo 555 nm. Spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele je dána křivkou spektrální citlivosti, která je normovaná. Při nočním vidění dochází k posunu křivky z maxima 555 nm na hodnotu 507 nm.



Obr. 1.3 Poměrná spektrální citlivost zraku

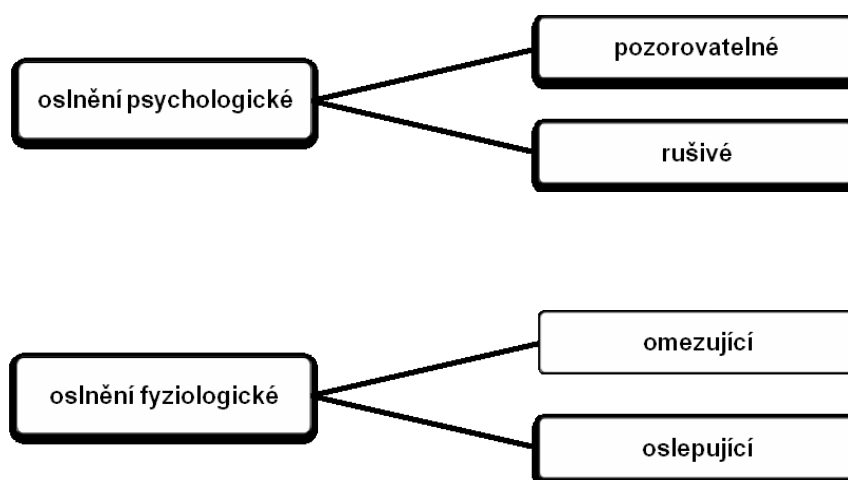
Barevné vidění je schopnost rozlišovat pestré barvy, to znamená barvy, mající barevný tón. Barevné vidění usnadňuje identifikaci barevných předmětů v prostoru a rozšiřuje naše identifikační možnosti. Barevné vidění se vysvětluje tzv. třísloužkovou teorií, to znamená, že v sítnici oka jsou tři různé typy fotoreceptorů, z nichž každý je jinak citlivý na různé vlnové délky. Jeden je citlivý na červenou, druhý na zelenou a třetí na modrou barvu. Všechny ostatní barvy vnímá tím, že dochází k aditivnímu mísení těchto tří základních barev v různých poměrech.



Obr. 1.4 Míchání tří základních barev a míchání doplňkových barev

Vyskytují-li se v zorném poli oka příliš velké jasy nebo jejich rozdíly nebo vzniknou-li časové kontrasty jasů, které výrazně překračují meze adaptability zraku, vzniká oslnění. Oslnění ruší zrakovou pohodu, zhoršuje se, až se znemožňuje vidění. Podle příčiny se rozlišuje jednak oslnění přímé, způsobené nadměrným jasnem svítících částí svítidel nebo hlavních světelně činných povrchů prostoru (např. stropu a stěn při nepřímém osvětlení), jednak oslnění odrazem, způsobené odrazy svítících ploch na lesklých částech pozorovaných předmětů a jejich bezprostředního okolí. Při náhlé změně adaptačního jasů (např. při náhlém přechodu z tmavšího do světlejšího prostředí), které se zrakový systém nestačí dostatečně rychle přizpůsobit, dochází k

oslnění přechodovému. Zvláštním případem je oslnění závoje, které vzniká, je-li před pozorovaným pozadím prostředí s vyšším jasem, např. při pozorování přes osvětlenou záclonu, při mlze před světlomety, zrcadlení ve skle a podobně. Z hlediska světelné techniky je nejdůležitější oslnění kontrastem (relativní oslnění), způsobené tím, že se v zorném poli vyskytnou jasy (např. vlivem primárních či sekundárních zdrojů) příliš vysoké v porovnání s jasnem, na který je zrak adaptován. Podle psychofyziologických následků se oslnění kontrastem člení na:



Obr. 1.5 Rozdělení oslnění podle psychofyziologických následků

Dynamický režim oka souvisí s dvěma mechanismy zrakového orgánu. Jsou to rychlost vnímání a setrvačnost zrakového vjemu.

Rychlost vnímání je dána převrácenou hodnotou doby od vzniku světelného podnětu v zorném poli do jeho uvědomění. Tato doba je především funkcí jasu. Při jasu předmětu v zorném poli $0,15 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ je to 1 s, při jasu $1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ je to asi 0,5 s a zmenšuje se při zvyšování jasu až do $300 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Toto zjištění je důležité všude tam, kde je třeba rychle reagovat. Rychlost vnímání ovlivňuje také zraková pozornost, kontrast jasů, mění se s fyzickým a duševním stavem atd.

Setrvačnost zrakového vjemu je schopnost adaptačních mechanismů udržet zrakový vjem ještě určitou dobu potom, co světelný podnět skončil. Uvádí se, že např. blesk, který trvá několik μs vyvolá vjem, trvajících asi 0,3 s. Mění-li se intenzita světelných podnětů s frekvencí větší než je tzv. frekvence splývání, je zrakový vjem stejný jako při nepřerušovaném světelném podnětu s intenzitou rovnou aritmetickému průměru intenzit přerušovaných podnětů.

Je-li frekvence světelných podnětů nižší než frekvence splývání, může míhající světlo vyvolat nepříjemný pocit, čímž je narušen zrakový vjem. Bylo zjištěno, že rušivost je ovlivněna hlavně amplitudou, tvarem a frekvencí světelných podnětů. Nejvíce ruší frekvence mezi 8 – 12 Hz. Největší míhání světla v závislosti na kolísání napětí vyvolávají žárovky, následují vysokotlaké výbojky, nejméně míhají zářivky (tzv. flickr efekt).

1.3. Základní světelně technické pojmy

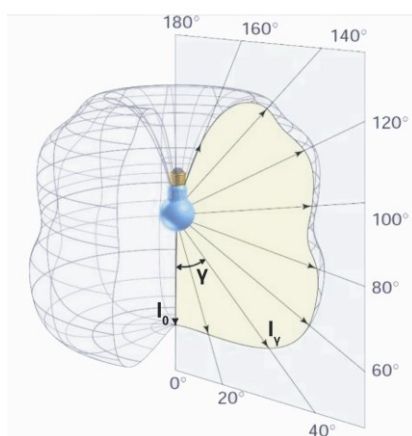
□ Přehled pojmů a veličin

Světelný tok $[\Phi] = \text{lm}$ (lumen)

Světelný tok udává, kolik světla celkem vyzáří zdroj do všech směrů. Jde o světelný výkon, který je posuzován z hlediska lidského oka.

Svítivost $[I] = \text{cd}$ (kandela)

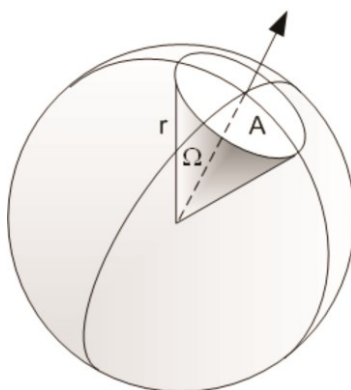
Veličina udává, kolik světelného toku Φ vyzáří světelný zdroj nebo svítidlo do prostorového úhlu Ω v určitém směru.



Obr. 1.6 Definice svítivosti s vyznačením křivek svítivosti

Prostorový úhel $[\Omega] = \text{sr}$ (steradián)

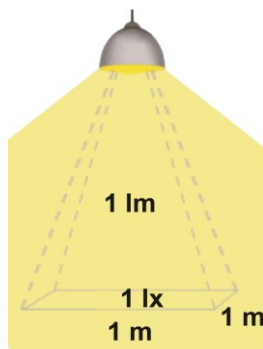
Prostorový úhel je úhel při vrcholu kuželu. Jeho velikost je definována jako poměr kulové plochy A , kterou vyřezává úhel Ω v kulové ploše o poloměru r a druhé mocniny tohoto poloměru ($\Omega = A^2/r$). Prostorový úhel má hodnotu 1 steradián, když vyřízneme z kulové plochy koule o poloměru 1 m s plochou 1 m^2 .



Obr. 1.7 Definice prostorového úhlu

Osvětlenost (intenzita osvětlení) [E] = lx (lux)

Veličina udává, jak je určitá plocha osvětlována, tj. kolik lm světelného toku dopadá na 1 m².



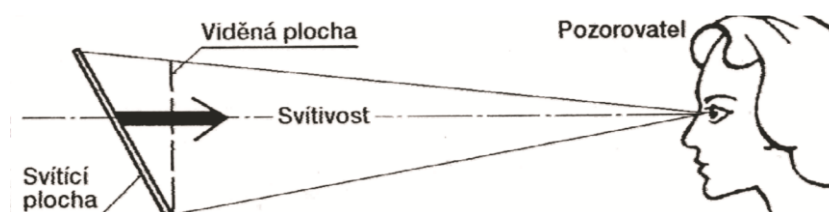
Obr. 1.8 Definice osvětlenosti

Světlení [M] = lm.m⁻² (lumen na metr čtvereční)

Tato veličina stanovuje velikost světelného toku vycházejícího z plochy.

Jas [L] = cd.m⁻² (kandela na metr čtvereční)

Jas je měřítkem pro vjem světlosti svítícího nebo osvětlovaného povrchu. Jas se vypočítá z podílu svítivosti I a průmětu svítící plochy S_p, kterou pozorovatel vidí. Pokud plochu vidíme pod určitým úhlem, bude průmět této plochy menší než skutečná plocha.



Obr. 1.9 Definice jasu

Měrný světelný výkon [η] = lm.W⁻¹ (lumen na watt)

Udává s jakou účinností je ve zdroji světla elektřina přeměňována na světlo, tj. kolik lm světelného toku se získává z 1 W elektrického příkonu. **Maximální teoreticky dosažitelný měrný výkon je 683 lm.W⁻¹ pro monochromatické vyzařování na vlnové délce 555 nm a zanedbání všech ztrát.**

Teplota chromatičnosti [T_c] = K (kelvin)

Teplotou chromatičnosti zdroje je označována ekvivalentní teplota tzv. červeného zářiče (Planckova), při které je spektrální složení záření těchto dvou zdrojů blízké.

Zvýší-li se teplota absolutně černého tělesa, zvýší se podíl modré části spektra a sníží se červený podíl. Žárovka s teple bílým světlem má např. teplotu chromatičnosti 2700 K, zářivka se světlem podobným dennímu má teplotu chromatičnosti 6000 K. Spektrum žárovek a halogenových žárovek je velmi blízké černému zářiči, takže je zřejmá souvislost mezi jejich spektrem a teplotou chromatičnosti.

Index podání barev [R_a] = - (bezrozměrná veličina)

Každý světelný zdroj by měl podávat svým světelným tokem barvy okolí věrohodně, jak je známe u přirozeného světla nebo od světla žárovek. Měřítkem pro tuto vlastnost se stává všeobecný index podání barev R_a daný rozsahem $100 \div 0$.

- $R_a=0$ – nízkotlaké sodíkové výbojky, jejich vyzařování se dá považovat za monochromatické.
- $R_a=100$ – žárovky se spojitým vyzařováním na všech vlnových délkách viditelného světla.

Při stejné barvě světla mohou mít světelné zdroje různé vlastnosti v podání barev.



Obr. 1.10 Teplota chromatičnosti

Provozní účinnost svítidel

Je důležité kritérium hodnocení svítidla. Udává poměr světelného toku vycházejícího ze svítidla ke světelnému toku zdroje, kterým je svítidlo osazeno. (Pozor na použití svítidla pro jiný zdroj, než pro který bylo určeno, může dojít ke snížení účinnosti).

Činitel využití

Je důležitý pro hodnocení celkové účinnosti osvětlovací soustavy. V případě venkovního osvětlení je možno definovat jako poměr užitečného světelného toku, (který dopadá na plochu, kterou chceme osvětlovat) k toku světelných zdrojů. Činitel využití v tomto pojetí tak zahrnuje jak provozní účinnost svítidel, tak směřování světelného toku soustavy do užitečného směru.

Oslnění

Vyskytují-li se v zorném poli oka příliš velké jasy nebo jejich rozdíly, popřípadě vzniknou-li velké prostorové či časové kontrasty jasů, které významně překračují meze adaptability zraku, vzniká oslnění. Oslnění je tedy nepříznivý stav zraku, k němuž dochází, je-li sítnice nebo její část vystavena jasů vyššímu, než na jaký je oko adaptováno. Oslnění je tím větší, čím větší je jas oslňujícího zdroje ve srovnání s jasnem adaptačním, čím větší je prostorový úhel, pod kterým je z daného místa

oslňující zdroj vidět. Dále záleží na poloze oslňujícího zdroje vzhledem k ose pohledu pozorovatele. Oslnění hodnotíme činitelem oslnění.

Život světelného zdroje

Život světelného zdroje je doba funkce zdroje do okamžiku, kdy přestal splňovat stanovené požadavky. Obvykle se vyjadřuje v hodinách. V průběhu činnosti probíhají ve světelném zdroji různé procesy, které způsobují postupné změny jeho parametrů, a určují tak možnosti jeho funkce. V této souvislosti se používá pojem užitečný a fyzický život. Ukazatelem je křivka úmrtnosti, která udává, kolik zdrojů z daného souboru svítí v časovém průběhu až do 50 % výpadků.

Užitečný život je doba funkce zdroje, během níž si jeho parametry zachovávají hodnoty ležící v určitých stanovených mezích. Např. u zářivek je užitečný život definován jako doba, během níž neklesne jejich světelný tok pod 70 % počáteční hodnoty.

Fyzický život je celková doba svícení do okamžiku úplné ztráty provozuschopnosti (např. u žárovek do přerušení vlákna, u výbojek do ztráty schopnosti zapálit výboj).

▣ Základní výpočetní vztahy a pojmy

Měrný (světelný) výkon

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (1.2)$$

Kde: η ...měrný výkon (lm.W-1)

Φ ...světelný tok (lm)

P ...elektrický příkon (W)

U zdrojů bez předřadníků to znamená žárovek, je příkon zdroje totožný s příkonem svítidla, u zdrojů s předřadníkem jako jsou zářivky anebo výbojky je nutno k příkonu světelného zdroje přičíst příkon předřadníku. Např. jednotrubicové svítidlo se zářivkou 36 W bude mít při klasickém předřadníku příkon asi o 5 W vyšší, to je 41 W. Navýšení příkonu pokrývá ztráty v předřadníku.

Svítivost

Pomocí svítivosti jsou popisovány vyzařovací charakteristiky svítidel tzv. křivky svítivosti.

$$I = \frac{\phi}{\Omega} \quad (1.3)$$

Kde: I ...svítivost (cd)
 Φ ...světelný tok (lm)
 Ω ...prostorový úhel (sr)

Osvětlenost (intenzita osvětlení)

Osvětlenost je jedním ze základních parametrů, které se vyhodnocují při výpočtech a měřeních osvětlovacích soustav.

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (1.4)$$

Kde: E ...osvětlenost (lx)
 Φ ...světelný tok (lm)
 A ...osvětlená plocha (m²)

Jas

Využívá se zejména pro řešení osvětlení na komunikacích vyšších tříd.

$$L = \frac{I}{S_p} \quad (1.5)$$

Kde: L ...jas (cd.m⁻²)
 I ...svítivost (cd)
 S_p ...viděná svítící plocha (průmět svítící plochy do směru oka pozorovatele)

Světlení

Světlení se dá nazvat jako inverzní jednotka v osvětlení. Při projektování osvětlovacích soustav se téměř nepoužívá.

$$M = \frac{\Phi_v}{A_v} \quad (1.6)$$

Kde: M ...světlení ($\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$)

Φ_v ...světelný tok vyzářený svítidlem (lm)

A_v ...plocha, ze které světelný tok vyzařuje (m^2)

Celková rovnoměrnost osvětleností (jasů)

Významný ukazatel popisující kvalitu navržené osvětlovací soustavy. Jako problematické postihuje minimální hodnoty osvětleností na osvětlovaných plochách.

$$\frac{E_{\min}}{E_P} \approx \frac{L_{\min}}{L_P} \quad (1.7)$$

Kde: E_{\min} ...minimální osvětlenost v poli kontrolních bodů (lx)

E_P ...průměrná osvětlenost v poli kontrolních bodů (lx)

L_{\min} ...minimální jas v poli kontrolních bodů ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

L_P ...průměrný jas v poli kontrolních bodů ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

Podélná rovnoměrnost osvětleností (jasů)

Hodnota rovnoměrnosti vyhodnocuje jak maximální, tak minimální hodnoty a využívá se zejména při kamerových osvětleních a na komunikacích.

$$\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \approx \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (1.8)$$

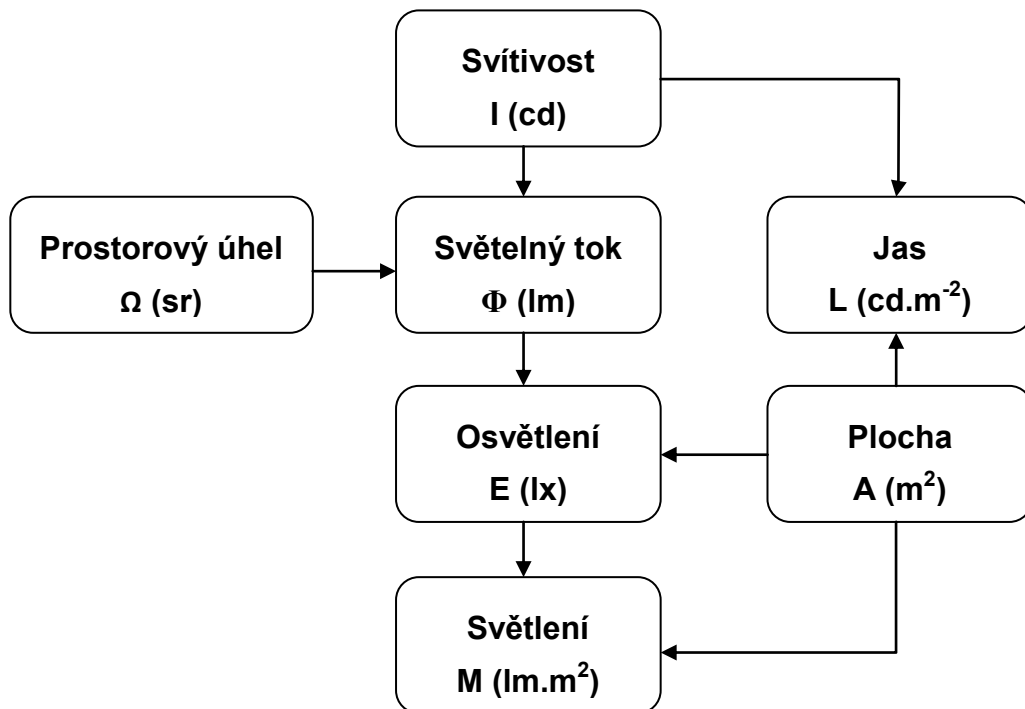
Kde: L_{\max} ...maximální jas v poli kontrolních bodů ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

L_{\min} ...minimální jas v poli kontrolních bodů ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

E_{\max} ... maximální osvětlenost kontrolních bodů (lx)

E_{\min} ...minimální osvětlenost v poli kontrolních bodů (lx)

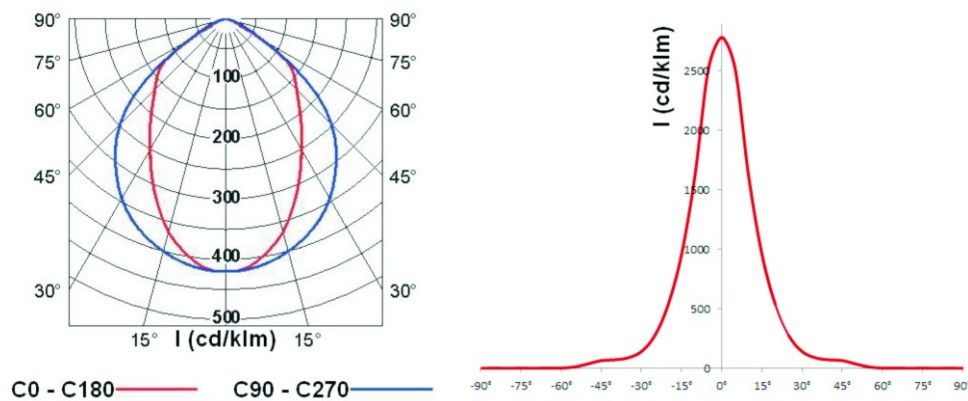
□ Vazby mezi fotometrickými veličinami



Obr. 1.11 Soustava fotometrických veličin

□ Prostorové rozložení svítivosti, křivky svítivosti

Ve světelné technice potřebujeme znát při výpočtech osvětlení svítivosti v různých směrech. Známe-li svítivost svítidla v požadovaném směru, jsme schopni vyřešit i osvětlenost, kterou toto svítidlo v daném směru vyvolá. Prostorové rozložení svítivosti určujeme pomocí fotometrických ploch svítivosti (tzv. křivky svítivosti).



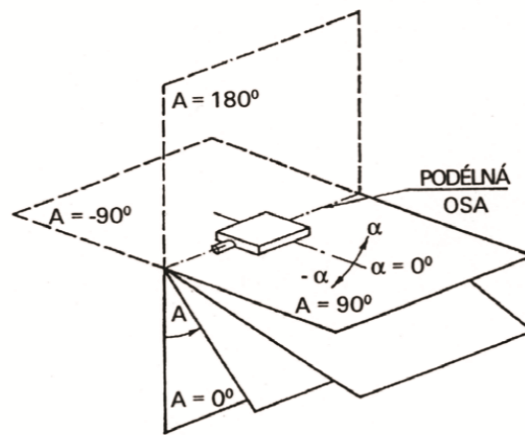
Obr. 1.12 Křivky svítivosti v polárních a pravoúhlých souřadnicích

Fotometrická plocha svítivosti je plocha, která vznikne tak, že se zjistí hodnoty svítivosti zdroje světla ve všech směrech prostoru a nanesou se prostorově od bodu zdroje jako radiusvektory. Spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů dostaneme zmíněnou fotometrickou plochu svítivosti. Při výpočtech obvykle postačuje znát jen některé řezy touto plochou, a to rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V rovinách řezů se takto dostanou čáry (křivky) svítivosti v polárních souřadnicích např. viz obr. 1.11. Počátek diagramu svítivosti se umísťuje do tzv. světelného středu zdroje či svítidla (můžeme si jej představit jako bod, do něhož je soustředěn uvažovaný zdroj). Základní či vztažný směr diagramu svítivosti, od něhož se měří úhly, se obvykle umísťuje do normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Jednotlivé čáry svítivosti se získávají měřeními na speciálních zařízeních (goniofotometrech) a výrobci svítidel, popř. zdrojů je uvádějí v dokumentaci

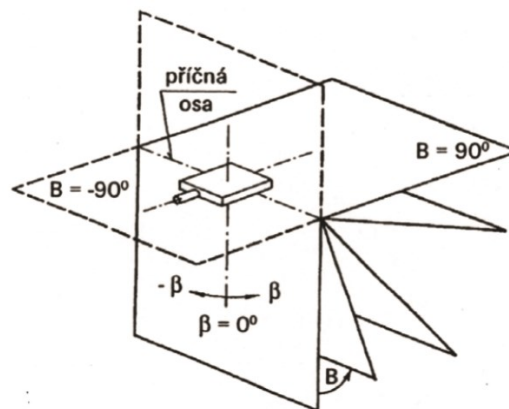
Křivky svítivosti se obvykle udávají v určitých polorovinách vybraných z některých ze tří typů svazků rovnoběžných rovin, jejichž průsečnice (osa svazku) prochází světelným středem svítidla, popř. zdroje. Na Obr. 1.12, 1.13, 1.14 jsou znázorněny soustavy fotometrických polorovin $A-\alpha$, $B-\beta$, $C-\gamma$ doporučených Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE. Nejčastěji se používá svazek polorovin $C-\gamma$, jehož osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla či zdroje. V některých případech je však výhodnější využít křivky svítivosti v polorovinách ze svazku rovin, jehož osa je totožná s podélnou ($A-\alpha$), popřípadě s příčnou ($B-\beta$) osou svítidla.

Aby křivky svítivosti svítidel udávané v katalogích byly nezávislé na skutečném světelném toku použitých zdrojů svítidel, přepočítávají se diagramy svítivosti na světelný tok 1000 lm (1 klm). Skutečná svítivost I_γ svítidla se zdrojem, jehož tok je Φ_z , se určí vynásobením svítivosti I_γ' přečtené z diagramu svítivosti pro 1000 lm poměrem $\Phi_z / 1000$.

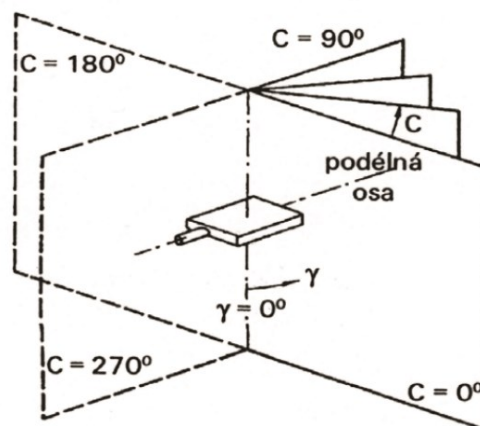
Prostorové rozložení svítivosti by bylo možné znázornit také popsáním bodů na povrchu jednotkové koule hodnotami svítivosti odpovídajícími směru spojnice světelného středu s daným bodem na povrchu koule (střed koule je ve světelném středu uvažovaného zdroje). Poloha jednotlivých bodů na povrchu koule, a tím i uvažovaný směr v prostoru, se určuje v síti rovnoběžek a poledníků. Spojením bodů stejných hodnot svítivosti na povrchu koule vzniknou čáry nazývané izokandely. Nakreslením sítě izokandel se získá izokandelový diagram. Praktická realizace prostorové souřadnicové soustavy je však obtížná. Výhodnější je využít některého ze způsobů zobrazení povrchu koule, popř. polokoule v rovině.



Obr. 1.13 Soustava fotometrických polorovin $A-\alpha$



Obr. 1.14 Soustava fotometrických polorovin $B-\beta$



Obr. 1.15 Soustava fotometrických polorovin $C-\gamma$

□ Osvětlenost (intenzita osvětlení) bodového zdroje

Osvětlenost, která je způsobena bodovým světelným zdrojem lze vypočítat pomocí čtvercového a kosinového zákona viz obr. 1.16 dle následujícího vztahu:

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma \cos \beta}{l^2} \quad (1.9)$$

Kde: $E_{P\rho}$...Osvětlenost od bodového zdroje (lx)

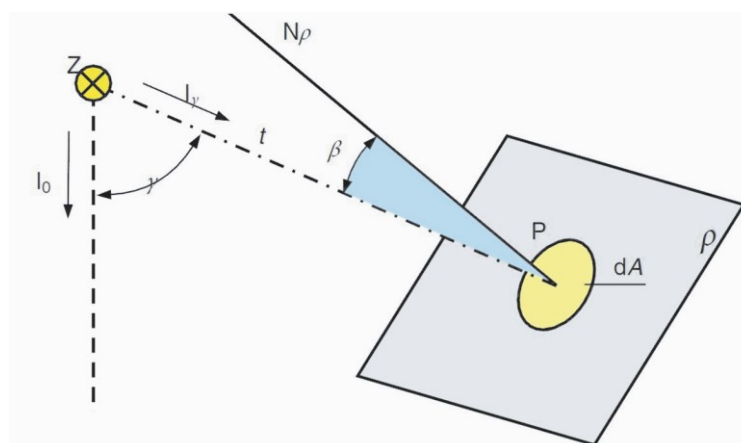
I_γ ...svítivost bodového zdroje (cd)

$\cos\beta$...úhel dopadu paprsku ($^\circ$)

l ...vzdálenost od bodového zdroje (m)

Pomocí tohoto základního vztahu pracují výpočetní programy pro navrhování osvětlovacích soustav. Čtvercový zákon, tedy hodnota l^2 v jmenovateli vzorce nám říká, že osvětlenosti ubývá s kvadrátem vzdálenosti. Zatím co, Kosinův zákon (\cos beta) v čitateli vzorce zohledňuje fakt, že při kolmém dopadu paprsku na podložku je $\cos \beta (0^\circ) = 1$, zatím co zvyšujícím se úhlem \cos beta klesá až do hodnoty 0.

Osvětlenost lze považovat při navrhování osvětlovacích soustav za nejdůležitější veličinu, protože počet luxů pro jednotlivé pracovní činnosti a prostory jsou předepsány v normách pro projektanty jsou tyto hladiny osvětlenosti závazné.



Obr. 1.16 Definice osvětlenosti bodového zdroje

□ Světelně technické vlastnosti hmot

Světelný tok Φ , který dopadá na povrch nějakého tělesa se od tohoto povrchu částečně odrazí Φ_ρ , částečně projde Φ_τ a část tohoto toku je tělesem pohlcena Φ_α . Vzájemný vztah mezi těmito světelnými toky lze vyjádřit zákonem o zachování

energie. Činitelé odrazu ρ , propustnosti τ a pohlcení α jsou bezrozměrné veličiny a jsou dány vztahy:

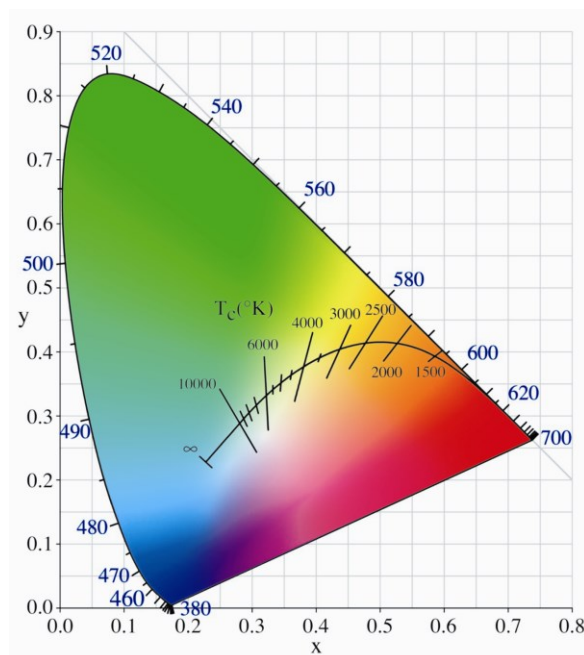
$$\rho = \frac{\phi_\rho}{\phi}; \quad \tau = \frac{\phi_\tau}{\phi}; \quad \alpha = \frac{\phi_\alpha}{\phi}; \quad (1.10)$$

Vzájemný vztah mezi těmito světelnými toky lze vyjádřit také zákonem zachování energie ($\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha$). I vztah mezi těmito integrálními činiteli je vyjádřen zákonem o zachování energie ($I = \rho + \tau + \alpha$).

Ve světelné technice se předpokládá, že materiály se kterými se pracuje odráží respektive propouští záření na všech vlnových délkách stejně. Pokud by tomu tak nebylo, je nutné přejít od integrálních činitelů (ρ, τ, α) k činitelům, které jsou vztaženy k vlnové délce $\rho(\lambda), \tau(\lambda), \alpha(\lambda)$.

□ Barevné vlastnosti zdrojů a předmětů

Světlo vybuzuje nejen zrakový vjem, ale také barevný počitek. Barevné vlastnosti primárních zdrojů se označují názvem **chromatičnost**, barevné vlastnosti sekundárních zdrojů se označují názvem **kolorita**. Záření každé vlnové délky odpovídá určitá spektrální barva, kterou popisujeme **barevným tónem**. Jednotlivé barevné tóny viditelného (bílého) světla se nacházejí Tab. 1.2.



Obr. 1.16 Kolorimetrický trojúhelník

Barvy, které mají barevný tón, jsou barvy pestré, ostatní jsou barvy nepestré. Nepestré barvy nemají barevný tón a tvoří spojitou řadu od bílé až po černou. Ke specifikaci barev se používají trichromatické soustavy Obr. 1.16 a teplota chromatičnosti, Munsellův atlas se používá k určování kolority. Z praktického hlediska je důležitý pojem **podání barev**. Vjem barev určitého předmětu je podmíněn jednak spektrálním složením záření světelného zdroje osvětlujícího předmět a jednak spektrálním činitelem odrazu anebo prostupu pozorovaného předmětu.

Vlnová délka λ (nm)	Barevný tón spektrální barvy
380 ÷ 420	fialová
420 ÷ 440	modrofialová
440 ÷ 460	modrá
460 ÷ 510	modrozelená
510 ÷ 560	zelená
560 ÷ 590	žlutá
590 ÷ 650	oranžová
650 ÷ 780	červená

Tab. 1.2 Barevné tóny viditelného světla

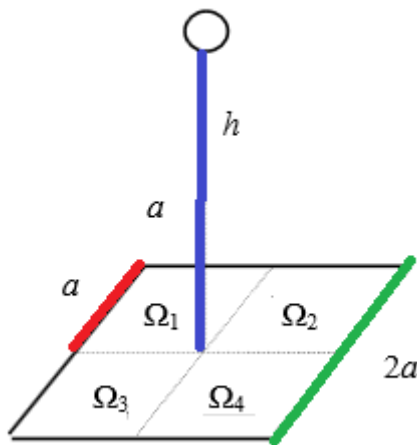


Řešený příklad

Svítivost zdroje je 250 cd, určete prostorový úhel podlahy pro tyto případy:

- a) čtvercová podlaha o straně 5 m, svítidlo je ve středu a ve výšce 3 m,
- b) svítidlo se nachází mimo střed,
- c) svítidlo je mimo půdorys.

a)



$$h = 3m$$

$$2a = 5m$$

$$a = 2,5m$$

$$\underline{\Omega = ? (sr)}$$

V tomto případě platí:

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4$$

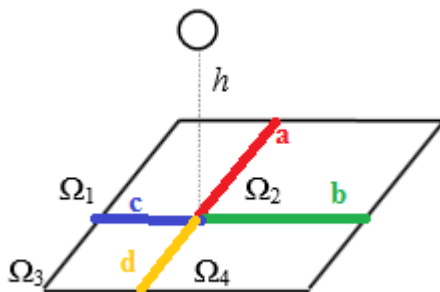
$$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \Omega_4$$

$$\Omega = 4 \cdot \Omega_1$$

$$\Omega_1 = \arctg \cdot \frac{a \cdot a}{h \cdot \sqrt{a^2 + a^2 + h^2}}$$

$$\Omega = 4 \cdot \arctg \cdot \frac{a^2}{h \cdot \sqrt{a^2 + a^2 + h^2}} \Rightarrow 4 \cdot \arctg \cdot \frac{2,5^2}{3 \cdot \sqrt{2,5^2 + 2,5^2 + 3^2}} = \underline{\underline{1,68sr}}$$

b)



$$h = 3m$$

$$a = 2m$$

$$b = 3m$$

$$c = 1m$$

$$d = 2m$$

$$\underline{\Omega = ? (sr)}$$

$$\Omega_1 = \arctg \frac{a \cdot c}{h \cdot \sqrt{a^2 + c^2 + h^2}} = \arctg \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot \sqrt{2^2 + 1^2 + 3^2}} = \underline{\underline{0,19sr}}$$

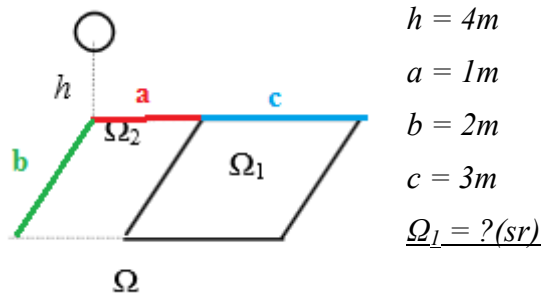
$$\Omega_2 = \operatorname{arctg} \frac{a \cdot b}{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot \sqrt{2^2 + 3^2 + 3^2}} = \underline{\underline{0,40sr}}$$

$$\Omega_3 = \operatorname{arctg} \frac{c \cdot d}{h \cdot \sqrt{c^2 + d^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 1}{3 \cdot \sqrt{2^2 + 1^2 + 3^2}} = \underline{\underline{0,19sr}}$$

$$\Omega_4 = \operatorname{arctg} \frac{b \cdot d}{h \cdot \sqrt{b^2 + d^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot 3}{3 \cdot \sqrt{2^2 + 3^2 + 3^2}} = \underline{\underline{0,40sr}}$$

$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 = 0,19 + 0,4 + 0,19 + 0,4 = \underline{\underline{1,18sr}}$$

c)



$$\Omega = \Omega_1 + \Omega_2 \Rightarrow \Omega_1 = \Omega - \Omega_2$$

$$\Omega = \operatorname{arctg} \frac{(a+c) \cdot b}{h \cdot \sqrt{(a+c)^2 + b^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{(1+3) \cdot 2}{4 \cdot \sqrt{(1+3)^2 + 2^2 + 4^2}} = \underline{\underline{0,32sr}}$$

$$\Omega_2 = \operatorname{arctg} \frac{a \cdot b}{h \cdot \sqrt{a^2 + b^2 + h^2}} = \operatorname{arctg} \frac{1 \cdot 2}{4 \cdot \sqrt{1^2 + 2^2 + 4^2}} = \underline{\underline{0,11sr}}$$

$$\Omega_1 = \Omega - \Omega_2 = 0,32 - 0,11 = \underline{\underline{0,21sr}}$$



Shrnutí pojmů

- Stručný přehled základů světelné techniky.
- Základní pojmy a výpočetní vztahy.
- Základní barevné vlastnosti zdrojů a povrchů, základní světelně technické vlastnosti hmot.



Otázky

1. Definujte pojmy měrný světelný výkon, osvětlenost a svítivost.
2. Vyjádřete vztah pro osvětlenost bodového zdroje + obrázek
3. Vysvětlete pojem čtvercův zákon a kosinovu funkci.
4. Jaké jsou světelně technické vlastnosti hmot?



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

2 PARAMETRY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ



Čas ke studiu: 130MINUT



Cíl:

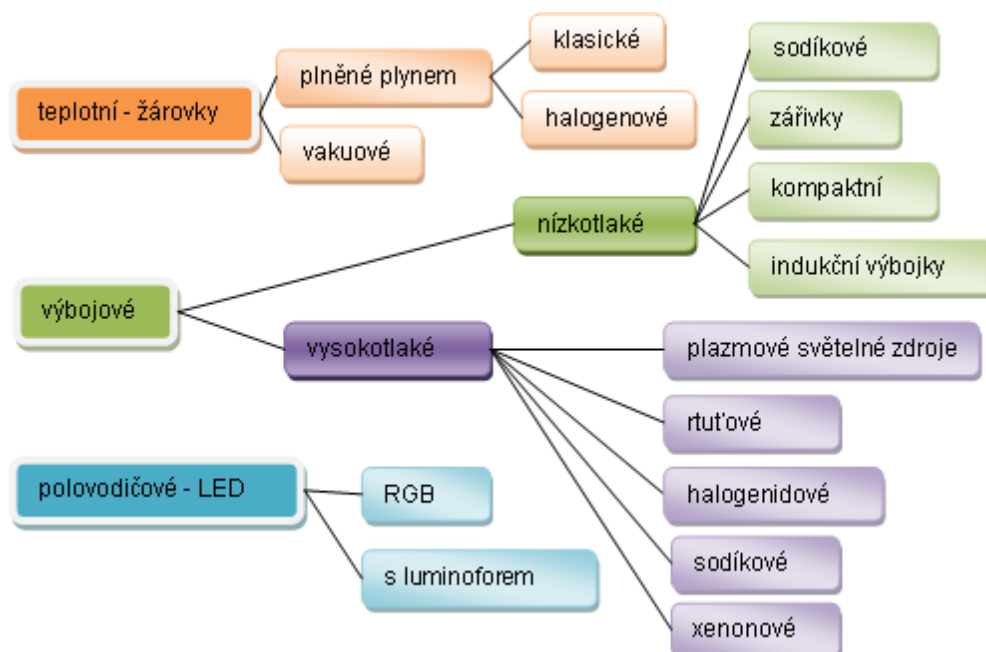
Po prostudování tohoto odstavce budete umět:
 Popis a vysvětlení funkce světelných zdrojů.
 Základní parametry sledované na světelných zdrojích.
 Přehled typů světelných zdrojů a možnost oblasti využití dle jejich vlastností.



Výklad

Úvod

Pro získání přehledu o struktuře světelných zdrojů je v následující tabulce uvedeno jejich základní členění. Při pohledu na tabulku přerozdělení světelných zdrojů, je nutné si uvědomit, že rychlým nástupem moderních polovodičových technologií vstupují do hry nejen světelné zdroje teplotní a výbojové, ale také světelné zdroje na bázi LED diod.



Obr. 2.1 Schematické rozdělení světelných zdrojů

2.1. Základní parametry světelných zdrojů

□ Parametry světelných zdrojů lze rozdělit na kvantitativní a kvalitativní

- Mezi kvantitativní parametry patří vyzařovaný světelný tok Φ (lm) a jejich elektrický příkon P (W). Pro vzájemné porovnání světelných zdrojů je velmi důležitou veličinou měrný výkon η_v (lm.W⁻¹). Tyto parametry jsou důležité zejména pro uživatele a projektanty, kteří potřebují znát celkový příkon osvětlovací soustavy.
- Kvalita světelných zdrojů se posuzuje podle délky jejich života T (hod), podle barevného podání a podle stálosti světelně-technických parametrů.

Mezi důležité vlastnosti patří také geometrické rozměry, tvar, hmotnost, distribuce a možnost úpravy světelného toku. Samostatnou kapitolu pak tvoří pořizovací a provozní náklady.

Světelný tok Φ (lm)

Světelný tok představuje množství světla vyzářeného světelným zdrojem za jednotku času. Světelný tok závisí na druhu a typu světelného zdroje. Pro konkrétní typ světelného zdroje se tento údaj dá najít v katalogu nebo na obalu světelného zdroje. Jednotkou světelného toku je lumen (lm)

Náhradní teplota chromatičnosti T_c (K)

Používáme ji k popisu barevných vlastností světla; u teplotních světelných zdrojů (žárovek) odpovídá teplotě vlákna, u výbojových světelných zdrojů se používá pojem náhradní teplota chromatičnosti, která odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jaký má daný výbojový světelný zdroj. Přehled teplot chromatičnosti pro různé typy světelných zdrojů je v Tab. 2.1.

U světelných zdrojů rozlišujeme tři základní kategorie barvy světla v závislosti na teplotě chromatičnosti:

- teple bílá < 3 300 K,
- bílá 3 300 ÷ 5 000 K,
- denní > 5 000 K.

I když světelné zdroje mohou mít stejnou barvu světla, mohou vykazovat rozdílné podání barev, které závisí na spektrálním složení světla těchto zdrojů. Tyto vlastnosti popisujeme pomocí indexu podání barev.

Druh světelného zdroje	T_c (K)
Zářivka studené denní světlo	6 500 a více
Zářivka denní světlo	5 400
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka studená bílá	4 000
Slunce při západu	3 500 ÷ 4 000
Žárovka, žárovka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	1 800

Tab. 2.1 Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti různých zdrojů světla

Měrný výkon η ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)

Představuje u světelného zdroje míru přeměny elektrické energie na světelnou, tedy definuje vztah mezi produkovaným světelným tokem a elektrickým příkonem světelného zdroje. Elektrický výkon P se přemění na světelný tok Φ , přičemž se zohledňuje to, jak oko vnímá světelné záření. Teoretické maximum vypočtené pro fotonické vidění je $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, neúčinnější světelné zdroje dosahují měrných výkonů až $200 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Přehled měrných výkonů různých typů světelných zdrojů je v tab. 2.2.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2.1)$$

Kde: η ...měrný výkon ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)

Φ ...světelný tok (lm)

P ...elektrický příkon (W)

Všeobecný index podání barev R_a (-)

Hodnota indexu podání barev určuje, do jaké míry je člověk schopen při daném spektru záření světelného zdroje věrně vnímat barvy. Index R_a se získává průměrováním indexů podání 14 zkušebních barevných vzorků. Čím je hodnota indexu vyšší, tím lepší je podání barev. Nejvyšší hodnotu, z umělých zdrojů světla, dosahuje obyčejná žárovka ($R_a = 100$), nejnižší dosahují zdroje monochromatického záření, jako např. nízkotlaká sodíková výbojka ($R_a = 0$).

Druh světelného zdroje	Příkon (W)	Měrný výkon
Žárovka	15 – 200	6 – 15
Halogenová žárovka	10 – 2000	14 – 26
Kompaktní zářivka	5 – 60	56 – 88
Lineární zářivka T8	10 – 58	65 – 90
Lineární zářivka T5	14 – 80	70 – 104
Indukční výbojky	50 – 400	70 – 93
Rtuťová výbojka	50 – 1 000	50 – 80
Vysokotlaká sodíková výbojka	50 – 1 000	88 – 150
Halogenidová výbojka	35 – 3 500	94 – 103
Nízkotlaká sodíková výbojka	18 – 180	130 – 200
Světelné diody	1 – 20	až 140
Xenonová výbojka	25 - 10 000	až 95
Plazmový světelný zdroj	až 250	až 85

Tab. 2.2: Přehled měrných výkonů běžně vyráběných světelných zdrojů

Životnost světelného zdroje (z)

Životnost světelných zdrojů je velmi důležitým parametrem, který nám říká, jak dlouho vydrží daný světelný zdroj hospodárně svítit. U žárovek je přítomna životnost daná mezním stavem – přepálením vlákna. U jiných zdrojů, např. výbojových nebo LED, však s takovou definicí nevystačíme. Během funkčního života zářivky, výbojky nebo LED dochází zákonitě k poklesu světelného toku. Po určitém čase, i když ještě daný zdroj funguje, svítí neekonomicky a vyžaduje výměnu. Rozlišujeme proto dvě definice životnosti:

- **Průměrná životnost** – průměr životností jednotlivých světelných zdrojů osvětlovací soustavy provozované za předem stanovených podmínek. Doba je daná časem, za který bude svítit přesně polovina ze sledovaného počtu světelných zdrojů, tedy míra výpadků dosáhne 50 %. Během trvání postupně dochází k úbytku funkčních světelných zdrojů, což vyjadřuje křivka mortality (úmrtnosti).
- **Užitečná (ekonomická) životnost** – definuje se vzhledem k postupnému poklesu světelného toku zdrojů během života. Konec užitečného života se dosáhne tehdy, když světelný tok zdroje bude na úrovni 80 % jmenovité hodnoty světelného toku (pro LED se často uvažuje 70 %).

Druh světelného zdroje	Průměrná životnost (h)	Užitečná životnost (h)
Obyčejné žárovky	1 000	1 000
Halogenové žárovky	2 000 – 3 000	2 000 – 3 000
Kompaktní zářivky	15 000	6 000 – 15 000
Lineární zářivky	20 000	10 000 – 18 000
Vysokotlaké rtuťové výbojky	16 000 – 24 000	10 000 – 20 000
Vysokotlaké sodíkové výbojky	32 000	20 000
Nízkotlaké sodíkové výbojky	16 000	16 000
Halogenidové výbojky	10 000	4 000
Indukční výbojky	60 000	20 000
Výkonové LED	50 000 – 100 000	25 000 – 50 000
Plazmové světelné zdroje	50 000	50 000
Xenonové výbojky	1 000 – 3 000	1 000 – 3 000

Tab. 2.3 Orientační životnosti pro různé typy světelných zdrojů

□ Třídění světelných zdrojů

Všeobecně můžeme elektrické světelné zdroje rozdělit do třech základních skupin, a to na teplotní (žárovky a halogenové žárovky), výbojové (zářivky či výbojky) a světelné diody (LED).

V teplotních světelných zdrojích dochází průchodem elektrického proudu k zahřátí vodivé látky (kovu) na vysokou teplotu a tato látka vysílá v důsledku tepelného pohybu optické záření.

Výbojové světelné zdroje jsou založené na principu elektrických výbojů v plynech a parách různých kovů a využívají přeměnu elektrické energie na kinetickou energii elektronů, která se při srážkách s atomy plynů mění na optické záření.

Světelné diody (LED) pracují na principu vyzařování energie v podobě fotonů při samovolném návratu elektronů z vybuzeného stavu do základního energetického stavu.

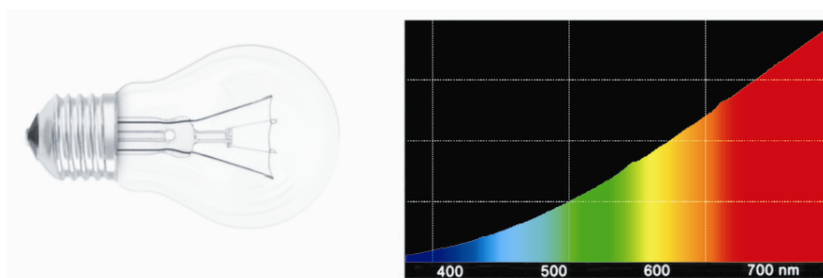
Žárovky a halogenové žárovky

Mezi výhody žárovek patří jejich jednoduchá konstrukce, malé rozměry a hmotnost, jednoduché napájení, nízká cena, okamžitý start, stabilní svícení během celé životnosti, spojitě spektrum, index podání barev $R_a = 100$, široká škála příkonů a napětí, nezávislost na teplotě okolí a fakt, že neobsahují látky, které by enormně zatěžovaly životní prostředí. Nevýhody žárovek spočívají v nízké životnosti, malém

měrném výkonu a výrazné závislosti parametrů na stabilitě napájení – změna napětí o 1 % vyvolá změnu měrného výkonu o 3,6 %.

Odporovým vláknem žárovky, vyrobeným z wolframu, prochází elektrický proud, vznikají ztráty a elektrická energie se nejprve mění na teplo – vlákno se zahřívá. Vlákno zahřáté na vysokou teplotu se stává zdrojem záření. Z principu žárovek vyplývá, že až 95 % dodané elektrické energie se mění na teplo (odváděné zářením v infračervené oblasti spektra, kondukcí a konvekcí) a jen zbylých 5 % se mění na světelné záření.

Žárovky se vyrábějí v různých variantách tvaru baňky (obyčejné, svíčkové, kulové, tvarované, lineární), povrchového zpracování baňky (čiré, matné, opálové, reflektorové, barevné) i velikosti napájecího napětí či typu patice.



Obr. 2.2 Žárovka a příklad jejího spektra

Princip funkce **halogenových žárovek** je podobný principu obyčejných žárovek. Vylepšením je náplň s příměsí halogenních prvků ve vnitřním prostředí baňky (J, Br, Xe). V obyčejné žárovce se postupně ze zahřátého vlákna odpařuje wolfram a usazuje se na vnitřním povrchu baňky. Baňka černá a propouští méně světla. Když se na některém místě vypaří wolfram nad kritickou hranici, příliš tenké vlákno se přepálí. Vypařování wolframu pomáhá zabraňovat tlak náplně plnicího plynu. Delší život je dán i halogenovým cyklem probíhajícím v žárovce: vypařený wolfram se slučuje s halogeny při nižší teplotě (u baňky), sloučenina se vlivem tepelného pole vrací na vlákno, kde se vlivem teploty vlákna rozkládá. Wolfram se na vlákně usazuje a halogen se vrací k povrchu baňky a cyklus se opakuje.

Výhody halogenových žárovek (oproti žárovkám):

- baňka nečerná a má stabilní světelný tok během celé životnosti,
- vyšší měrný výkon až $26 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$,
- delší životnost,
- velká odolnost vůči teplotním změnám,
- vyšší teplota chromatičnosti,
- malý průměr baňky (vyšší tlak plynů, menší rychlost odpařování wolframu).

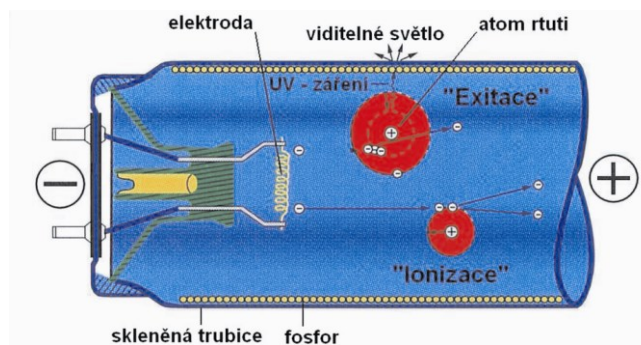
Baňky moderních halogenových žárovek se pokrývají selektivním filtrem (tzv. IRC technologie), který část infračerveného záření vrací zpět na vlákno. Měrný výkon se takto zvyšuje až o 25 %. V praxi se nejčastěji používají halogenové žárovky na malé napětí, často už jako komplet s malým reflektorem.

Současné trendy vývoje halogenových žárovek:

- použití multivrstev s cílem zvýšení měrného výkonu,
- dávkování xenonu do baňky halogenové žárovky,
- dotace „certit“- do křemenného skla baňky na potlačení UV záření,
- vývoj halogenových žárovek na síťové napětí,
- výroba a aplikace různých tvarů baněk pro různé směry využití,
- ovlivňování teploty chromatičnosti dichroickými reflektory (např. změna T_c na cca 4 000 K) – bílá barva světla i při použití halogenových žárovek,
- vývoj nízkotlakých halogenových žárovek,
- miniaturizace baněk a celých halogenových žárovek.

Zářivky a kompaktní zářivky

Zářivky jsou nízkotlakové rtuťové výbojky, které vyzařují hlavně v oblasti ultrafialového záření. Toto spočívá v tom, že se transformuje viditelné záření pomocí luminoforu. Princip funkce zářivek ve skleněné trubici jsou vlivem elektrického pole mezi elektrodami vybudeny páry rtuť, ve kterých dochází k emisi neviditelného UV záření. Speciální látka, luminofor, nanesený na vnitřním povrchu skleněné trubice přeměňuje neviditelné UV záření na světlo. Volbou luminoforu je možné ovlivnit spektrum světla vyzařované zářivkou.



Obr. 2.3 Princip funkce zářivek

Jako všechny výbojky se ani zářivky neobejdou bez předřadných přístrojů. Po zapálení výboje je napětí na zářivce nižší než síťové napětí. V případě použití magnetického předřadníku se na tlumivce vytvoří úbytek napětí, který omezí proud tekoucí zářivkou, v případě použití elektronického předřadníku je proud zářivky řízen elektronickými obvody.

Zářivky typu T5 mají průměr trubice 16 mm, jsou kratší než standardní trubice T8 s průměrem 26 mm. Nabízejí vyšší měrný výkon až $104 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a jsou určeny pouze pro provoz s elektronickými předřadníky. Zářivky T5 dosahují úspor oproti zářivkám T8 v následujících oblastech:

- vyšší měrný výkon zářivek T5 s elektronickým předřadníkem,
- vyšší účinnosti svítidel vlivem nižšího odstínění o 40 % štíhlejší zářivky,
- se zářivkami T5 je možné konstruovat subtilnější svítidla, z čehož plynou další materiálové úspory.

Životnost zářivek je silně ovlivněna počtem zapnutí. Nehodí se proto tam, kde dochází k častému zapínání a vypínání. Podle způsobu provozu se mění i doba života zářivek. Při provozu s klasickým předřadníkem se životnost zářivky pohybuje okolo 10 000 h, zatímco při provozu s elektronickým předřadníkem se pohybuje okolo 18 000 h.

Na rozdíl od žárovek, u kterých světelný tok dosahuje jmenovité hodnoty téměř okamžitě, zářivky dosahují jmenovité hodnoty až po cca 3 min provozu. Zářivky jsou také velmi teplotně závislé, a proto se nehodí pro osvětlování venkovních prostorů. Zářivky lze pomocí elektronického předřadníku stmívat v rozsahu 1-100 % světelného toku.

Zářivky se vyrábějí v širokém spektru náhradních teplot chromatičnosti (od 2 700 do 8 000 K), s indexem podání barev 60 - 98. Existují i speciální zářivky barevné, s prodlouženou servisní životností až 75 000 h nebo s upraveným spektrem pro pěstování rostlin, chov zvířat a další.

Kompaktní zářivky jsou principem shodné s lineárními zářivkami. Jejich trubice jsou však ohnuty nebo zatočeny pro dosažení kompaktnějších rozměrů. Kompaktní zářivky se vyskytují jak s integrovaným elektronickým předřadníkem, tak bez předřadníku (ten je vestavěný ve svítidle). Existují i stmívatelné varianty na napětí 12 V pro provoz v ostrovních systémech nízkého napětí a karavanech. Měrný výkon kompaktních zářivek je nižší (maximálně cca $88 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$) a to kvůli vlastnímu stínění trubice atd.



Obr. 2.4: Lineární zářivka T8 a příklad jejího spektra

Indukční výbojky

Indukční výbojky jsou, stejně jako zářivky, nízkotlaké rtuťové výbojky. Na rozdíl od zářivek nemají elektrody a k zapálení a hoření výboje slouží vysokofrekvenční elektromagnetické pole vyrobené cívkou (cívkami). Používají se výhradně s elektronickým předřadníkem.

Výhody indukčních výbojek:

- dlouhá životnost více než 60 000 h (nedochází k opalování elektrod),
- malý úbytek světelného toku za dobu svícení,
- rychlý náběh světelného toku po zapnutí nebo restartu a na rozdíl od vysokotlakých výbojek možnost okamžitého znovuzápalu,
- vysoký měrný výkon až $93 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.

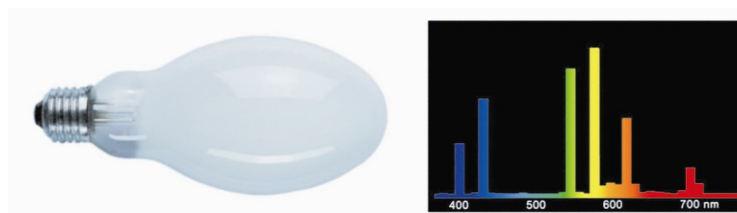
Indukční výbojky se používají v prostorech s vysokou náročností výměny světelných zdrojů (osvětlení tunelů, průmyslových hal, mostů apod). Protože jsou rozměry většiny indukčních výbojek relativně velké, je účinnost svítidel měnících prostorové rozložení světelného toku nízká z důvodu pohlcení části světelného toku světelným zdrojem.



Obr. 2.5 Indukční výbojka Osram Endura (cívky po obvodu) a Philips QL (cívka uvnitř baňky)

Vysokotlaké rtuťové výbojky

Viditelné záření vzniká u těchto zdrojů v obloukovém výboji a v parách rtuti při tlaku 0,1 MPa ve výbojové trubici z křemenného skla. Vysokotlaké rtuťové výbojky vyzařují přímo ve viditelné oblasti asi 15 % přivedené energie a jejich světlo je modrobílé až modrozelené. Záření UV, hlavně na vlnové délce 365 nm, je nutné pomocí luminoforu transformovat do viditelné oblasti.

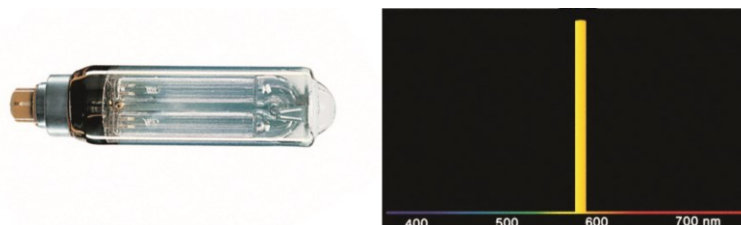


Obr. 2.6 Rtuťová výbojka a příklad jejího spektra

Červená složka světla chybí a z tohoto důvodu se nanáší na vnitřní stěnu venkovní baňky ortofosfátový luminofor pro zabezpečení transformace zbylého UV záření do červené oblasti spektra. K ustálení výboje rtuťových výbojek dochází až po 3 - 5 minutách. Po přerušení výboje dojde k opětovnému znovuzapálení až po 7 minutách. Výhodou těchto výbojek je malý pokles světelného toku během života, odolnost proti změnám teploty a otřesům. Životnost je 12 000 až 15 000 h, hodnota indexu podání barev je 60, měrný výkon 50 až 80 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Výbojky se nehodí k osvětlování vnitřních prostorů z důvodu nízkého R_a a delší doby opětovného znovuzapálení. Z osvětlování průmyslových prostorů, ulic a sportovišť je vytlačily vysokotlaké sodíkové výbojky s vyšším měrným výkonem. De facto jsou již nahrazeny ve všech oblastech jejich použití jinými světelnými zdroji (kvalitnějšími, efektivnějšími) a v nových osvětlovacích soustavách se již nenasazují. V současné době se ještě používají směšové výbojky, světelné zdroje kombinující žárovku se rtuťovou výbojkou, které nepotřebují předřadnou tlumivku.

Nízkotlaké sodíkové výbojky

U nízkotlakých sodíkových výbojek vzniká primární výboj, ve výbojové trubici vyrobené z boritého skla, v plynném argonu a neonu, výboj má klasickou neonovou barvu. Až po určité době, kdy sodík přejde do plynného skupenství, při tlaku sodíkových par 0,5 Pa a teplotě stěny výbojové trubice cca 300°C, se vyzáří monochromatické záření v pásmu vlnových délek 589 a 589,6 nm - ve žluté oblasti spektra. Záření sodíkové výbojky je v blízkosti maxima spektrální citlivosti lidského oka, také proto je její měrný výkon 130 až 200 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$. V jejím světle není možné rozlišovat barvy ($R_a = 0$), životnost výbojky dosahuje až 24 000 h.



Obr 2.7 Nízkotlaká sodíková výbojka a její spektrum vyzáření

Přes značný pokrok a zlepšení jejich užitných parametrů se jejich použití, v důsledku velmi špatného podání barev, omezilo na osvětlení silnic a dálnic. V současné době jsou rozšířeny zejména v zemích Beneluxu a ve Velké Británii. V naší republice, až na vzácné výjimky, nenašlo osvětlení nízkotlakými sodíkovými výbojkami velké uplatnění a vzhledem ke stále se zlepšujícím parametrům vysokotlakých sodíkových výbojek se s jejich rozšířením dále nepočítá.

Vysokotlaké sodíkové výbojky

Výboj v parách sodíku se vyznačuje intenzivním rezonančním dubletem, jako u nízkotlaké sodíkové výbojky, ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589,0 a 589,6 nm. Těchto vlastností se využívá již od třicátých let při konstrukci

nízkotlakých sodíkových výbojek. Se snižováním objemu výbojového prostoru se zvyšuje tlak par sodíku, až při tlaku cca 27 kPa dosahuje maxima a v závislosti na dalších parametrech (složení amalgamu sodíku, druh a tlak plnicího plynu, geometrické parametry hořáku, příkon výbojky apod.) a může dosáhnout hodnoty až $150 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Výbojový prostor u tohoto zdroje musí být vyroben z polykrystalického anebo monokrystalického oxidu hlinitého (syntetický korund). Při rostoucím tlaku par sodíku dochází k výraznému rozšíření spektrálního vyzařování a ke vzniku silného spojitého záření, přičemž zároveň je absorbováno záření rezonanční. Se zvyšujícím se tlakem roste vyzařování do dlouhovlnné části spektra, spektrum záření je bohatší, což má za následek i lepší podání barev osvětlovaných předmětů. Tento druh výboje je využíván u moderních vysokotlakých sodíkových výbojek, které se výrazně prosadí zejména ve veřejném osvětlení.

Sortiment vysokotlakých sodíkových výbojek je velmi široký, příkony se pohybují od 50 do 1 000 W. Index podání barev u těchto zdrojů se pohybuje okolo 25. Výbojka neumožňuje teplý znovuzápal a lze ji rozsvítit až po jejím vychladnutí. Na jmenovitý světelný tok nabíhá až po cca 5 minutách. V oblasti rozsahu venkovních teplot nedochází ke kolísání světelného toku.

Vysokotlaké sodíkové výbojky je nutné provozovat v obvodu s tlumivkou a vhodným zapalovacím zařízením. Při dodržování provozních podmínek (povolené kolísání napětí menší než 5 %, správně dimenzované tlumivky) výbojky předních výrobců dosahují životnosti, až 30 000 h. Ukončení života je dáno postupným nárůstem napětí na výboji. Při překročení určitého poměru tohoto napětí vzhledem k napájecímu napětí sítě výboj zhasne. Po vychladnutí se výboj znovu zapálí a celý cyklus se opakuje. Periodické zhasínání výbojek je příznakem konce životnosti a výbojku je nutné vyměnit.



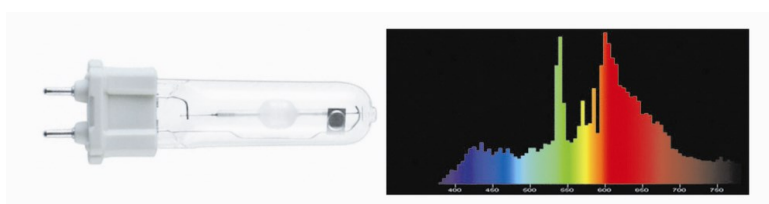
Obr. 2.8 Vysokotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra

Vysokotlaké sodíkové výbojky do osvětlovací praxe přinesly významné úspory elektrické energie, také proto je podíl vysokotlakých sodíkových výbojek ve veřejném osvětlení dominantní. Vysokotlaké sodíkové výbojky mají ve VO univerzální použití: jsou vhodné pro osvětlování veškerých komunikací, pěších zón i osvětlování fasád objektů. Určitou nevýhodou těchto zdrojů je horší barevné podání osvětlovaných předmětů. Pro VO se používají sodíkové vysokotlaké výbojky nízkých příkonů, v obcích 50 – 70 W, ve městech do 150 W, na velkých komunikacích 150 - 250 W, vyšší příkony lze použít na osvětlování fasád budov a vnitřních i venkovních skladovacích ploch bez trvalého pobytu osob (250 – 1 000 W).

Halogenidové výbojky

Viditelné záření zde vzniká jednak v parách rtuti, ale hlavně zářením produktů halogenidů (90 % záření), to je sloučenin halových prvků např. s galiem, thaliem, sodíkem apod. Toto vede ke zvýšení indexu podání barev až na $R_a = 90$ a měrného výkonu až na $130 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.

V hořáku z křemene nebo keramiky vzniká cyklus podobný regeneračnímu cyklu jako u halogenových žárovek. Venkovní baňka je z borosilikátového skla. Halogenidové výbojky pracují při venkovní teplotě -20 až 60°C . Životnost těchto výbojek dosahuje až 15 000 h.



Obr. 2.9 Halogenidová výbojka a příklad jejího spektra

Halogenidové výbojky vyžadují zapalovač. Výkonová řada začíná na 35 W a končí na 3 500 W, výbojky se vyrábějí s různými tvary baňky a typy patice. Na jmenovité parametry nabíhá výbojka asi za 10 min, podle velikosti a příkonu. Halogenidové výbojky se, přes vysokou cenu, začínají prosazovat hlavně tam, kde jsou vysoké požadavky na barevné podání. Halogenidové výbojky menších příkonů se používají při osvětlování výkladů a obchodních prostor, muzeí i výstavních sálů. Větší příkony se uplatňují v osvětlování výstavišť, sportovišť, dopravních uzlů a v průmyslu.

Xenonové výbojky

Xenonové výbojky jsou vysokotlaké výbojky používané dnes hlavně v automobilových světlometech nebo v projekční a osvětlovací technice. Xenonové výbojky potřebují pro zážeh výboje vysokonapěťový impuls (přes 20 kV), provozní napětí na výboji je u většiny typů výbojek pro automobily cca $85 \text{ V} / 100 \text{ Hz}$, proto je třeba pro jejich připojení speciální měnič. Výbojky pro osvětlování v osvětlovací technice bývají v trubicovém provedení, mohou mít příkon až 10 kW a jsou chlazeny vzduchem nebo vodou. Náhradní teplota chromatičnosti je nejčastěji v rozmezí 4 000 – 12 000 K a spektrum vyzařování je podobné dennímu světlu, měrný výkon je až $95 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a životnost cca 2 500 h.

Plazmový světelný zdroj

Od roku 2007 je ve vývoji nový typ výbojového zdroje - plazmový světelný zdroj. V malém hořáku, který je naplněn směsí halogenidů, je zapálen bezkontaktně vysokofrekvenčním mikrovlnným zdrojem. Bezelektrodová konstrukce umožňuje dlouhou životnost až 50 000 hodin a znovuzápal po 60 sekundách. Podle náplně hořáku se R_a pohybuje mezi 80 - 95 a měrný výkon dosahuje $85 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Světelný tok

je podle typu 2 – 20 klm. Tyto výbojky se již používají ve svítidlech pro sportoviště, projekční techniku nebo lékařství.



Obr. 2.10 Xenonová výbojka a plazmový světelný zdroj

Světelné diody - LED

LED se v posledních letech ve stále větší míře využívají ve všech oblastech osvětlovací techniky. Za své rozšíření vděčí především rostoucímu měrnému výkonu. Světelné diody představují elektronický prvek, který generuje světelné záření při průchodu proudu polovodičovým přechodem. Používá tedy jiný fyzikální princip než žárovky nebo výbojky a má mnoho vlastností, kterými se od předchozích klasických zdrojů světla odlišuje. Polovodičový přechod vyzařuje velmi úzké spektrum. Primární záření je v podstatě monochromatické. LED jsou již dnes vysoce účinný světelný zdroj, který se prosazuje namísto konvenčních světelných zdrojů. Technologie LED má velký potenciál rozvoje do budoucna.

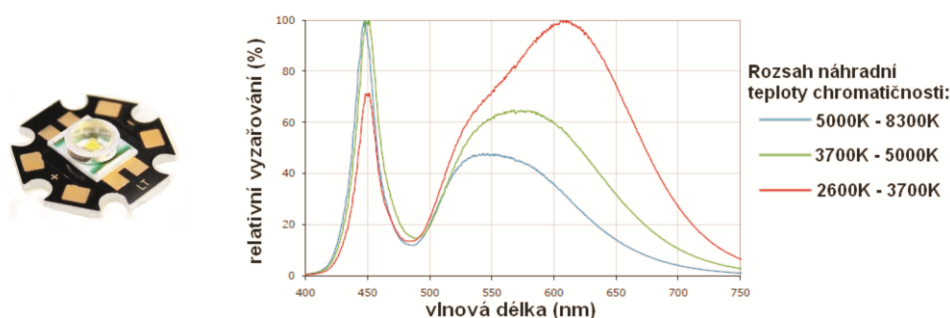
Generování bílého světla

Světlo je vnímáno jako bílé, jestliže jsou tři typy čípků na sítnici oka vybudeny v určitém poměru. V případě bílého světla jsou trichromatické složky lokalizovány v blízkosti centra trichromatického trojúhelníku - viz obr. 2.29. Generovat bílé světlo pomocí LED je možné principiálně dvěma způsoby:

- **mísení monochromatických LED** – bílé světlo lze získat mísením několika komplementárních vlnových délek určitého výkonového poměru. Mísení lze, v závislosti na požadavcích na kvalitu světla. Mísením dvou vlnových délek vznikne dichromatický zdroj. Mísením tří monochromatických LED zářičů (např. RGB), vznikne trichromatický světelný zdroj. Zvyšováním počtu monochromatických složek se zvyšuje kvalita barevného podání výsledného bílého světla,
- **konvertor vlnových délek** – při primárním vyzařování na kratší vlnové délce (nejčastěji v modré oblasti) je část světla absorbována v konvertorovém materiálu a znovu vyzařena jako světelné záření s delší vlnovou délkou. Nejpoužívanější konvertory vlnových délek jsou na bázi fosforu.

Typickým představitelem je bílá LED založená na modrém LED čipu (GaInN/GaN) a fosforovém konvertoru. Záření ve viditelné oblasti, které je vyzařováno z polovodiče, je modré barvy. Část světla je distribuována přímo k

pozorovateli a část krátkovlnných fotonů je v prostoru zapouzdření (fosforová vrstva) absorbována a znova emitována s delší vlnovou délkou ve žlutém spektru. Vyzařované spektrum se skládá z luminiscence modrého světla a fosforescence světla žlutého. Nastavováním vzájemného poměru luminiscence a fosforescence lze optimalizovat nejen náhradní teplotu chromatičnosti, ale také měrný výkon (se vzrůstající T_C klesá) a index podání barev (s klesající T_C roste).



Obr. 2.11 Bílá LED a typická spektra LED s fosforovým lumínoforem

Na obr. 2.11 jsou zobrazena typická spektra bílých LED. LED jsou v současnosti stále v procesu vývoje a jejich měrný výkon stále roste. Po ukončení vývoje se očekává, že měrné výkony těchto světelných zdrojů se budou pohybovat až nad oblastí $200 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Vzhledem k minimálnímu výskytu červené barvy ve vyzařovaném spektru se jako jeden z hlavních problémů LED jeví dosažení vysokého indexu podání barev. Současné technologie ale umožňují dosahování R_a lepšího než 90.

Největším problémem LED je v současnosti odvod tepla z oblasti PN přechodu. Z tohoto důvodu se pohybují jednotlivé zdroje v oblasti příkonů jednotek wattů. Dalším problémem spojeným s odvodem tepla z PN přechodu je snižování světelného toku a životnosti se zvyšující se teplotou přechodu. Naproti tomu mají LED proti klasickým světelným zdrojům nezanedbatelné výhody v jednodušším směřování a rychlejším náběhu světelného toku, mechanické odolnosti a nezávislosti životnosti na spínání a stmívání. K napájení se používá malé stejnosměrné napětí. LED se kvůli své Volt-Ampérové (VA) charakteristice řídí proudem.



Shrnutí pojmů

- Měrný výkon, index podání barev, doba života světelného zdroje.
- Teplotní a výbojové zdroje, LED diody a oblasti použití.



Otázky

1. Definujte pojmy měrný výkon a index podání barev.
2. Nakreslete vektorový diagram zářivky s indukčním předřadníkem.
3. Uveďte výhody a nevýhody kompaktních zářivek.
4. Uveďte vztah pro regenerační cyklus halogenových žárovek.



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

3 SVÍTLIDLA



Čas ke studiu: 70MINUT



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Popis a vysvětlení funkce svítidel, světelně technické parametry svítidel.
- Konstrukční prvky svítidel, geometrické parametry svítidel.
- Třídění svítidel podle světelně technických, elektrických a mechanických parametrů.



Výklad

Úvod

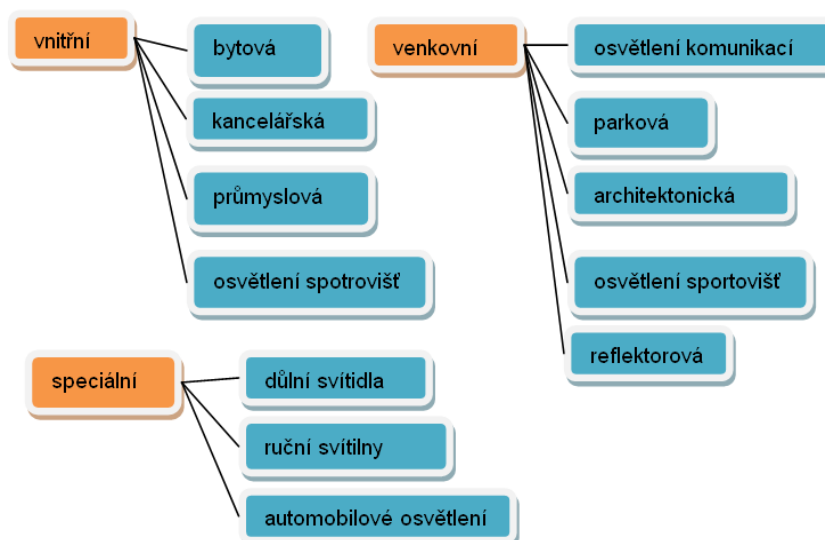
Svítlidla jsou přístroje, které tvoří základní prvky osvětlovacích soustav. Skládají se z části světelně činných, konstrukčních a elektrických částí. Světelně činné části slouží ke změně rozložení světelného toku, k rozptylu toku, k zábraně oslnění, snížení jasu, po případě ke změně spektrálního rozložení světla. Konstrukční části svítidla slouží k upevnění zdroje, k upevnění světelně činných částí, ke krytí zdrojů i světelně činných částí před vniknutím cizích předmětů a vody, musí vyhovovat z hlediska ochrany před nebezpečným dotykovým napětím. Svítidla musí splňovat podmínky jednoduché a snadné montáže, jednoduché údržby, dlouhého života a spolehlivosti. Kromě svítidel se ve světelné technice používají světlometry, které se od svítidel liší tím, že vyzařují směrově soustředěný svazek paprsků a používají se k osvětlování z velkých vzdáleností.

Světelně činné části svítidel slouží ke změně rozložení, usměrnění nebo rozptýlení světelného toku zdrojů, omezení oslnění - omezení jasu svítidla v úhlu, pod kterým může být svítidlo vnímáno pozorovatelem, filtraci – odstranění nežádoucí části spektra vyzařovaného světelným zdrojem.

Konstrukční části svítidla slouží k upevnění zdroje, k upevnění světelně činných částí, k ochraně zdrojů i světelně činných částí před vniknutím cizích předmětů a vody. Svítidla musí splňovat podmínky jednoduché a snadné montáže, jednoduché údržby, dlouhé životnosti a spolehlivosti a z hlediska teploty nesmí být nebezpečná pro své okolí. Elektrické části svítidla slouží k zajištění bezpečné dodávky elektrické energie v požadované formě (U, I, f) do světelného zdroje.

3.1. Druhy a třídění svítidel

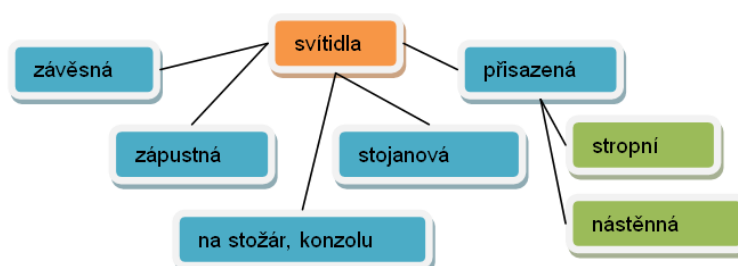
Základní dělení svítidel lze provést podle jejich použití a určení:



Obr. 3.1 Dělení svítidel podle použití

Velmi důležitým hlediskem je použitý světelný zdroj, rozlišujeme proto svítidla pro kompaktní zdroje (žárovky, LED náhrady žárovek a kompaktní zářivky), zářivky (lineární nebo cirkulární), výbojky a LED.

Další používané dělení svítidel se provádí podle typu montáže:



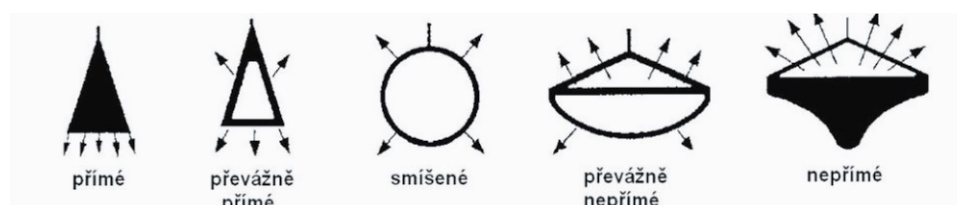
Obr. 3.2 Dělení svítidel podle montáže

Je třeba si uvědomit, že některé typy svítidel (např. zářivková svítidla) existují v různých montážních variantách s jedním typem základního tělesa svítidla. Takto může být svítidlo přisazené na strop nebo pomocí závěsných lanek instalované jako závěsné svítidlo.

Svítidla lze třídit také podle rozložení světelného toku viz tab. 3.1 a obr. 3.3:

Třída rozložení světelného toku	Název	$\Phi_{\text{přímý}} / \Phi_{\text{celkový}}$
I	Přímé	80 – 100 %
II	Převážně přímé	60 – 80 %
III	Smíšené	40 – 60 %
IV	Převážně nepřímé	20 – 40 %
V	Nepřímé	0 – 20 %

Tab. 3.1 Klasifikace svítidel podle rozložení světelného toku



Obr. 3.3 Piktogramy rozložení světelného toku

□ Základní parametry svítidel

Světelný tok svítidla

Světelný tok svítidla Φ_{SV} , který je svítidlem opticky upraven, je dán rozdílem světelného toku všech světelných zdrojů Φ_Z umístěných ve svítidle a světelného toku ztraceného Φ_{ZTR} , který se ztratil při optickém zpracování.

Účinnost svítidla

Účinnost svítidla charakterizuje hospodárnost svítidla a její hodnota je dána poměrem světelného toku svítidla ke světelnému toku světelných zdrojů dle vztahu (3.1).

$$\eta_{SV} = \frac{\phi_{SV}}{\phi_Z} \quad (3.1)$$

Kde: η_{sv} ...účinnost svítidla (-)

Φ_{sv} ... světelný tok svítidla (lm)

Φ_z ...světelný tok všech zdrojů světla ve svítidle (lm)

Maximální účinnost by měl z tohoto hlediska mít holý světelný zdroj v objímce. Ten však není možné použít s ohledem na oslnění, nevhodné směřování vyzařovaného světelného toku a nedostatečnou ochranu před vlivy okolí a nebezpečným dotykem. Z hlediska maximálního využití dodávané elektrické energie je třeba dosahovat vysokých hodnot této veličiny. U běžných svítidel se pohybuje účinnost v rozmezí od 0,5 do 0,8. U LED svítidel a vysoce kvalitních světlometů i přes 0,95.

Jas svítidla

Jas svítidla je definován jako podíl svítivosti v daném směru a velikosti průmětu svítící plochy do roviny kolmé k uvažovanému směru.

$$L_{\gamma} = \frac{I_{\gamma}}{A \cdot \cos \gamma} \quad (3.2)$$

Kde: L_{γ} ...svítivost svazku světelných paprsků (svítící plochy), ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)

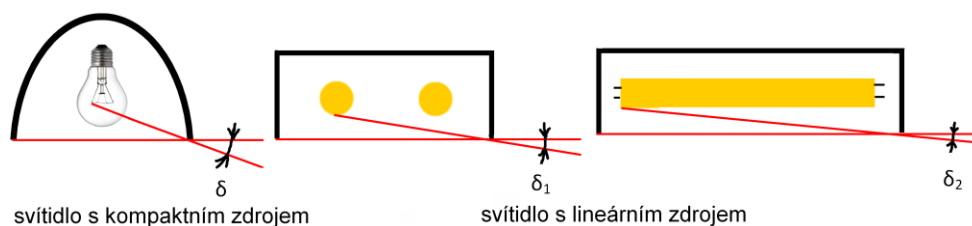
A ...velikost svítící plochy (m^2)

γ ...úhel, o který je viděna plocha natočená od kolmice k ose pohledu

U svítidel pro osvětlování vnitřních prostorů se pro kontrolu na oslnění udávají často jasy v kritické oblasti úhlů od 45° do 85° od vodorovného směru pohledu.

Úhel clonění

Úhel clonění δ udává míru zaclonění světelného zdroje svítidlem. Je to nejmenší ostrý úhel mezi vodorovnou rovinou a přímkou spojující okraj svítidla se světelným zdrojem. U čiré žárovky je to její vlákno, u opálové zářivky nebo výbojky je to povrch baňky.



Obr. 3.4 Úhel clonění u svítidla

Křivky svítivosti

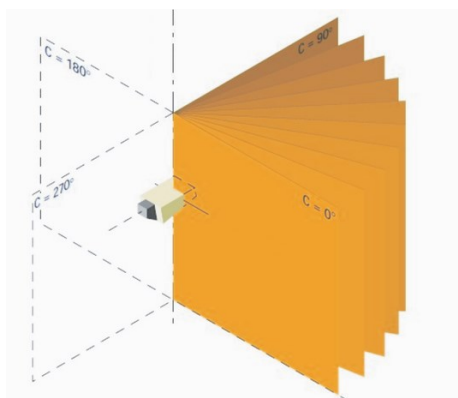
Svítivost představuje velikost světelného toku Φ vyzářeného do daného orientovaného prostorového úhlu Ω . Když je tento úhel velmi malý, mluvíme o svítivosti „v daném směru“. Pro svítidla se udávají křivky svítivosti, což jsou grafy svítivosti v jednotlivých směrech. Svítivost se vypočítá následovně:

$$I = \frac{\phi}{\Omega} \quad (3.3)$$

Kde: I ...svítivost (cd)

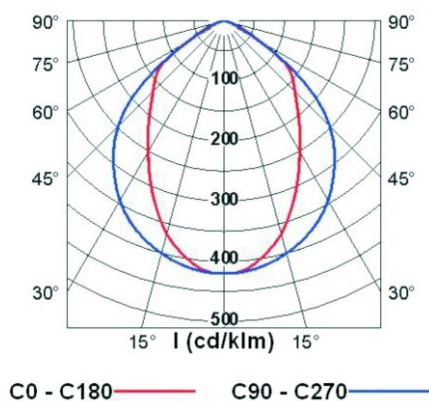
Φ ...světelný tok (lm)

Ω ...prostorový úhel (sr)



Obr. 3.5 Soustava měřících rovin $C-\gamma$

Křivky svítivosti se dají najít v katalogových listech svítidel a poskytují názornou představu o způsobu šíření světelného toku v prostoru. Z křivek svítivosti lze vyčíst např. úhel clonění, směr maximální svítivosti apod. Je však třeba vědět, že křivky svítivosti udávané v katalogu jsou přepočítané na 1000 lm, aby se dala porovnat svítidla s různými světelnými zdroji.






Obr. 3.6 Křivky svítivosti v polárních souřadnicích

Zatímco rotačně symetrická svítidla lze popsat pouze jednou křivkou svítivosti v jedné polorovině řezu svítidlem, pro ostatní svítidla potřebujeme k jejich popisu křivek několik. Na obr. 3.6 je znázorněna soustava měřících rovin $C-\gamma$, které se používají nejčastěji.

□ Třídy ochrany svítidel

Z hlediska elektrické bezpečnosti jsou svítidla klasifikována do následujících tří tříd, viz tab. 3.2.

Třída ochrany I	Označení místa připojení ochranného vodiče ke svorce  , používá se u všech kovových svítidel na nízké napětí
Třída ochrany II	Označení  , ochrana dvojitou nebo zesílenou izolací. Používá se nejen u celoplastových svítidel.
Třída ochrany III	Označení  . Připojení pouze k SELV nebo PELV zdrojům, typicky halogenové žárovky na napětí 12V nebo LED.

Tab. 3.2 Třídy ochrany svítidel

Ochrana proti vniknutí cizích těles, prachu a vlhkosti

Důležitou vlastností svítidla je také stupeň krytí. Vyjadřuje se značkou IP (Ingress Protection) a dvojciferným číslem. První číslo je z rozsahu 0 až 6 a vyjadřuje stupeň ochrany před vniknutím cizích předmětů a před dotykem. Druhé číslo je z rozsahu 0 až 8 a vyjadřuje stupeň ochrany před vniknutím vody. Více v normě ČSN EN 60529. Některé typické stupně krytí u svítidel:

- IP20 – svítidlo s ochranou proti nebezpečnému dotyku (interiérová svítidla),
- IP43 – minimální krytí svítidel používaných pro venkovní prostory,
- IP54 – částečně prachotěsné svítidlo pro špinavé průmyslové prostory,
- IP65 – úplně prachotěsné svítidlo, použití ve veřejném osvětlení.

Ochrana proti mechanickému poškození

Číslo za indexem IK značí u svítidla jeho odolnost proti mechanickému poškození, která je dána minimální nárazovou energií, kterou svítidlo bez funkčního poškození vydrží. Některé typické stupně ochrany:

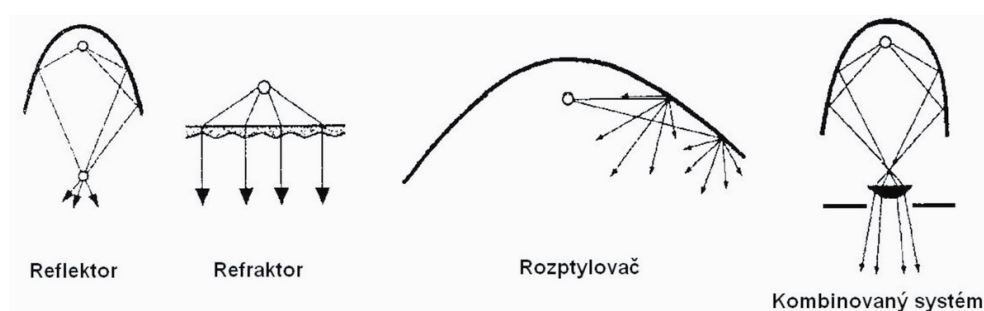
- IK00 – na svítidle bez označení – většina svítidel,
- IK04 – se zpevněným optickým systémem,
- IK07 – zesílený materiál svítidla,
- IK10 – provedení svítidla odolné vandalismu.

3.2. Skladba svítidel

Svítlidla se skládají ze tří základních částí, jako jsou světelně činné části (optika), elektrotechnické části a konstrukční části.

□ Světelně činné části (optika)

Světelně činné části slouží k usměrnění světelného toku jdoucího ze svítidla, tedy k úpravě křivky svítivosti, omezení oslnění a filtraci světelného toku. Na kvalitě optického systému rozhodujícím způsobem závisí parametry celého svítidla, zejména jeho účinnost.



Obr. 3.7: Základní typy světelně aktivních ploch

Usměrnění světelného toku se realizuje pomocí následujících optických prvků nebo jejich kombinací.

Reflektor mění rozložení světelného toku pomocí převážně zrcadlových odrazů. Pro výrobu reflektorů se používají slitiny hliníku potažené kovy s příměsí stříbra se zrcadlovou povrchovou úpravou. Takovéto reflektory jsou, z hlediska dosažení špičkových parametrů svítidel, nejlepší volbou, protože dosahují účinnosti až 95 %.

Refraktor mění rozložení světelného toku podle optického zákona lomu. Refraktory svítidel se vyrábějí nejčastěji ze skla, PMMA, polystyrenu nebo jiných plastů.

Difuzor (rozptylovač) rozptyluje světelný tok odrazem nebo prostupem a vyzářuje světelný tok jako rovnoměrně rozptýlná plocha; rozlišujeme difuzory s rozptylným odrazem a s rozptylným prostupem.

3.3. Elektrotechnické části

Elektrotechnické části přivádějí elektrickou energii k světelným zdrojům (vodiče, objímky) a zajišťují provoz světelného zdroje (předřadník, zapalovač, transformátor).

Objímky se ve svítlidle používají podle typu patice konkrétního světelného zdroje. Nejčastěji se používají tyto druhy patic (objímek): závitové (E14, E27, E40); bajonetové (B15, B22); zářivkové (G5, G13); kolíkové (G23, G24, G7) atd.

Svorkovnice - šroubovací typy jsou v současnosti, zejména u nižších příkonů svítidel, postupně vytlačovány svorkovnicemi umožňující beznastrojové připojení vodičů.

V hůře přístupných místech (např. vysoké průmyslové haly) jsou vnitřní vodiče spojené konektorovými systémy, aby bylo možné jednotlivé bloky (např. blok předřadníku) jednoduše, lehce a také rychle vyměnit (beznástrojová výměna komponentů).

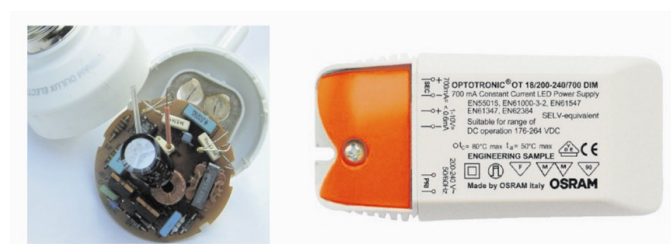


Obr. 3.8 Patice E27, bezšroubová svorkovnice, vodiče, kompenzační kondenzátor

Předřadník se může skládat z jedné části nebo více oddělených částí. Obstarává přizpůsobení napájení, pomáhá vygenerovat zapalovací napětí, eliminuje stroboskopický efekt, upravuje účinník a potlačuje rádiové rušení.

Rozlišujeme tyto základní druhy předřadníků:

- Samostatný předřadník - předřadník, který se může instalovat odděleně od svítidla bez přídavného krytu. Může se skládat z vestavěného předřadníku ve vhodném krytu, který zabezpečuje potřebnou ochranu podle příslušného označení.
- Vestavěný předřadník - předřadník určený jen k zabudování do svítidla, krytu apod.
- Integrovaný předřadník - předřadník, který tvoří nevyměnitelnou část světelného zdroje.



Obr. 3.8 Integrovaný předřadník kompaktní zářivky a samostatný předřadník pro napájení světelných diod (LED driver)

□ Induktivní předřadníky pro zářivky a výbojky

Pro provoz výbojových zdrojů na síťovém napětí jsou i dnes používány indukční předřadníky se zapalovači nebo startéry.



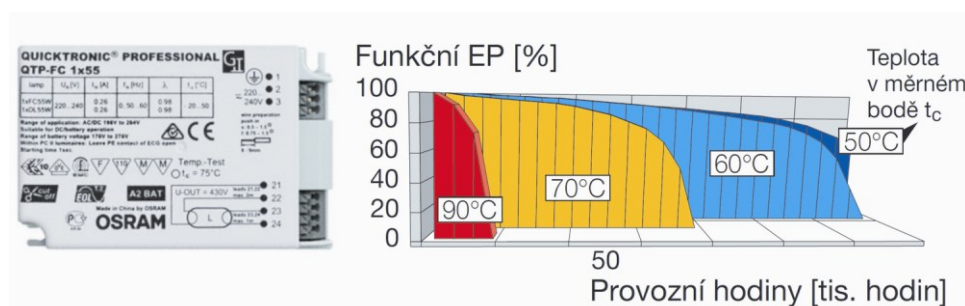
Obr. 3.9 Tlumivka, zapalovač, startér

Tyto předřadníky dnes ale nesplňují požadavky na hospodárný provoz ani komfort a proto se vyskytují hlavně ve starších nebo levných svítlidlech. Jejich prodej omezuje také jejich vysoká výrobní cena daná jejich materiálovou náročností. Stále se používají pouze u výbojek vyšších výkonů.

□ Elektronické předřadníky pro zářivky a výbojky

Výhoda elektronického předřadníku je okamžitý start bez blikání a rychlejší náběh světelného toku na jmenovitou hodnotu, stabilní výboj a úplné potlačení stroboskopického jevu, zvýšení měrného výkonu a prodloužení životnosti světelného zdroje, menší rozměry a hmotnost, možnost stmívání (u speciálních předřadníků) a menší energetické ztráty.

Elektronické předřadníky např. přehřívají vlákna elektrod, čímž umožňují snazší emisi nosičů nábojů. Takový provoz je šetrnější a prodlužuje životnost zářivky. Dnes jsou pro nové typy zářivek T5 (průměr trubice 16 mm) k dispozici inteligentní elektronické předřadníky, které dokážou automaticky rozpoznat typ připojené zářivky a nastavit pro ni optimální parametry.



Obr. 3.10: Elektronický předřadník pro zářivky a vliv teploty na poruchovost elektronických předřadníků

Při výběru předřadníku i konstrukce svítlidla je třeba zohlednit teplotní poměry ve svítlidle. Na obr. 3.10 je dobře vidět, že pokles teploty předřadníku o každých 10°C pak vede skoro ke zdvojnásobení jeho životnosti.

□ Transformátory pro napájení halogenových žárovek

Klasické magnetické transformátory pro napájení halogenových žárovek napětím 12V jsou stále častěji nahrazovány polovodičovými zdroji. Tyto transformátory i zdroje musí mít na sekundární straně SELV – bezpečné malé elektrické napětí bez spojení se zemí, bývají vybaveny i ochranami proti přetížení nebo zkratu na výstupu nebo tepelnou ochranou.

□ Zdroje pro napájení světelných diod

Zdroje pro napájení LED čipů jsou polovodičové konstrukce a jejich úkolem je udržet příkon LED v žádaných mezích. Protože parametry LED jsou v průběhu zahřívání, stárnutí i vlivem výrobních tolerancí různé, jedná se většinou o zdroje konstantního proudu. Nejčastěji používané jsou proudy 350 a 700 mA, popřípadě zdroje stmívatelné s říditelným proudem.

Konstrukční části svítidel

Konstrukční části slouží jako celkový konstrukční nosný základ svítidla (základní těleso), k ochraně před nebezpečným dotykem a proti vniknutí vody a také k upevnění svítidla.

Jako základ svítidla, který může být zároveň jeho krytem, se u interiérových svítidel používají často plastické hmoty nebo tenký plech opatřený komaxitovou barvou. Svítidla určená do venkovních prostor jsou nejčastěji hliníková.

Další požadavky na konstrukční části svítidel:

- světelná stálost,
- teplotní stálost,
- odolnost proti korozi,
- mechanická pevnost.

Světelná stálost materiálů je pro jejich použití ve svítidlech velmi důležitou veličinou. Stálým působením světelného a ultrafialového záření, zesíleného teplem a vlhkostí, dochází k trvalým změnám, např. žloutnutí, vybělení, zkrěhnutí, tvoření trhlin nebo praskání.

Odolnost kovů proti korozi musí být zajištěna účelnou povrchovou ochranou, která ovlivňuje nejen vzhled, ale také světelně-technické vlastnosti materiálu. Aby bylo vyhověno přípustným podmínkám použití, požadovaným světelně-technickým parametrům a estetickým požadavkům, používají se následující povrchové úpravy: lakování, poniklování, pochromování, emailování, pozinkování, kadmiování, nanášení umělých hmot, leštění a eloxování. U plastů je odolnost proti korozi

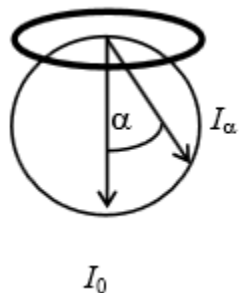
zaručena, a proto nevyžadují dodatečná opatření, mají však podmíněnou stálost proti působení UV záření.

Mechanická pevnost je mírou stability konstrukčních prvků, především u plastů a křemenných skel. Vlivem záření, tepla, chladu a vlhkosti se může změnit mechanická pevnost, a tím i spolehlivost svítidla.



Řešený příklad

Vypočítejte svítivost I_α pro 80° , světelný tok Φ , maximální svítivost I_0 a jas polokoule s průměrem 50cm! Svítidlo s rovnoměrným rozptylem je z mléčného skla s účinností 54%, žárovka má výkon 200W a tok 2740lm.



$$\alpha = 80^\circ$$

$$\eta = 54\%$$

$$P = 200W$$

$$\Phi_z = 2740lm$$

$$d = 50cm = 0,5m$$

$$I_0 = ?(cd)$$

$$I_\alpha = ?(cd)$$

$$\Phi = ?(lm)$$

$$\phi = \phi_z \cdot \eta = 2740 \cdot 0,54 = \underline{\underline{1480lm}}$$

$$\phi = 2\pi \cdot I_0$$

⇓

Pozor jedná se o polokouli!

$$I_0 = \frac{\phi}{2\pi} = \frac{1480}{2\pi} = \underline{\underline{236cd}}$$

$$I_\alpha = \frac{I_0}{2} \cdot (1 + \cos \alpha) = \frac{236}{2} \cdot (1 + \cos 80) = \underline{\underline{139cd}}$$



Shrnutí pojmů

- Princip funkce svítidel.
- Parametry svítidel, jejich konstrukční části.
- Třídění svítidel podle světelně technických a elektrických vlastností.



Otázky

1. Definujte pojmy pro účinnost svítidla a pro jas svítidla.
2. Na jaké konstrukční prvky se dělí svítidla?
3. Jaké jsou požadavky na konstrukční prvky svítidel?
4. Jaký mají význam číslice v kódu IP?



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

4 VYBRANÉ KAPITOLY Z MĚŘENÍ OSVĚTLENÍ.



Čas ke studiu: 90MINUT



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Popis a vysvětlení funkce luxmetru, jasoměru a kolorimetru.
- Typy měření osvětlení.
- Měření denního a umělého osvětlení.
- Legislativa v měření osvětlení.
- Měření jasů a dalších parametrů osvětlení, určení kvality měření osvětlení.



VÝKLAD

Úvod

Měření parametrů osvětlení slouží k objektivnímu vyhodnocení jeho kvality. Popis problematiky měření osvětlení uvedený v následujícím textu se týká základních parametrů a běžného měření.

Měření je činnost, jejímž cílem je určení velikosti fyzikálních veličin a výsledkem měření je číselné vyjádření měřené veličiny se stanovenou mírou (jednotkou). Kromě velikosti měřené veličiny je vhodné určit i nejistotu jejího stanovení.

Pod pojmem fotometrie se rozumí měření světelně-technických veličin. Vlastní měření se dělí na vizuální (subjektivní – metody), při kterých se využívá vlastností lidského zraku a fyzikální (objektivní – metody), a měření probíhá s využitím fyzikálních čidel (fotočlánků). Pro měření platí normy ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel (2005), ČSN 36 0011 Měření osvětlení vnitřních prostorů (2006). Kromě toho existují postupy měření osvětlení v laboratorním prostředí (např. na modelech) a na dopravních komunikacích. Ty zde však nejsou popsány.

4.1. Základní pojmy

□ Typy měření osvětlení

Měření podle požadované přesnosti dělíme na:

- **Přesné měření** – nejistota měření je do 8%.
- **Provozní měření** – nejistota měření je do 15%.
- **Orientační měření** – nejistota měření do 20%.

Typ měření	Odhad rozšířené nejistoty U (%)	Příklady
Přesná	$U \leq 8$	Tvorba normálů, kalibrace přístrojů, laboratorní měření
Provozní	$8 < U \leq 14$	Ověřování parametrů zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav
Orientační	$14 < U \leq 20$	Kontrola funkce osvětlovacího zařízení

Tab. 2.1 Rozdělení měření světelně-technických parametrů podle jejich přesnosti

Dále lze měření dělit podle rozsahu na:

- **Podrobné měření** – pro náročné posouzení prostoru, při soudních sporech nebo při analýze osvětlenosti složitých zrakových činností.
- **Provozní měření** – pro ověření správnosti navržených a realizovaných systémů osvětlování, pro porovnání systémů osvětlované a pro zjištění zrakové pohody (nejpoužívanější typ).
- **Orientační měření** – pro zjištění základních podmínek vidění a pro orientační kontrolu osvětlení.

Na zvolené přesnosti a rozsahu závisí rozsah prací a obsah protokolů z měření.

□ Měřicí přístroje

Luxmetr

Luxmetry jsou přístroje (obr. 4.1) na měření osvětlenosti (rovinné, kulové, válcové, polokulové, poloválcové aj.). Pokud není uvedeno jinak, myslí se pod pojmem luxmetr přístroj na měření rovinné osvětlenosti. Snímací úhel luxmetru pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý k rovině, ve které se určuje osvětlenost. Fotometrická hlava je obvykle vybavena filtrem pro přizpůsobení spektrální citlivosti $V(\lambda)$ a difúzním nástavcem pro korekci směrové chyby fotodetektoru. Snímačem je fotonka a vyhodnocovacím přístrojem analogový nebo digitální mikroampérmetr, který je kalibrován v jednotkách intenzity osvětlení v lx. U běžných luxmetrů se nyní nejčastěji používají fotonky na bázi křemíku.



Obr. 4.1 Luxmetr

Jasoměr

Jasoměr (obr. 4.2) pracuje na stejném principu jako luxmetr, který je doplněn o optiku, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo luxmetru v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém je snímán jas integrován. Měří jas reálných nebo fiktivních povrchů vyzařujících nebo odrážejících světlo. Bývá doplněn optickým systémem, který umožňuje, aby obsluha nasměrovala vlastní měřicí systém přesně na zvolené místo.

Jasový analyzátor je v podstatě digitální fotoaparát, který má opticky nebo softwarově upravenou citlivost podle křivky citlivosti lidského oka $V(\lambda)$. Na rozdíl od klasického jasoměru umožňuje jasový analyzátor snímat jasové mapy s rozlišovací schopností danou prostorovým úhlem snímaným jedním pixelem (makropixelem). K navýšení dynamického rozsahu snímaných jasových map je využíváno softwarové překrývání několika identických snímků pořízených při různých expozičních. Vyhodnocení jasů se provádí pomocí software.



Obr. 4.2 Jasoměr LS-100

Kolorimetr

Je to přístroj k měření kolorimetrických souřadnic světla. Běžně se u nás nepoužívá. Některé jasoměry a luxmetry (např. fy Minolta) mají možnost měřit i kolorimetrické souřadnice světla a možnost vypočítat teplotu chromatičnosti.



Obr. 4.3 Kolorimetr

Spektrofotometry

Spektrofotometr je přístroj k měření spektra optického záření na principu rozkladu světla na mřížce nebo hranolu. Spektrofotometr může měřit následující hodnoty, jako jsou spektrální složení dopadajícího záření, jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice x , y , u , v , náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev, kolorimetrickou čistotu, na obr. 4.4 se nachází spectroradiometr Jeti specbos.



Obr. 4.4 Spektrofotometr

Srovnávací rovina:

Rovina, ve které je umístěn jeden a více kontrolních bodů, kde se provádí měření. Srovnávací rovina může být vodorovná, vertikální nebo i šikmá. Poloha srovnávací roviny se volí tak, aby se na ní nacházely důležité zrakové činnosti nebo alespoň většina z nich. Může být v celé místnosti nebo v její části, na pracovišti nebo v místě zrakového úhlu.

Kontrolní bod:

Bod, na kterém je při měření luxmetrem umístěn střed základny fotonky nebo při měření jasoměrem střed jeho zorného pole.

Nejistota měření:

Nejistota měření (Standardní rozšířená nejistota) je označení intervalu, v němž se s určitou pravděpodobností (nejčastěji se užívá 95 %) vyskytuje správná hodnota.

Kalibrace:

Je to činnost, při níž se pro určitý normál (normálovou hodnotu) zjišťuje odezva sledovaného měřicího přístroje. Výsledkem kalibrace je kalibrační křivka, ze které lze zjistit „správnou“ hodnotu vzhledem k určitému normálu.

Ověřování:

Ověřování se provádí u stanovených měřicích přístrojů podle zákona o metrologii. Provádí jej státní nebo autorizované zkušebny a výsledkem je zjištění, zda vybrané rozhodující parametry odpovídají hodnotám udávaným výrobcem a zda odpovídají Státním normám. U stanovených měřidel se navíc, při jejich zavádění na trh, požaduje provedení typové zkoušky, což je ověření všech parametrů přístrojů podle typových listů. Při vlastním ověřování se potom kontrolují pouze některé důležité parametry.

Úhel měřeného pole:

Tento termín je vztažen k jasoměru a případně k luxmetru s jasovým nastavcem. Jedná se o vrcholový úhel kuželu, jehož vrchol je v ohnisku přístroje a jeho osa je shodná s optickou osou jasoměru. Tímto úhlem je vymezena oblast, ze které dopadá přímý nebo odražený světelný tok na čidlo (fotonku).

Elevační úhel:

Výškový úhel, který svírá normála fotonky nebo optické osy (u jasoměru) s vodorovnou rovinou.

4.2. Legislativa.

Pro měření osvětlení ve vnitřních prostorech platí norma ČSN 36 0011 část 1 až 3. První část normy jsou základní ustanovení, druhá část se týká měření denního osvětlení a třetí část měření umělého osvětlení. Na ní navazují předpisy (normy) pro již specifická měření:

- ČSN 73 0580-2 – definuje místa pro měření denního osvětlení obytných místností
- ČSN EN 132 01 – 4 (*Osvětlení pozemních komunikací*) a
- ČSN EN 1838 – definuje místa pro měření nouzového osvětlení
- ČSN EN 12193 – definuje místa pro měření osvětlení sportovišť
- ČSN EN 12464 - 1 – definuje místa pro měření osvětlení vnitřních pracovních prostor
- ČSN EN 12464 - 2 – definuje místa pro měření osvětlení venkovních pracovních prostor

4.3. Měření denního osvětlení

V tomto základním odstavci jsou popsány specifické požadavky na měření denního osvětlení. Měření denního osvětlení spočívá v kontrole jeho parametrů požadovaných normami:

Činitel denního osvětlení

$$D = \frac{E_i}{E_e} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Kde: D ...činitel denního osvětlení (%)

E_i ...intenzita denního světla naměřená luxmetrem ve vnitřním kontrolním bodě (lx)

E_e ...intenzita denního světla naměřená při rovnoměrně zatažené obloze v horizontální (vodorovné) rovině na nestíněném vnějším referenčním bodě (střecha objektu nebo okolní zvýšený terén),(lx)

Rovnoměrnost denního osvětlení (bezrozměrné číslo)

$$R = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (4.2)$$

Kde: R ...rovnoměrnost denního osvětlení (-)

D_{\min} ...minimální činitel denního osvětlení zjištěný v síti kontrolních bodů ve vodorovné srovnávací rovině ve vnitřním posuzovaném prostoru nebo na pracovní ploše (%)

D_{\max} ...maximální činitel denního osvětlení zjištěný v síti kontrolních bodů ve vodorovné srovnávací rovině ve vnitřním posuzovacím prostoru nebo na pracovní ploše (%)

Rovnoměrnost denního osvětlení se zjišťuje podle zrakové práce v celém prostoru nebo v jeho části. Při posuzování pracovišť pak na pracovní ploše.

4.4. Měření umělého osvětlení

Měří se veličiny – intenzita umělého osvětlení E (lx) a jas L ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$).

□ Příprava měření umělého osvětlení

Měření umělého osvětlení lze provádět u nových osvětlovacích soustav až po 100 hodinách provozu (u zářivkových i výbojkových svítidel) a 10 hodin u žárovkových svítidel, kdy dojde k ustálení světelných poměrů.

Před měřením musí být osvětlovací vysokotlaké výbojkové soustavy zapnuty min. 20 minut a zářivkové soustavy min. 15 minut, aby došlo ke stabilizaci jejich světelného toku.

Při určení sítě dílčích ploch je nutné brát v úvahu umístění svítidel a volit je tak, aby se kontrolní body pokud možno nacházely střídavě pod svítidly a mezi řadami svítidel. Při měření je nutné respektovat světelně technické výpočty a brát v úvahu doporučení na rozteč kontrolních bodů.

□ Postup měření umělého osvětlení

Měření umělého osvětlení se provádí luxmetrem, bez přítomnosti denního světla, buď po setmění oblohy, nebo při úplném zclonění osvětlovacích otvorů (tím se ale poněkud změní podmínky odrazu vnitřních ploch). Měření při denním osvětlení lze provádět pouze výjimečně a orientačně. Postup měření je popsán v normě ČSN 36 0011 - 3.

Pro různé druhy osvětlení (normální, pomocné, bezpečnostní, poruchové, doplňující či technologické) se měření provádí samostatně.

Měří se v síti kontrolních bodů, v požadované srovnávací rovině, v celé ploše místnosti (příp. ploše pracoviště). Při velkých plochách, kde se světelná situace stále opakuje (stejná svítidla, stejně rozmístěná, ve stejné výšce, stejné odrazné plochy atd.), lze provést měření v typické části prostoru (příp. pracoviště), protože průměrná hodnota je téměř stejná.

Souběžně s intenzitou umělého osvětlení je potřebné měřit i napětí ve světelném rozvodu co nejbliže ke svítidlům. Pro podrobné a přesné měření je to nutné, pro provozní doporučené a pro orientační měření se používá údaj sdělený energetikem. Pokud se více liší napětí v el. síti od hodnoty běžné v době využívání, provede se přepočítání na tuto hodnotu podle vztahu v normě ČSN 36 0011 - 3. Napětí měříme buď registračním voltmetrem, nebo číslicovým voltmetrem se záznamem do paměti. Lze také provádět souběžný odečet s hodnotami intenzity osvětlení (podobně jako se měří denní osvětlení). Problém však je, že osvětlovací soustavy nejsou často napájeny jen z jedné fáze a není zřejmé, kterou pro korekci vzít v úvahu. Proto jsou vhodné třífázové voltmetry a bere se pro korekci napětí té fáze, kde dochází k větším změnám. Napětí je nutné kontrolovat i v případě orientačního nebo provozního měření osvětlení a to z důvodu, že zvláště v průmyslových provozech může během měření dojít k zapnutí nějakého spotřebiče s vyšším odběrem el. Energie, a tím k poklesu síťového napětí a následně k poklesu světelného toku svítidel. Potom by zjištěná intenzita v jedné skupině kontrolních bodů nebyla změřena za stejných podmínek jako ve zbývajících bodech a měření se musí opakovat.

Pro podrobné a přesné měření je nutné i měření teploty v okolí svítidel. Na teplotě je závislý světelný tok zdrojů. Přepočítání se provádí pouze při výskytu atypické situace. Pokud teplota je stejná jako při běžném provozu svítidel, uvádí se do protokolu pouze pro informaci. Vzhledem ke zvýšení přesnosti by mělo být měření opakováno ve stejných kontrolních bodech vícekrát a výsledky by měli být zpracovány statistickými metodami (např. Hornovým postupem).

Při měření na pracovních místech se kontrolní body umístí opět v síti tak, aby naměřené hodnoty dobře vystihly nerovnoměrnost intenzity umělého osvětlení. To je zvláště nutné při místním osvětlení pracoviště. Pokud je pracoviště osvětleno dostatečně rovnoměrně, lze použít u menších ploch i měření v jednom bodě uprostřed plochy, kde se provádí zraková práce. Když je plocha úzký obdélník, používá se řada rovnoměrně rozmístěných bodů v její delší ose.

U kombinovaného osvětlení (místní + celkové) se změří ještě hodnota celkového osvětlení (při vypnutém místním).

□ Měření jasů

Měření jasů se provádí za účelem:

- Zjištění činitele odrazu ploch s difuzním odrazem světla: To lze provádět nejlépe luxmetrem s jasovým nastavcem umístěným kolmo k měřené ploše v takové vzdálenosti, aby nedošlo k zastínění měřené plošky. Intenzita umělého osvětlení na ní se změří pak luxmetrem v jejím středu. Ze získaných hodnot se potom vypočítá činitel odrazu plochy.
- Zjištění rozložení jasů v zorném poli pracovníka - při tomto měření je jasoměr umístěn na stativu v místě, kde se při práci nachází zrakový orgán pracovníka. Naměřené hodnoty se vyznačí na fotografii nebo na perspektivním nákresu tohoto místa. Fotoaparát se přitom dá do přibližně stejného místa jako jasoměr. Hodnoty lze uvést do tabulky, ale musí se zaznamenat vertikální i horizontální úhel jasoměru, při kterém byly naměřeny.
- Zjištění jasů světelných zdrojů (primárních i sekundárních) - zde se provádí měření jasoměrem buď v jednom bodě, pokud se viditelná velikost průmětu světelného zdroje blíží velikosti zorného pole jasoměru. V zorném poli musí být pouze měřená plocha a jasoměr musí být na ní zaostřen. Pokud toto nelze, zdroj je větší a nelze již zvětšit zorný úhel jasoměru, musí se měřit ve více bodech tak, aby jednotlivá zorná pole jasoměru pokryla měřený předmět. Z těchto hodnot se potom spočítá aritmetický průměr. Pokud je průmět zdroje menší, musí se použít menší zorný úhel jasoměru.

4.5. Měření dalších parametrů osvětlení

Odraznost ploch

Činitel odrazu ploch s rovnoměrným odrazem světla (lesklé plochy takto nelze posuzovat) se zjistí na základě vztahu:

$$\rho \cdot E = \pi \cdot L \quad (4.3)$$

Kde: E ...intenzita osvětlování na posuzované ploše (lx)

L ...jas posuzované plochy ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)

ρ ...činitel odrazu (-)

Při měření nesmí dojít k zastínění měřené plochy pracovníkem provádějícím měření. Při posuzování činitele odrazu větších ploch se musí předpokládat, že mohou být různě znečištěné a tak se provede stanovení v kontrolních bodech rovnoměrně umístěných po ploše a aritmetický průměr těchto hodnot lze uvažovat jako střední činitel odrazu.

Činitel odrazu lze zjistit i porovnávací metodou, kdy se změří jas kontrolované plošky a pak jas normálu o známém činiteli odrazu. Činitel odrazu kontrolované

plošky je úměrný poměru jejího jasů ku jasů normálové plošky násobeného činitelem odrazu normálu

Činitel prostupu světla

- **Difuzní činitel prostupu** se zjistí se z podílu změřené intenzity luxmetrem přiloženým na zasklení osvětlovacího otvoru zevnitř ku intenzitě na stejném místě při otevřeném osvětlovacím otvoru. Kontrolní místo musí být identické a musí být zajištěna stejná horizontální venkovní intenzita osvětlení. Lze to přepočtem naměřených hodnot na její stejnou velikost.
- **Normálový činitel prostupu** se zjistí z podílu změřeného jasů oblohy nebo jiného pozadí, jasoměrem umístěným kolmo k zasklení, ku jasů ve stejném kontrolním bodě bez zasklení (otevřené okno apod.).

Činitel znečištění

Měření se provádí podobným způsobem jako u činitele prostupu světla (difuzního nebo normálového).

Provádí se měření:

- při zasklení očištěném zvenku
- při zasklení očištěném zevnitř

Podíl zjištěné hodnoty ku hodnotě oboustranně vyčištěného zasklení udávají v prvním případě vnější činitel znečištění a ve druhém případě vnitřní činitel znečištění. Celkový činitel znečištění je pak součin obou hodnot.

U svítidel se měří intenzita osvětlení v kontrolním bodě pod svítidlem nebo jas svítidla před vyčištěním a na tom samém místě po vyčištění. Poměr těchto hodnot udává činitel znečištění svítidla. Předpokladem je měření za stejných podmínek (stejná síťové napětí atd.)

Měření válcové a kulové osvětlenosti i světelného vektoru

K měření těchto parametrů osvětlení se používají také luxmetry, ale opatřené nastavci pro měření válcové a kulové osvětlenosti. Při měření světelného vektoru se potom používá buď speciálního čidla vybaveného až šesti fotonkami, které musí mít stejné vlastnosti. Nebo lze však použít jednu fotonku, kterou musíme natáčet při měření válcové osvětlenosti ve čtyřech (na sebe kolmých) vertikálních rovinách. U kulové osvětlenosti a u světelného vektoru pak natáčením v šesti rovinách podle povrchu fiktivní krychle.

Kontrolní bod při měření kulové (sférické) nebo válcové (cylindrické) osvětlenosti a světelného vektoru se umísťuje vždy 1,2 m (sedící osoba) nebo 1,5 m (stojící osoba)

nad podlahou. Pro posouzení místnosti pak uprostřed její délky i šířky ve vzdálenosti 1 m od stěn.

4.6. Kvalita měření osvětlenosti

Kvalita měření osvětlenosti závisí na:

- Na znalostech a zkušenostech pracovníka, který jej provádí.
- Na kvalitě přístrojů a jejich kalibraci.
- Na volbě kontrolních bodů.
- Na zpracování výsledků.



Shrnutí pojmů

- Měření denního a umělého osvětlení pomocí luxmetru, jasoměru a určení dalších parametrů osvětlení (např. pomocí kolorimetru).
- Legislativní odkazy na měření osvětlení, postup měření.
- Vztahy pro určení denního osvětlení, rovnoměrnosti a výpočet odraznosti ploch.



Otázky

1. Definujte vztah pro činitele denního osvětlení.
2. Vyjádřete vztah pro určení rovnoměrnosti denního osvětlení a popište jej.
3. Jaké jsou měřené veličiny u umělého osvětlení?
4. Na čem závisí kvalita měření osvětlení?
5. Uveďte normy týkající se měření osvětlení.



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

5 VÝPOČTOVÉ METODY V OSVĚTLOVACÍ TECHNICE



Čas ke studiu: 80 MINUT



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:
Výpočty osvětlovacích soustav.



Výklad

Úvod

Metody k výpočtům osvětlenosti lze v zásadě rozdělit do dvou základních skupin, na metody tokové a bodové. Obě tyto skupiny se zásadně liší svým principem a také svými možnostmi. Tokové metody umožňují snadno spočítat průměrnou osvětlenost srovnávací roviny prostoru a jsou technicky i časově zpravidla méně náročné. V současnosti se tokové metody využívají pouze k prvnímu odhadu počtu svítidel pro danou osvětlovací soustavu. V dalším kroku světelně-technického návrhu se již využívají metody bodové. Tyto bodové metody poskytují možnost výpočtu osvětlenosti v konkrétních bodech prostoru a jsou časově i technicky náročnější a vyžadují větší množství vstupních dat. Nicméně v současnosti vlivem dostupné výpočetní techniky je aplikace bodových metod velmi jednoduchá a používá se pro konečné návrhy osvětlovacích soustav.

5.1. Tokové metody

Toková metoda vychází z požadované průměrné hladiny osvětlenosti srovnávací roviny a stanovuje potřebný světelný tok zdrojů, jejich počet a také typ svítidla.

□ Aplikace ve vnitřním osvětlení

Toková metoda výpočtu průměrné osvětlenosti ve vnitřním prostoru

Toková metoda je v praxi nejčastěji používána jako postup předběžného návrhu osvětlení. Nejběžněji se tokové metody využívá ke stanovení celkového, časově maximálního (počátečního) světelného toku Φ_z zdrojů světla potřebného k zajištění určité průměrné hladiny celkového osvětlení v bodech vodorovné srovnávací roviny, tj. např. normou ČSN EN 12464-1 požadované udržované osvětlenosti E_m .

Světelný tok zdrojů, který je třeba v uvažovaném prostoru instalovat, se stanoví ze vztahu:

$$\phi_z = \frac{E_m \cdot A}{z \cdot \eta_E} = \frac{E_{m0} \cdot A}{\eta_E} \quad (5.1)$$

Kde: E_m ...udržovaná osvětlenost (lx)
 A ...velikost plochy (m²)
 z ...udržovací činitel
 E_{m0} ...průměrná počáteční osvětlenost (lx)
 η_E ...činitel využití pro výpočet osvětlenosti (-)

Vydělíme-li tok ϕ_z vypočtený z rovnice tokem zdrojů v jednom svítidle, které uvažujeme pro osvětlení daného prostoru použít, zjistíme, kolik je třeba těchto svítidel instalovat. Takto stanovený počet svítidel je však nutno vhodně zaokrouhlit, přičemž je třeba přihlédnout i k předpokládanému rozmístění svítidel. Protože jsme ovšem takto změnil celkový tok zdrojů, tedy hodnotu ϕ_z , je nutno ověřit, zda bude i v tomto případě dodržena požadovaná osvětlenost E_m . K tomu použijeme vztah:

$$E_m = \frac{\phi_z}{A} \cdot z \cdot \eta_z \quad (5.2)$$

Kde: ϕ_z ...světelný tok zdroje (lm)
 E_m ...udržovaná osvětlenost (lx)
 A ...velikost plochy (m²)
 z ...udržovací činitel
 η_E ...činitel využití pro výpočet osvětlenosti (-)

V posledních letech byly zpracovány počítačové programy, které umožňují stanovit činitele využití η_E poměrně rychle přímo výpočtem bezprostředně pro každou řešenou alternativu, pokud jsou využita svítidla, jejichž světelně-technické charakteristiky jsou obsaženy v paměti počítače. Daří se tak nejen zrychlit, ale i zpřesnit určení činitele η_E .

5.2. Bodové metody

Všechny bodové metody jsou založeny na použití jednoduchého fyzikálního vztahu:

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (5.3)$$

Kde: I ...svítivost směru svítidla jako bodu (cd)

l ... vzdálenost bodu od svítidla (m)

E ...místní osvětlenost v bodě ve směru spojnice svítidlo bod, neboli absolutní hodnota světelného vektoru (lx)

Bude-li nás zajímat horizontální složka, pak lze uvedený vzorec použít ve tvaru:

$$E = \frac{I \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (5.4)$$

Kde: I ...svítivost směru svítidla jako bodu (cd)

l ... vzdálenost bodu od svítidla (m)

β ...úhel mezi spojnici svítidlo – bod a vertikálou

Uvedený vzorec je přímo použitelný pouze pro bodové zdroje světla nebo pro takové dostatečně malé zdroje, které lze za bodové považovat. Pro zdroje, které pro své rozměry nelze považovat za bodové, existují dvě metody, které lze použít. Obě metody spočívají v rozdělení zdroje světla na menší části a liší se ve způsobu, jak to učinit.

Numerická integrace neboli metoda dělení - metoda spočívá v rozdělení zdroje světla na dostatečně malé (elementární) části tak, aby je bylo možno považovat za bodové zdroje, za bodový zdroj lze považovat takový, jehož největší rozměr je minimálně 3x menší než vzdálenost od bodu výpočtu. V praxi je vhodnější použít hodnotu vyšší (např. 5 až 10), tato hodnota je významná pro přesnost i délku výpočtu a nazývá se v praxi dělicím poměrem.

Analytická integrace neboli integrální charakteristiky - metoda spočívá v analytické lineární nebo plošné integraci (analytickém součtu) dílčích příspěvků elementárních nekonečně malých částí svítidla. Aby bylo možno metodu použít, musí být známo analytické (funkční) vyjádření křivky svítidla a to takové, které lze integrovat, protože křivky svítivosti mají zcela obecné a rozličné tvary. Je třeba je nahradit (proložit) náhradními funkcemi. V praxi se s výhodou používá polynomu goniometrických funkcí. Těmito funkcím se po integraci říká integrální charakteristiky.

Obě metody používají jeden základní zjednodušující předpoklad - pokládají svítivost všech částí zdrojů světla za konstantní.

Metoda integrálních charakteristik:

- je poměrně rychlá, každé svítidlo se počítá pouze jedním, i když složitějším výpočetním cyklem

Metoda dělení:

- může používat přímo změřené snadno ověřitelné hodnoty svítivosti uvedené v katalogovém listu výrobce, nedeformované náhradními funkcemi
- je přesnější v případě překážek v místnosti, protože jednotlivé části svítidel mohou být vyhodnocovány samostatně
- je univerzální, nezávislá na rozměrech svítidla, jednodušší na zadání do databáze

Bodová metoda výpočtu osvětlenosti se v praxi používá zejména v těchto případech:

- výpočet přímé složky umělého osvětlení. Zdrojem světla je svítidlo v libovolné orientaci a vzdálenosti od bodu výpočtu. Křivky svítivosti lze získat z katalogového listu výrobce svítidla nebo přímo z elektronicky upravených dat (např. formát LDT), které lze přímo načíst výpočetním softwarem (Wils, Relux, Dialux).
- výpočet oblohové složky denního osvětlení - zdrojem světla je stavební osvětlovací otvor, okno nebo světlík. Světelná charakteristika je uvažována pro rovnoměrně zataženou oblohu dle vzorce uvedeného v normě ČSN 730580.
- výpočet odražené složky bodovou metodou - zdrojem světla jsou odrazné plochy (stěny, strop, podlaha, předměty) osvětlovaného prostoru. Pro jednoduchost se nejčastěji uvažuje s tzv. difúzními plochami, tj. takovými, které mají kosinusovou charakteristiku svítivosti definovanou vztahem (5.5).

V praxi se tomuto předpokladu dobře blíží matné plochy jako např. omítky. V případě lesklých ploch musíme počítat s chybou výpočtu. Existují dvě základní metody, jak lze vypočítat jas svítící plochy. První jej získá jako výsledek výše uvedené tokové metody. Logicky považuje jas celé plochy za konstantní a nelze počítat s jasy stínících předmětů. Druhou je dále popsána numerická metoda mnohonásobných odrazů.

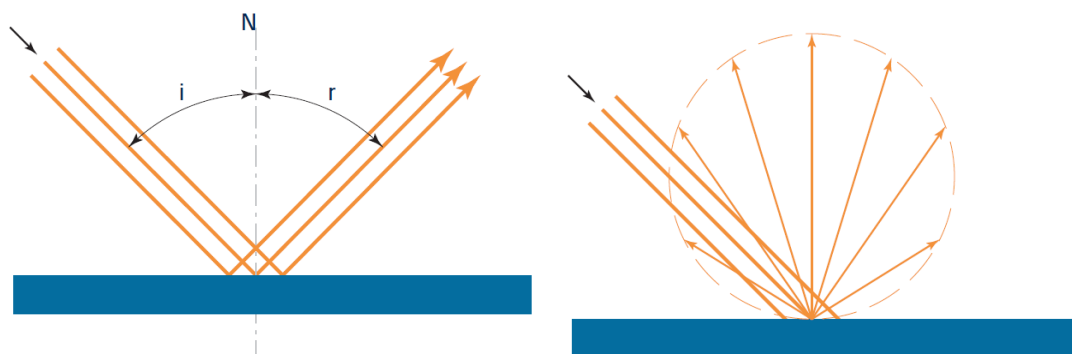
$$I = L \cdot \cos \gamma \cdot A \quad (5.5)$$

Kde: I ...svítivost (cd)

L ...jas plochy (cd.m⁻²)

γ ...úhel odrazu

A ...plocha (m²)



Obr. 5.1 Vlevo ideální (zrcadlový) odraz a vpravo difuzní odraz (Lambertův zářič)

Numerická metoda mnohonásobných odrazů - tato metoda se snaží přiblížit skutečnému fyzikálnímu ději a je variantou výpočtu odražené složky. Metoda spočívá v tom, že po prvotním výpočtu přímé složky na elementárních částech odrazných ploch prostoru se ve zvoleném počtu výpočetních cyklů počítají kumulující se příspěvky jednotlivých částí odrazných ploch. Přesnost výpočtu závisí jednak na tom, na jak malé elementární části se jednotlivé odrazné plochy dělí a pak také na zvoleném počtu cyklů. Podle zkušeností se ukazuje, že při třech cyklech je již dosahovaná chyba jen kolem jednoho procenta odražené složky.

5.3. Požadavky na výpočetní program

Program musí mít vhodnou databázi používaných osvětlovacích prostředků, umožňující její doplňování, tj. musí pracovat se standardními formáty popisu svítidel (IES, LTD atp.). Žádoucím, ačkoliv ne nutným požadavkem na program, je zahrnutí předpisových požadavků domácích, popř. i zahraničních norem, s následným výstupem příslušné projektové dokumentace. Program musí uživateli poskytovat různé světelně-technické parametry (osvětlenost, jas, index oslnění, izoluxní čáry atd.). Program buď musí mít vlastní prostředky pro vytváření trojrozměrných (3D) scén, nebo umožňovat import ze specializovaných 3D editorů (pracujících s formátem 3ds nebo dxf).

- Možnost různě a snadno ovládat zadávání rozmístění svítidel.
- Vizualizace výsledků – zrakové hodnocení kvality osvětlení.
- Vícevariantní způsob výstupu výsledků pro snazší hodnocení osvětlení.
- Možnost dialogového interaktivního výpočtu osvětlovací soustavy a výběru nejlepšího řešení.
- Možnost vložení podkladu z výkresové dokumentace.

▣ Vybrané výpočetní programy

Wils

Jde o český software podle českých a evropských norem. Má komfortní ovládání a výstupy ve spolupráci s CAD systémy.

Výpočty provádí dle platných norem, které již byly dříve podrobně rozvedeny:

- EN 12464-1 - osvětlení vnitřních pracovních prostorů,
- EN 12464-2 - osvětlení venkovních pracovních prostorů,
- EN 12193 - osvětlení sportovišť,
- EN 13201 - osvětlení komunikací,
- EN 1838 - nouzové osvětlení.

Program poskytuje následující metody výpočtu:

bodovou metodu "dělení zdrojů" výpočtu přímé složky osvětlenosti, bodovou metodu mnohonásobných odrazů výpočtu odražené složky osvětlenosti - numerická integrace, tokovou metodu rychlého návrhu počtu svítidel v prostoru, výpočet udržovacího činitele, výpočet činitele oslnění UGR (vnitřní prostory), výpočet činitele oslnění GR (venkovní prostory), výpočet jasů vozovek, výpočet prahového přírůstku - oslnění vozovek.

Možnosti programu:

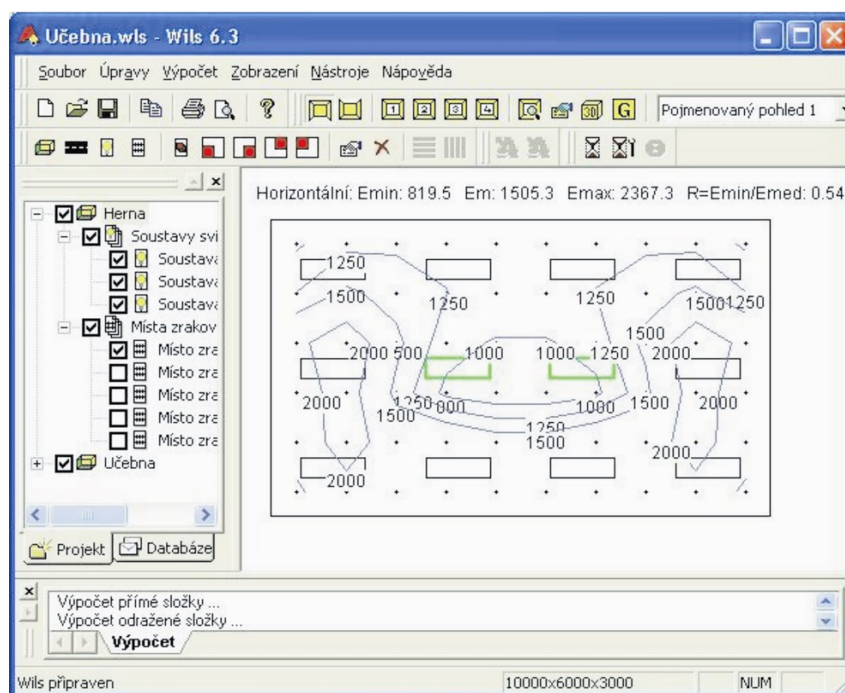
prezentační vizualizace, řešení různých režimů provozu, tabulková editace jednotlivých svítidel, vázané soustavy svítidel, možnost několika kroků zpět při editaci soustavy svítidel, zobrazování souřadnic svítidel na osách, možnost posouvání svítidel s udržením směrového bodu, zobrazení podhledového rastru, vylepšený tiskový výstup, barevné izolinie, více obrázků k místnosti, snadnější zadání nepravidelné místnosti ve spolupráci s cadem.

Světelnětechnické vlastnosti programu:

bodový výpočet odražené složky nastavitelnou numerickou metodou mnohonásobných odrazů, stínící vlastnosti interiérových a stavebních prvků a různé tvary místností lze respektovat soustavami neprůsvitných nebo poloprůsvitných překážek; snadno lze definovat překážky simulující místnost tvaru L nebo U, bodovou metodou lze spočítat nejen horizontální a normálovou osvětlenost, ale i složky světelného vektoru, kulovou, válcovou a "kamerovou" osvětlenost, svítidla lze v prostoru orientovat zcela libovolně, a to pomocí úhlů, směrových bodů, vektorů nebo je lze směřovat myší, databáze svítidel obsahuje více než 50000 svítidel různých výrobců.

Grafické vlastnosti programu:

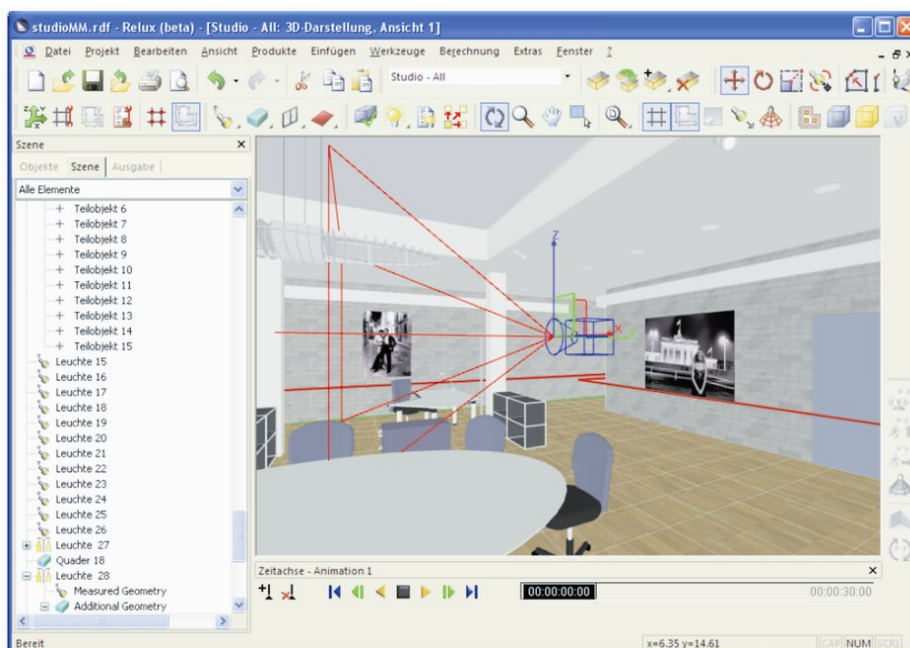
přepínatelné editační a vizualizační zobrazení, nastavitelné zobrazení podle potřeb, výsledky výpočtu osvětlenosti nebo jasu lze zobrazit formou tabulky nebo izo diagramu, výsledky výpočtu činitele oslnění UGR nebo GR lze zobrazit tabulkou, izo diagramem nebo značkami oslnění, možnost práce s pojmenovanými pohledy.



Obr. 5.2 Prostředí výpočetního programu Wils

Relux

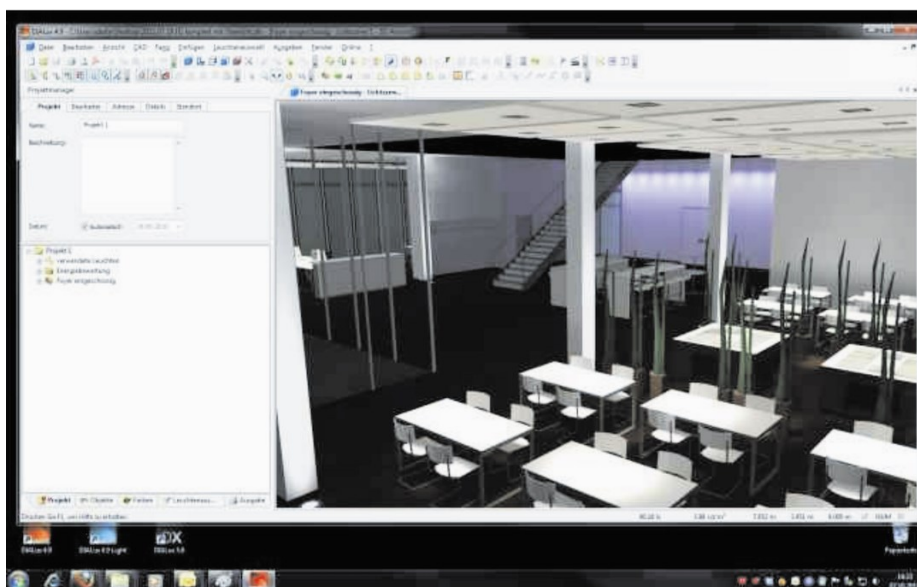
Světelně-technický výpočetní program Relux je švýcarský program na špičkové evropské úrovni s možností připojení databází svítidel českých i mezinárodních výrobců. Program umožňuje práci s několika formáty světelně-technických dat a možnost importovat charakteristiky jednotlivých svítidel. Pomocí tohoto programu je možné počítat umělé, denní, sdružené i nouzové osvětlení. V programu je obsaženo velké množství vnitřního vybavení, nábytku, materiálu a textur pro možný výpočet vnitřního, venkovního a uličního osvětlení. V případě půdorysných podkladů v provedení 2D a 3D je možné importovat objekt z CAD programu, poté navrhnout osvětlovací soustavu umělého osvětlení v programu Relux a po vrácení do CAD programu se objeví navržená osvětlovací soustava v půdorysu daného prostoru. Následně je možné s touto soustavou pracovat, případně ji rozdělit, ovšem v této situaci je nutné opět provést výpočet světelných parametrů v programu Relux a ověřit, zdali tyto parametry vyhovují požadavkům uvedeným v normách. Také lze využít formáty dxf, vrml, 3ds a wmf, což podstatně usnadní práci s vytvářením daného objektu určeného k návrhu osvětlení.



Obr. 5.3. Prostředí výpočetního programu Relux

Dialux

Tento německý výpočetní program společnosti DIAL GmbH je svou propracovaností a uživatelským prostředím velice podobný programu Relux.



Obr. 5.4. Prostředí výpočetního programu Dialux



Shrnutí pojmů

- Objasnění principu u výpočtových metod využívaných pro počítání základních světelně technických parametrů



Otázky

1. Definujte pojmy numerická integrace neboli metoda měření.
2. Definujte vztah pro odhadní účinnostní metodu.
3. Vyjádřete vztah pro tokovou metodu měrného příkonu.
4. Jaké je vztah pro součinitel jasu?



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

6 DENNÍ A SDRUŽENÉ OSVĚTLENÍ



Čas ke studiu: 100 MINUT



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:
 Popis a vysvětlení funkce denního světla, kvalita denního světla.
 Objasnění pojmu činitel denní osvětlenosti a rovnoměrnost denního osvětlení.
 Sružené osvětlení, požadavky na sružené osvětlení.



Výklad

Úvod

Sluneční záření dopadající na zemi má spojité spektrum s maximální poměrnou intenzitou v oblasti viditelného záření. Citlivost zraku je tedy hospodárně přizpůsobena právě na tuto oblast.

Slunce

Slunce je mohutným zdrojem energie, kterou vyzařuje ve všech oblastech elektromagnetického záření, čímž ovlivňuje všechna tělesa sluneční soustavy. Slunce je kulovitého tvaru. Plochu, kterou vidíme jako povrch slunce nazýváme fotosféra. Tvoří ji tenká neprůhledná vrstva plynu v plazmatickém stavu, nad kterou je ještě rozprostřena řidší, avšak rozměrnější vrstva chromosféry a koróny. Základní údaje o Slunci jsou uvedeny v tab. 6.1.

Poloměr	695 000 km
Povrch	$6,07 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$
Objem	$1,412 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$
Hmotnost	$1,9891 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Střední hustota	$1,409 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$
Efektivní povrchová teplota	5 770 K
Zářivá vizuální teplota	6 050 K
Celkový zářivý výkon	$3,826 \cdot 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$
Průměrný jas	$2,0 \cdot 10^9 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Maximální jas	$2,5 \cdot 10^9 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$

Tab. 6.1 Základní údaje o Slunci

Mimozemské (extraterestriální) sluneční záření

Záření dopadající na vnější mezní plochu zemské atmosféry nazýváme extraterestriální. Celková sluneční energie dopadající na horní hranici atmosféry je $1,8 \cdot 10^{17} \text{ W} \pm 3,3 \%$. Uváděná tolerance 3,3 % je díky různé vzdálenosti obíhající Země po oběžné dráze kolem Slunce.

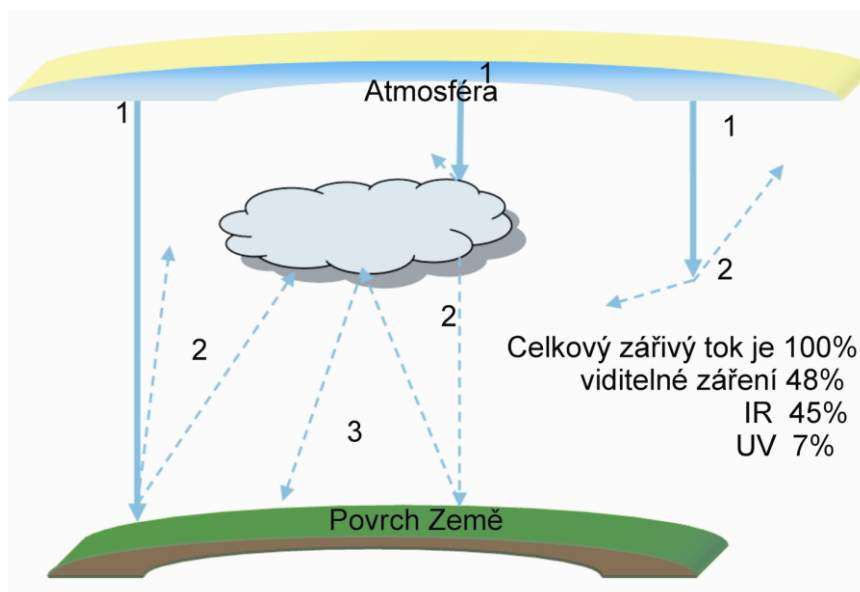
Solární (sluneční zářivá) konstanta

Ozářenost extraterestriální slunečním zářením na povrchu kolmém na sluneční paprsky při střední vzdálenosti Země od Slunce je:

$$E_{e,o} = (1367 \pm) \cdot W \cdot m^{-2} = 1367 \cdot W \cdot m^{-2} \pm 0,5\% \quad (6.1)$$

Oblohové světlo

Oblohové světlo neboli sluneční světlo rozptýlené atmosférou (a jejími nečistotami), je viditelná část oblohového záření.



Obr. 6.2 Prostup slunečního záření atmosférou během dne

Na obr. 6.2 je znázorněn postup slunečního záření atmosférou a jeho různé odrazy: 1. sluneční záření absorbované atmosférou. 2. difúzní sluneční záření po odrazech od různých překážek např. povrch Země, oblaky, atmosféra. 3. vícenásobný odraz difúzního záření.

Odražené denní záření vzniká odrazem od povrchu Země a také od různých povrchů, na které toto záření dopadá. Tyto odrazy se z části vracejí do meziplanetárního prostoru.

Denní osvětlenost

Denní osvětlenost ve venkovním prostoru se skládá z přímého světla a světla oblohového, které se označují jako globální (celková) osvětlenost.

Celková denní osvětlenost je dána vztahem:

$$E_g = E_s + E_{ob} \quad (6.2)$$

Kde: E_g ...denní (celková) osvětlenost (lx)

E_s ...osvětlenost přímým slunečním světlem (lx)

E_{ob} ...osvětlenost difuzním oblohovým světlem v (lx)

Rovnoměrně zatažená obloha při tmavém terénu

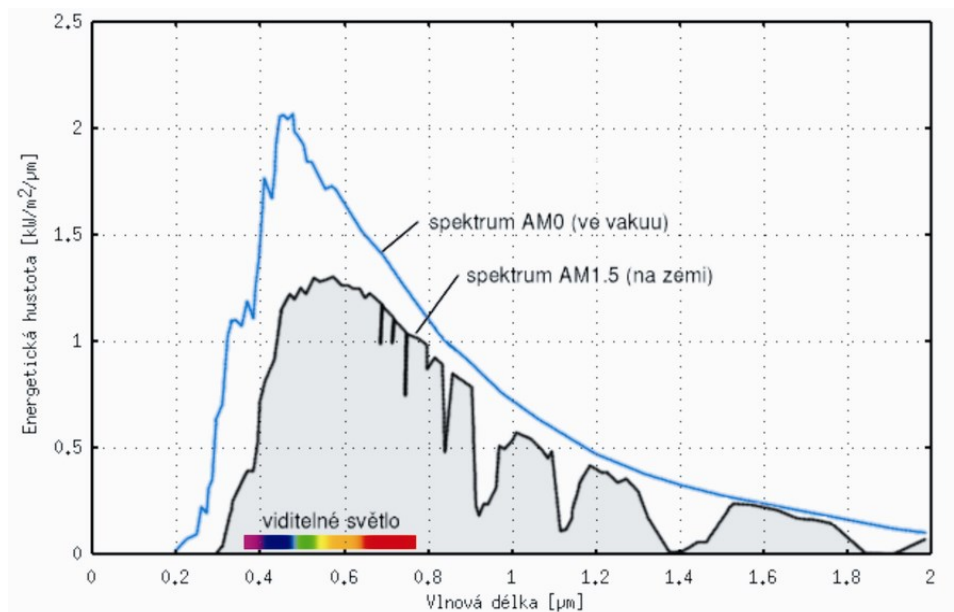
Definice zatažené oblohy podle CIE (1955) je v dosavadní praxi jedním ze základních údajů o zdroji denního oblohového světla využívaném při normalizaci požadavků na denní osvětlení, k návrhu a kontrole parametrů denního osvětlení budov aj.

Úplně zatažená obloha má poměr jasů L_γ ve směru úhlu γ nad horizontem k jasů L_z v zenitu daný vztahem:

$$L_\gamma = \frac{1}{3} \cdot L_z \cdot (1 + 2 \sin \gamma) \quad (6.3)$$

Kde: L_γ ...jas oblohy v úhlové výšce γ nad horizontem ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

L_z ...jas oblohy v zenitu ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)



Obr. 6.3 Spektrální složení světla dopadající na Zemi

Pokles záření je také závislý na úhlu dopadu paprsků, tím i na tloušťce atmosféry, kterou musí projít. Proto se používá tzv. AM (Air Mass factor) - optická tloušťka atmosféry, vyjadřující násobek tloušťky atmosféry, kterou musí světlo projít. Pro výpočty a měření se běžně užívá $AM = 1,5$; to odpovídá úhlu dopadu slunečních paprsků $41,75^\circ$, viz Obr. 6.3.

6.1. Denní světlo

Denní osvětlení je osvětlení denním světlem, dopadajícím na zemi buď jako přímé sluneční světlo nebo rozptýlené atmosférou jako oblohové (difuzní) světlo. Intenzita denního osvětlení i jeho barva se v průběhu dne mění podle denní a roční doby, podle zeměpisné šířky a podle stavu oblohy. Intenzita osvětlení v červnu v poledne je průměrně 95000 - 100000 lx. Denní osvětlení patří k základním faktorům životního prostředí člověka a má značný vliv na jeho zdravotní a psychický stav. Lze jednoznačně říci, že denní světlo vzhledem ke svému spektrálnímu složení a dynamickým vlastnostem není při současném stavu světelné techniky nahraditelné světlem z umělých zdrojů. Nejcharakterističtější v tomto směru je spektrální složení světla, podmíněné charakterem zdroje a zejména neustálá proměnlivost denního světla jak v intenzitě, tak ve spektrálním složení a rozložení světelného toku. To komplikuje návrh denního osvětlení, neboť je třeba zachovat zrakovou pohodu jak při přímém slunečním světle, tak i při jasné, polojasné a zatažené obloze.

Podle platných předpisů musí všechny vnitřní prostory v budovách určené pro trvalý pobyt osob mít vyhovující denní osvětlení. Přitom se z hlediska denního osvětlení (dle ČSN 730580-1) trvalým pobytem rozumí pobyt osob ve vnitřním prostoru nebo v jeho funkčně vymezené části, který trvá v průběhu jednoho dne (za denního světla) déle než čtyři hodiny a opakuje se při trvalém užívání budovy více než jednou týdně. Jen ve výjimečných případech, například při rekonstrukcích budov na prostory s trvalým pobytem osob, a se souhlasem příslušného orgánu zdravotního ústavu se dovolují pro trvalý pobyt lidí vnitřní prostory s celkovým sdruženým osvětlením (sdružené osvětlení je popsáno na konci této kapitoly) nebo pouze s umělým osvětlením, jestliže je to odůvodněno funkčně i ekonomicky a za předpokladu dodržení hygienických zásad. V těchto prostorech s trvalým pobytem osob a nevyhovujícím denním osvětlením by se měla přijmout některá níže uvedená náhradní opatření, která zmenší negativní vliv nedostatku denního osvětlení na lidský organismus. Mezi tyto opatření například patří:

- pobyt v prostoru bez denního světla nejvíce 4 hod denně
- začátek pracovní směny po 12 hod (odpolední směna)
- ukončení pracovní směny nejpozději o 13 hod (ranní směna)
- přestávka v práci přes oběd v trvání alespoň 2 hod
- nejvíce tři denní směny v jednom týdnu končící po 13 hod
- nejvíce dvě noční směny v jednom týdnu
- vysoká umělá osvětlenost, nejméně 1500 lx na svislých rovinách

Při návrhu denního osvětlení musí být zahrnuta možnost negativních důsledků, které mohou být vyvolány nevhodným řešením osvětlovacích otvorů, nevhodným uspořádáním pracovních míst atd. V oblasti zrakového komfortu je třeba vyloučit nebo omezit na přijatelnou míru zejména možnost oslnění vysokým jasem oblohy nebo vnikajícím přímým slunečním světlem. Takto nevhodně navržené osvětlovací otvory mohou zhoršovat tepelnou pohodu nadměrnou tepelnou zátěží v letním období a nežádoucí ochlazování v zimních měsících. Při návrhu osvětlovacích otvorů a osvětlení v objektu se musí řešení objektu posuzovat komplexně ve vzájemně na sobě navazujících souvislostech a vazbách, které ovlivňují energetickou bilanci celého objektu a tím i ekonomické hledisko výstavby a užívání. Dostatečné množství denního světla samo o sobě ještě nezabezpečuje zrakovou pohodu.

Kvalita denního osvětlení zejména závisí na:

- Rozložení světelného toku a na směr osvětlení. Rozložení světelného toku a převažující směr osvětlení mají být v souladu s charakterem zrakových činností a jejich podmínkami. Pro pracovní činnost vyhovuje osvětlení převážně zleva shora.
- Rovnoměrnost denního osvětlení charakterizuje rozložení světelného toku a je určena poměrem minimální a maximální hodnoty činitele denní osvětlenosti (Popis činitel denní osvětlenosti v další kapitole této publikace).
- Rozložení jasů ploch v zorném poli pozorovatele, které má pro zrakovou pohodu základní význam. Jsou-li v zorném poli velké jasové rozdíly, které vedou ke zvýšené adaptační činnosti, vzniká zraková únava.
- Oslnění, jehož příčinou je přílišný jas nebo jasové kontrasty v zorném poli. Při denním osvětlení jsou velkým nebezpečím pro oslnění osvětlovací otvory s průhledem na oblohu, jejíž jas je obvykle mnohonásobně větší než jas pozorovaného předmětu.

Proto je nezbytné pamatovat na regulaci přímého slunečního světla ve vnitřních prostorech, aby se mohlo podle potřeby omezit nebo úplně vyloučit. Okna místností na prosluněných stranách mají být opatřeny zařízeními schopnými regulovat prostup přímého slunečního záření do budov podle okamžitých požadavků uživatelů interiéru. Způsobů regulace je mnoho a mají se vždy volit ty, které nejlépe vyhovují daným požadavkům a přitom jsou hospodárné. K tomuto účelu se používají různé druhy clon, které částečně nebo úplně chrání osvětlovací otvor a tím i vnitřní prostor před přímým slunečním zářením. Clony mohou být:

- pevné - umísťují se ve formě stříšek, lamel atd. zpravidla na vnější straně okna
- pohyblivé (rolety, žaluzie, závěsy) - umožňují regulaci osvětlení podle potřeby.

Velmi nepříjemné může být oslnění vznikající odrazem světla od lesklých povrchů v zorném poli. Pro povrchy vnitřních prostorů se doporučuje užívat matných, nelesklých povrchových úprav, aby nedocházelo k oslňování odrazem světla. Zejména se musí zabránit oslnění odrazem světla od lesklých povrchů ve spodní části zorného pole, na které je lidský zrak obzvlášť citlivý, např. lesklá pracovní plocha lesklá podlaha apod.). Kolorita povrchů má být taková, aby hodnoty činitele

odrazu světla hlavních povrchů vnitřních prostorů byly v novém stavu v těchto mezích:

- činitele odrazu světla stropu min. 0,70 – barva bílá
- stěny – světlé s činitelem odrazu světla 0,5, čehož je dosaženo u barev bílé, žluté, béžové, krémové, pastelově světle modré apod.
- činitele odrazu světla, bezprostředně sousedících ploch s okenními otvory min. 0,7- ostění, okenní rámy
- činitele odrazu světla podlahy min. 0,3. Barva světle zelená, světle modrá, světle šedá, béžová.
- činitel odrazu světla terénu 0,1 (trávník, živičný povrch).

Insolace je důležitým faktorem kvality životního prostředí, což je ozáření přímým slunečním zářením, ve kterém se kromě viditelného záření uplatňují i složky, nevnímané lidským zrakem (ultrafialové a infračervené záření).

Insolace má pozitivní účinky na člověka jako:

- zvyšování odolnosti proti nepříznivým vlivům prostředí,
- podpora zdravého rozvoje organismu,
- příznivé působení na psychiku člověka, jeho duševní stav a náladu.
- baktericidní působení insolace, kterým se desinfikují vnitřní prostory.

Stávající norma ČSN 73 4301 (Obytné budovy) stanovuje, že doba proslunění (insolance) obytné místnosti musí být (při zanedbání oblačnosti) od 1. března do 13. října nejméně 1,5 hodiny denně při výšce Slunce nad horizontem 5°.

□ **Základní požadavky na denní osvětlení**

Kmenovou normou pro denní osvětlení je ČSN 73 0580, na kterou navazují přidružené normy pro jednotlivé druhy budov (obytné, průmyslové atd.). Vzhledem k proměnlivosti denního osvětlení se jeho množství nestanoví hodnotou absolutní (osvětlenost v lx), ale hodnotou relativní pomocí činitele denní osvětlenosti, který se značí symbolem D. Denní osvětlení se navrhuje pro předpokládanou zrakovou činnost, tedy aby dosahovalo vyhovujících hodnot osvětlenosti při rovnoměrně zatažené obloze a venkovní srovnávací osvětlenosti 5000 lx.

□ **Činitel denní osvětlenosti**

Činitel denní osvětlenosti je základním kritériem hodnocení jakosti denního osvětlení. Je to poměr vnitřní osvětlenosti E v daném bodě k venkovní osvětlenosti E_{eh} nezacloněné vodorovné roviny za známého nebo předpokládaného rozložení jasu oblohy, rovnoměrně zatažená obloha, viz vztah 6.4

$$D = \frac{E}{E_{eh}} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Kde: D ...činitel denní osvětlenosti (%)

E ...osvětlenost v bodě dané roviny (lx)

E_{eh} ...srovnávací osvětlenost v bodě venkovní nezastíněné roviny

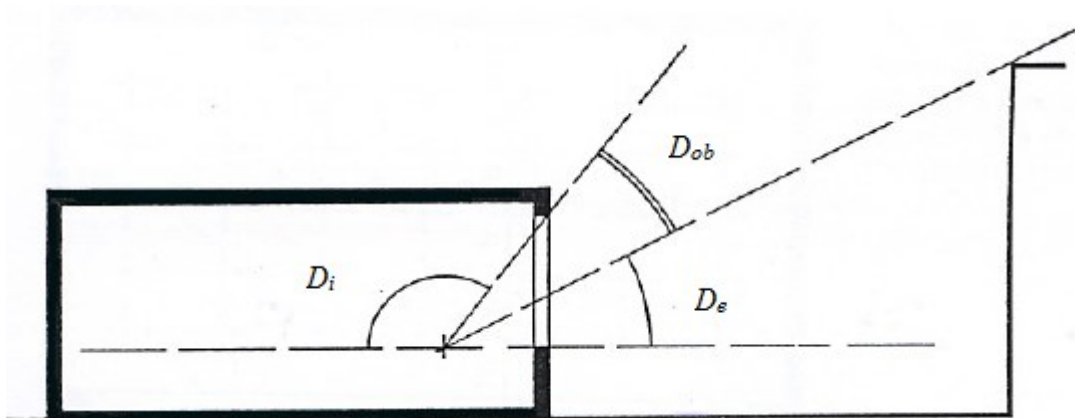
Při stanovení činitele denní osvětlenosti D výpočtem je potřeba pracovat s třemi složkami.

$$D = D_{ob} + D_e + D_i \quad (6.5)$$

Kde: D_{ob} ...oblohová složka činitele denní osvětlenosti (%)

D_e ...vnější odražená složka činitele denní osvětlenosti (%)

D_i ...vnitřní odražená složka činitele denní osvětlenosti (%)

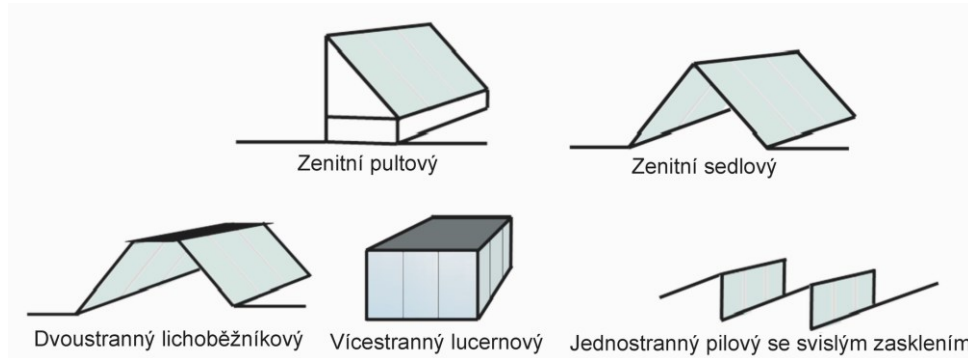


Obr. 6.4 Složky činitele denního osvětlení

□ Hodnocení denního osvětlení

Rozlišuje se denní osvětlení:

- horní (světlíky ve střeše)
- boční (okna, boční zasklení)
- kombinované (boční a horní)
- sekundární (osvětlení přes jiný osvětlovací prostor)



Obr. 6.5 Typy horních osvětlovacích otvorů

Podle rozmístění bočních osvětlovacích otvorů v obytných stěnách se rozeznává boční osvětlení:

- jednostranné (unilaterální) – osvětlovací otvory na jedné stěně
- dvojstranné (bilaterální) – osvětlovací otvory ve dvou protilehlých stěnách
- dvojstranné – osvětlovací otvory ve dvou stýkajících se obvodových stěnách
- vícestranné – osvětlovací otvory ve více než dvou stěnách

V případě horního osvětlení anebo kombinovaného osvětlení s převahou světla shora musí být dodržena průměrná D_m a také minimální D_{min} hodnota činitele denní osvětlenosti. U bočního osvětlení jsou velké hodnoty činitele denní osvětlenosti u okna, směrem dovnitř klesají, viz obr. 6.8.

U bočních osvětlovacích soustav je rovněž vyšší vertikální složka činitele denní osvětlenosti, čímž je i lepší viditelnost a lepší rozlišitelnost kritických detailů. Navíc, má-li boční osvětlení dostatečně nízký parapet, je rovněž nezanedbatelný zrakový kontakt s okolím. Horní osvětlení se vyznačuje vyšší rovnoměrností osvětlení v prostoru.

Zraková činnost se podle poměrné pozorovací vzdálenosti kritického detailu zařazuje do sedmi tříd, které principiálně odpovídají kategoriím osvětlení pro umělé osvětlení viz Tab. 6.2.

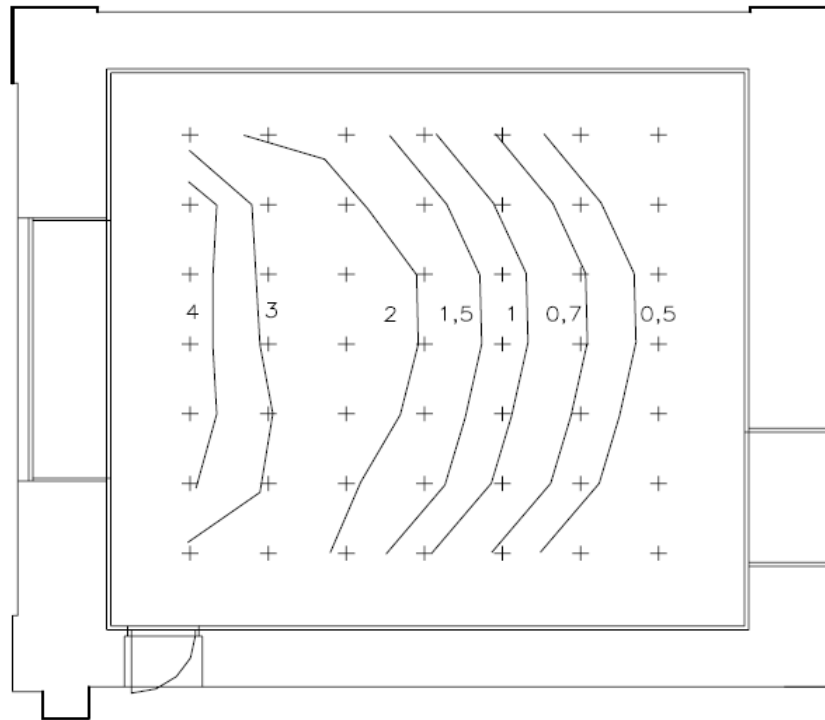
Průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti se určuje v uvažovaném prostoru jako aritmetický průměr hodnot zjištěných v pravidelné síti bodů, přičemž krajní body jsou vzdálené 1 m od stěn.

Vzájemná vzdálenost kontrolních bodů se volí dle velikosti prostoru od 1 do 6 m. U vnitřních prostorů s šířkou menší než 3 m stačí jedna řada kontrolních bodů umístěných v ose prostoru.

V odůvodněných případech se zjišťují činitele denní osvětlenosti ještě v dalších významných bodech. Denní osvětlení může být odstupňované, což je denní osvětlení, jehož úroveň je odstupňována pro jednotlivé funkčně vymezené části vnitřního prostoru podle charakteru zrakových činností, pro něž jsou tyto vymezené části určeny. Názornou grafickou pomůckou při řešení denního osvětlení jsou tzv. izofoty, což jsou čáry spojující místa stejných hodnot činitele denní osvětlenosti na srovnávací rovině. Kreslení průběhu izofot se navrhuje tak, aby jejich hustota dávala možnost posoudit rozložení denního světla, a aby byly zachyceny požadované nejmenší hodnoty činitele denní osvětlenosti pro jednotlivé druhy zrakových činností. Příklad pravidelné sítě kontrolních bodů a uspořádání izofot v běžné kancelářské místnosti s bočním osvětlením je na obr. 6.6.

Třída zrakové činnosti	Charakteristika zrakové činnosti	Poměrná pozorovací vzdálenost	Příklady zrakových činností	Hodnota činitele denní osvětlenosti (%)	
				minimální D_{min}	průměrná D_m
I	mimořádně přesná	3 330 a větší	Nejpřesnější zraková činnost s omezenou možností použití zvětšení.	3,5	10
II	velmi přesná	1 670 až 3 330	Velmi přesné činnosti při výrobě a kontrole.	2,5	7
III	přesná	1 000 až 1 670	Přesná výroba a kontrola, rýsování, technické kreslení.	2	6
IV	středně přesná	500 až 1 000	Středně přesná výroba a kontrola, čtení psaní.	1,5	5
V	hrubší	100 až 500	Hrubší práce, manipulace s předměty a materiálem.	1	3
VI	velmi hrubá	menší než 100	Udržování čistoty, sprchování a mytí, převlékání.	0,5	2
VII	celková orientace	-	Chůze, doprava materiálu, skladování hrubého materiálu.	0,2	1

6.2 Třídění zrakových činností a hodnoty činitele denní osvětlenosti



Obr. 6.6 Příklad hodnot činitele denní osvětlenosti a rozmístění kontrolních bodů při bočním osvětlení

V praktických prostorech se mohou vyskytovat podle úrovně denního osvětlení až tři oblasti podle obr. 6.6:

- oblast s vyhovujícím denním osvětlením dle normy. V této oblasti se umělé osvětlení navrhuje jako noční, za obvyklých podmínek oblohy zde během dne není třeba svítit umělým světlem,
- oblast sdruženého osvětlení, kde denní osvětlení vyhovuje dle normy. Umělé osvětlení se navrhuje pro spolupráci s denním světlem. Tento návrh není zrovna jednoduchý, protože umělé světlo jednak musí reagovat na změny stavu oblohy, ale také musí umožnit částečně vyrovnat nepříznivé jasové poměry dále od oken způsobené nízkou úrovní denního osvětlení,
- oblast s absolutním nedostatkem denního světla nebo chybějícím denním světlem, které je třeba posuzovat jako prostory bez denního osvětlení. Umělé osvětlení zde není závislé na stavu oblohy, ale pouze na přítomnosti osob a jejich činnostech.

Isofota 1,5 % vymezuje pracovní prostor s kancelářskou činností, tzn. čtení a psaní. Prostor za touto čarou již pro tyto práce nevyhovuje.

Požadavky na nejmenší hodnoty činitele denní osvětlenosti podle tab. 6.2 se zvyšují za těchto okolností:

- při malém kontrastu jasů nebo barev mezi pozorovaným kritickým detailem a jeho bezprostředním okolí. Za malý kontrast se považují jasy od 2:1 a 1:2,
- je-li doba pozorování omezena na krátký časový okamžik (např. 1 sekunda a méně) nebo při rychlém pohybu pozorovaného předmětu,
- může-li chyba v pozorování způsobit havárii, úraz atd.,
- při stáří nadpoloviční většiny uživatelů nad 40 let,
- při některých zrakových vadách pozorovatelů,
- při uplatnění zvláštních činitelů zhoršujících vidění (kouř, pára atd.).

Při uplatnění prvních čtyř okolností se zvyšuje činitel denní osvětlenosti podle tab.6.2 o jednu polovinu rozdílu s nejbližší vyšší třídou. Při dvou okolnostech se zvýší činitel o celou třídu. Zvýšení činitele denní osvětlenosti u posledních dvou okolností stanovuje hygienický útvar. Při trvalém pobytu osob v prostoru, je to pobyt lidí ve vnitřním prostoru, který trvá v průběhu jednoho dne - za denního světla - déle než 4 hod. a opakuje se při trvalém užívání budovy déle než jednou týdně), musí být minimální hodnota činitele denní osvětlenosti ve vnitřním prostoru nebo v jeho funkčně vymezené části rovna ($D_{\min} = 1,5 \%$) a průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti musí být rovna ($D_m = 3 \%$), i když pro danou zrakovou činnost stačí nižší hodnoty. Těmto hodnotám se rovněž říká hygienické minimum stejně jako u umělého osvětlení.

□ Rovnoměrnost denního osvětlení

Rovnoměrnost denního osvětlení se určuje jako podíl nejmenší a největší hodnoty činitele denní osvětlenosti zjištěné v kontrolních bodech sítě na vodorovné srovnávací rovině dle vztahu:

$$r = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (6.6)$$

Kde: r ...rovnoměrnost denního osvětlení (-)

D_{\min} ...minimální hodnota činitele denní osvětlenosti v posuzovaném prostoru (%)

D_{\max} ...maximální hodnota činitele denní osvětlenosti v posuzovaném prostoru (%)

Hodnota rovnoměrnosti denního osvětlení v prostorách, kde se vyžaduje jen minimální činitel denní osvětlenosti, nemá být ve třídách zrakových činností I až IV menší než 0,2. Ve třídě V menší než 0,15. Ve třídách I až III se doporučuje rovnoměrnost osvětlení nejméně 0,3. V prostorách, kde se vyžadují i průměrné

hodnoty činitele denní osvětlenosti, je přiměřená rovnoměrnost denního osvětlení zabezpečena splněním těchto hodnot. Přechází-li se častěji mezi sousedními vnitřními prostory, nesmí být mezi nimi poměr minimálních nebo průměrných činitelů denní osvětlenosti menší než 1:5.

6.2. Sdružené osvětlení

Sdružené osvětlení je současné používání denního a umělého osvětlení v jednom prostoru. Sdružené osvětlení lze použít jen v odůvodněných případech, kdy z příčin výrobně technologických, výrobně organizačních, mikroklimatických, stavebně konstrukčních a urbanistických nelze zajistit denní osvětlení na požadované úrovni.

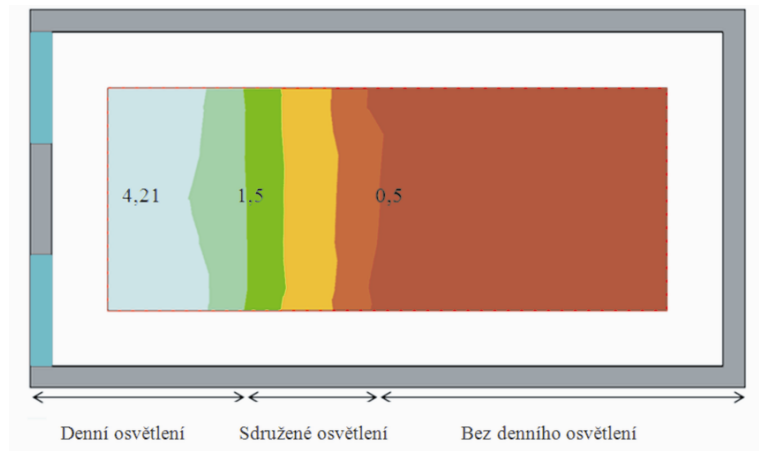
□ Požadavky na sdružené osvětlení

Sdružené osvětlení se rozděluje na celkové a místní.

Celkové sdružené osvětlení je současné osvětlení denním a doplňujícím celkovým nebo odstupňovaným osvětlením.

Sdružené osvětlení místní je současné osvětlení denním světlem a doplňujícím místním umělým osvětlením na zastíněném místě vnitřního prostoru.

Ve vnitřních prostorech se sdruženým osvětlením mohou být tato pásma (Obr. 6.7):



Obr. 6.7 Oblasti denního osvětlení

- s vyhovujícím denním osvětlením. Hodnoty činitele denní osvětlenosti splňují požadavky dané v tab. 6.2. Třídění zřakových tříd a hodnoty činitele denní osvětlenosti uvedené v popisu denního světla (hodnocení podle ČSN 73 05 80 - Denní osvětlení budov)
- se sdruženým osvětlením. V tomto pásmu nejsou splněny hodnoty činitele denní osvětlenosti pro určitou zřakovou třídu, avšak musí se rovnat předepsaným hodnotám činitele denní osvětlenosti. Například pro zřakovou třídu IV (kancelář, učebna) se musí činitel denní osvětlenosti pohybovat v rozmezí 0,5% -1,5% (hodnocení podle ČSN 36 00 20 - Sdružené osvětlení)

- s umělým osvětlením. V tomto pásmu jsou hodnoty činitele denní osvětlenosti menší než hodnoty předepsané (např. činitel denního osvětlení pod 0,5% pro třídu IV). Toto pásmo je považováno jako prostor bez denního osvětlení tzv. bezokenní prostor (hodnocení podle normy ČSN 360450 - Umělé osvětlení vnitřních prostorů)

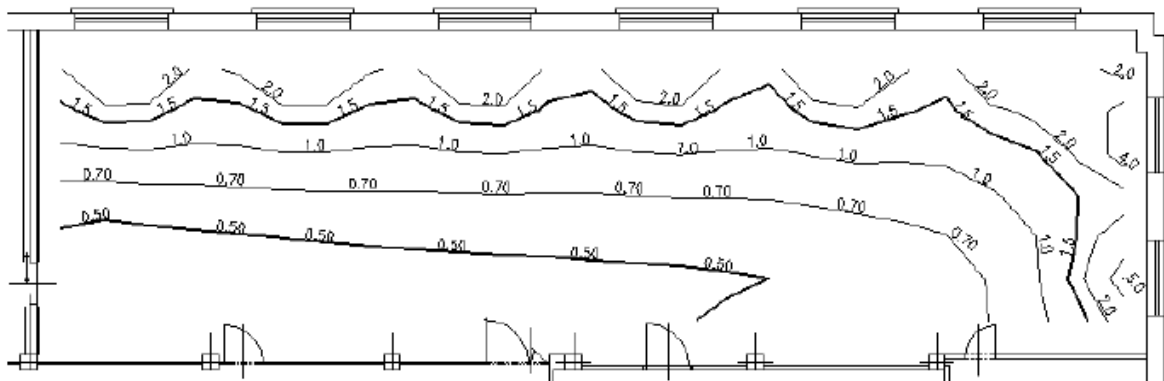
□ Úroveň doplňujícího umělého osvětlení

Ve vnitřních prostorech nebo v jejich funkčně vymezených částech se sdruženým osvětlením musí být hodnoty udržované osvětlenosti způsobené doplňujícím celkovým nebo doplňujícím odstupňovaným umělým osvětlením nejméně takové, jak stanoví ČSN EN 12464-1. U udržovaných osvětleností 200lx až 500lx včetně se však navýší o jeden stupeň řady osvětlenosti.

□ Příklad sdruženého osvětlení

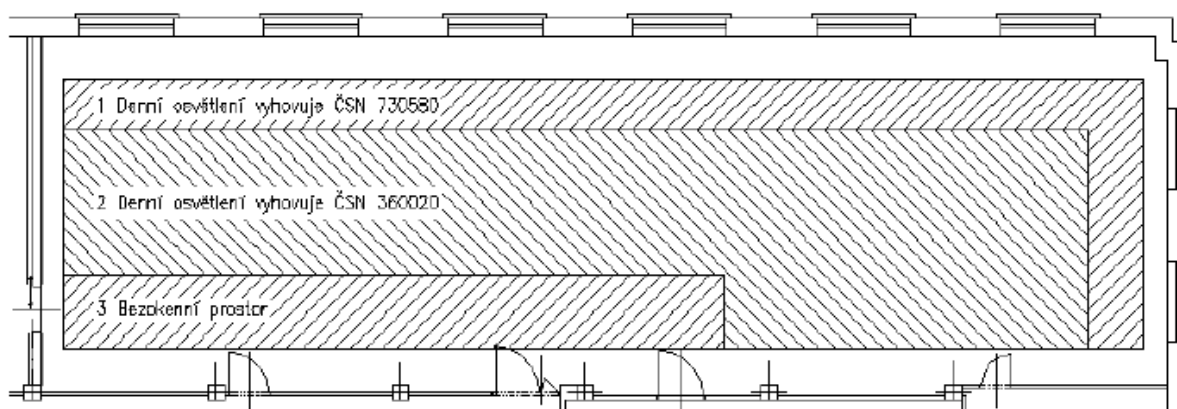
Jako příklad je uvedena místnost s bočním zasklením ze dvou stran. Stanovená zraková třída denního osvětlení je IV (např. kancelář). V místnosti uvažujeme trvalý pobyt pracovníků a s rovnoměrným rozmístěním pracovních míst po celém prostoru místnosti.

Na obr. 6.8 jsou znázorněny výsledky výpočtu denního osvětlení ve formě izofot.



Obr. 6.8 Hodnoty činitele denního osvětlenosti v počítané místnosti

Na obr. 6.9 je vzorová místnost rozdělena do tří pásem, která jsou popsána v kapitole.



Obr. 6.9 Rozdělení počítané místnosti z hlediska činitele denního osvětlení do tří pásem



Shrnutí pojmů

- Sluneční záření
- Denní světlo
- Insolace
- Sdružené osvětlení
- Trvalý pobyt osob



Otázky

1. Definujte pojem insolace.
2. Definujte vztah pro činitele denního osvětlení.
3. Jaká pásma se mohou vyskytovat v prostorech se sdruženým osvětlením?



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

7 OSVĚTLOVÁNÍ VNITŘNÍCH PRACOVNÍCH PROSTORŮ



Čas ke studiu: 130 MINUT



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Stanovení minimálních požadavků na umělé osvětlení vnitřních prostorů.
- Důležité pojmy používané v souvislosti s vnitřními prostory.
- Návrh osvětlovací soustavy vnitřního osvětlení.



Výklad

7.1. Osvětlování vnitřních prostorů

Požadavky na osvětlení vnitřních prostorů v určité etapě vývoje společnosti jsou kompromisem vycházejícím z obecných zákonitostí zrakového vnímání, rozsáhlých aplikačních experimentů a statistických šetření v reálných interiérech na jedné straně, a z technických a ekonomických možností společnosti na straně druhé.

Při odvozování světelně-technických parametrů osvětlovacích soustav se vychází ze dvou souhrnných kritérií charakterizujících úroveň vidění. Jedním je zrakový výkon a druhým zraková pohoda.

Zrakový výkon je určen spíše fyziologickými vlastnostmi lidského zraku a pro danou zrakovou činnost je poměrně objektivním měřítkem úrovně osvětlení, zpravidla vyhovujícím pro prostory určené pro jasně definovanou činnost, tedy pracovní prostory.

Zraková pohoda zahrnuje i psychické činitele. Z tohoto hlediska je více ovlivněna subjektivními vlastnostmi uživatelů, a proto je upřednostňována v prostorech společenských, kulturních a oddechových (například v restauracích, kulturních domech, bytech apod.).

Správné osvětlení, navržené podle zásad současné světelné techniky a respektující psychologické, fyziologické a biologické požadavky ovlivňuje kvalitu práce, únavu a zdravotní stav lidského organismu.

□ Umělé osvětlení

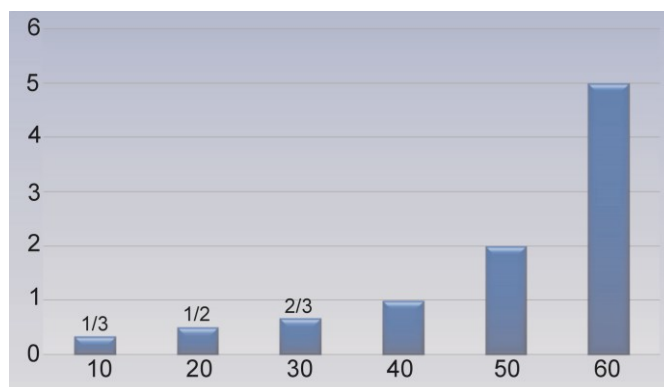
Umělé osvětlení je realizováno pomocí umělých světelných zdrojů. Jejich světlo nahrazuje denní světlo tam, kde je ho nedostatek, např. vzdálená místa od oken nebo při zastínění pracovní plochy překážkou. Moderní světelné zdroje umožňují vytvořit ve vnitřních prostorech umělé osvětlení kvantitativně srovnatelné s denním světlem.

Intenzitu umělého osvětlení navrhujeme na požadovaný zrakový výkon. Požadované intenzity osvětlení přiřazené pracovním činnostem jsou uvedeny v tab. 7.1.

Z tabulky plyne skutečnost, že čím je obtížnější zrakový výkon, tím je vyšší intenzita osvětlení na základě toho, že oko musí rozlišovat menší detaily. Potřebná intenzita se zvyšuje s délkou zrakové činnosti, s rychlostí změn pozorovaného detailu a s menšími kontrasty pozorovaných ploch. Konkrétní hodnoty osvětlení pro různé druhy činnosti jsou uvedeny v normě ČSN EN 12464-1, která byla převzata z evropské normy pro osvětlování. Hodnoty osvětlenosti pro stejný zrakový výkon se rovněž zvyšují s věkem člověka. Tato závislost je uvedena na obr. 7.1.

Osvětlenost (lx)	Prostor, místo, druh činnosti
20-30-50	základní jednoduchá zraková orientace v prostředí
50-75-100	jednoduchá orientace, kratší doba jednoduché činnosti
100-150-200	prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely, prostory obytné a společenské
200-300-500	zraková místa pro jednodušší, běžné pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500-750-1 000	zraková místa pro vizuálně náročnější déle trvající pracovní úkony
1 000-1 500-2 000	zvláště náročné zrakové úkoly
více než 2 000	velmi náročné zrakové úkoly

Tab. 7.1 Doporučené rozsahy osvětlenosti podle CIE



Obr. 7.1 Potřebná úroveň osvětlení pro stejný zrakový výkon při různém věku lidí

Základem dobré osvětlovací soustavy je splnění, kromě požadované osvětlenosti, dalších kvalitativních a kvantitativních požadavků. Hlavními parametry určujícími světelné prostředí jsou rozložení jasu, osvětlenost, oslnění, směrovost světla, podání barev, barevný tón světla a míhání světla.

Rozložení jasů - je základním kvalitativním parametrem osvětlení. Pro zrakový výkon, zrakovou pohodu a zamezení únavy jsou rozhodující jasy a jejich rozložení v zorném poli. Optimální poměr jasu místa úkolu k jasům okolí úkolu a jasům vzdáleného okolí je 10:4:3. Účelného rozložení jasů je možno dosáhnout vhodnou úpravou povrchů (stěny, stropy, nábytek, atd.) a vhodnou volbou světelných zdrojů.

Je nutno vylučovat příliš velké jasy, jež mohou způsobit oslnění, příliš velké kontrasty jasů, jež mohou způsobit únavu v důsledku trvalé readaptace zraku a příliš malé jasy a kontrasty jasů, jež vedou k monotónnímu nestimulujícímu pracovnímu prostředí.

K vytvoření vyváženého rozložení jasů všech povrchů musí být vzaty v úvahu nejen osvětlenosti povrchů, ale také činitelé odraznosti. K zabránění přitížení a ke zvýšení adaptační úrovně jsou velmi žádoucí světlé povrchy interiéru, zvláště stěn a stropů viz tabulka 7.2.

Odrazná plocha	Činitel odrazu povrchů
strop	0,7 až 0,9
stěny	0,5 až 0,8
podlaha	0,2 až 0,4

Tab. 7.2: Účelný rozsah činitelů odrazu hlavních povrchů místnosti

Osvětlenost a její rozložení v místě zrakového úkolu a v jeho bezprostředním okolí má velký vliv na to, jak rychle, bezpečně a pohodlně osoba vnímá a vykonává

zrakový úkol.

Doporučené hodnoty osvětlenosti, v místě zrakového úkolu, jsou pro přesně definované činnosti uvedené v normě ČSN EN 12464-1. V normě jsou uvedeny na srovnávací rovině, jež může být vodorovná, svislá nebo nakloněná. Průměrná osvětlenost v každém místě zrakového úkolu se nesmí zmenšit pod hodnotu uvedenou v normě, bez ohledu na stáří a stav osvětlovací soustavy. Tyto hodnoty platí pro normální zrak a při zahrnutí psychofyziologických hledisek jako jsou zraková pohoda a celková pohoda, požadavky na zrakové úkoly, zraková ergonomie, praktické zkušenosti, bezpečnost a hospodárnost.

Hodnota osvětlenosti může být upřesněna nejméně o jeden stupeň řady osvětleností, liší-li se zrakové podmínky od normálních předpokladů.

Činitel přibližně 1,5 reprezentuje nejmenší významný rozdíl subjektivního účinku osvětlenosti. V normálních podmínkách osvětlení se požaduje přibližně 20 lx pro hraniční (mezní) rozeznatelnost rysů lidského obličeje, a tato hodnota byla přijata jako nejnižší pro řadu osvětleností. Doporučená řada osvětleností (v luxech) tedy je:

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1 000 – 1 500 –
2 000 – 3 000 – 5 000

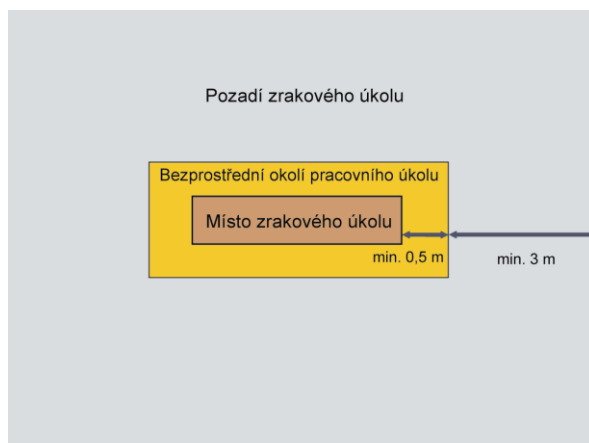
Požadovaná udržovaná osvětlenost musí být zvětšena, když je zraková činnost kritická, chyby se nákladně opravují, přesnost a vysoká produktivita jsou velmi důležité, zrakové schopnosti pracovníků jsou pod normálem, zrakové úkoly jsou neobvykle malé a málo kontrastní nebo je úkol vykonáván po neobvykle dlouhou dobu. Naopak požadované udržované osvětlenosti je možné zmenšit, když kritické detaily úkolu jsou neobvykle velké nebo mají velký kontrast nebo úkol je vykonáván po neobvykle krátkou dobu.

V prostorech s trvalým pobytem osob nesmí být udržovaná osvětlenost menší než 200 lx.

Pro pracovní místa, kde není známa velikost anebo poloha místa zrakového úkolu se postupuje takto:

- buď se celá plocha považuje za místo zrakového úkolu,
- nebo je celá plocha rovnoměrně ($U_0 \geq 0,4$) osvětlena na hodnotu osvětlenosti stanovenou projektantem. Pokud se místo zrakového úkolu stane známým, musí se návrh osvětlovací soustavy změnit tak, aby byly zajištěny požadované osvětlenosti.

Pokud není znám typ zrkového úkolu, musí projektant odhadnout možný typ zrkových úkolů a stanovit pro ně požadované parametry, přijmout předpoklady o pravděpodobných zrkových úkolech a stanovit požadavky zrkového úkolu. Pokud není znám typ zrkového úkolu, má projektant předpokládat nejpravděpodobnější zrkový úkol a uvažovat s příslušnými požadavky zrkového úkolu.



Obr. 7.2 Minimální rozměry bezprostředního okolí a pozadí úkolu ve vztahu k místu zrkového úkolu

Legenda k obr. 7.2: 1 – místo zrkového úkolu

2 – bezprostřední okolí zrkového úkolu (pás minimálně 0,5 m kolem místa zrkového úkolu uvnitř zorného pole),

3 – pozadí zrkového úkolu (minimálně 3 m široká přilehlá plocha k bezprostřednímu okolí úkolu v mezích prostoru).

Osvětlenost pozadí úkolu - v pracovních prostorech, zejména v těch bez denního osvětlení, musí být velká část všech využívaných a obsazených pracovních míst osvětlena. Oblasti známé jako pozadí úkolu, které mají šířku aspoň 3 metry a přiléhají k bezprostřednímu okolí úkolu v mezích prostoru, musí být osvětleny na hodnotu udržované osvětlenosti rovnou 1/3 osvětlenosti bezprostředního okolí úkolu.

Osvětlenosti bezprostředního okolí úkolu - musí souviset s osvětlením úkolu a musí poskytovat vyvážené rozložení jasů v zorném poli. Velké prostorové změny osvětleností v okolí úkolu mohou způsobit namáhání zraku a zrkovou nepohodu. Osvětlenost bezprostředního okolí může být menší než osvětlení úkolu, avšak nesmí být nižší než hodnoty uvedené v tab. 7.3.

Osvětlenost místa zrakového úkolu (lx)	Osvětlenost bezprostředního okolí úkolu (lx)
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
150	150
100	100
≤50	≤50
rovnoměrnost osvětlení: ≥ 0,7	rovnoměrnost osvětlení: ≥ 0,5

Tab. 7.3 Rovnoměrnost osvětlení a poměr osvětleností bezprostředního okolí úkolu

Rovnoměrnost osvětlení - místa zrakového úkolu (U_0) nesmí být menší než minimální hodnoty uvedené v tabulkách v kapitole 5 normy ČSN EN 12464-1. Rovnoměrnost osvětlení musí být u bezprostředního okolí úkolu $U_0 > 0,40$, a u pozadí úkolu $U_0 > 0,10$.

Oslnění - ve vnitřních prostorech se hlavně jedná o oslnění relativní, které může být způsobeno buď přímo zdroji světla, svítidly, nebo odrazy od lesklých povrchů. Při návrhu osvětlení musíme oslnění oka omezit na nejmenší míru dle platných norem. Toho se dosáhne správným rozmístěním svítidel, užitím svítidel s malým jasem, vhodnou mřížkou a použitím rozptylných povrchů.

Rušivé oslnění - činitel oslnění přímo od svítidel osvětlovací soustavy vnitřního prostoru je stanoven jednotným systémem hodnocení oslnění metodou CIE (UGR) podle vzorce:

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0,25}{L_b} \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (7.1)$$

Kde: L_b ...jas pozadí vypočtený jako E_{ind}/π a E_{ind} je svislá nepřímá osvětlenost oka pozorovatele ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$);

L ...jas svítící části každého svítidla ve směru oka pozorovatele ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$);

ω ...prostorový úhel svítící části každého svítidla vzhledem k oku pozorovatele (sr);

p ...činitel polohy podle Gutha pro každé svítidlo podle jeho odchýlení od směru pohledu.

Všechny uvažované předpoklady při stanovení UGR musí být uvedeny ve výkresové dokumentaci. Hodnota UGR osvětlovací soustavy nesmí přesáhnout hodnoty uvedené v normě ČSN EN 12464-1.

Omezení oslnění cloněním - jasné zdroje světla s vysokým jasnem mohou oslňovat a zhoršovat viditelnost předmětů. Tomu se musí zabránit například vhodným cloněním světelných zdrojů a světlíků nebo vhodným odstíněním jasného denního světla od oken.

Minimální úhly clonění v zorném poli jsou uvedené v tab. 7.4, musí být pro uvedené jasy zdrojů zajištěny.

Jas světelného zdroje ($\text{kcd}\cdot\text{m}^{-2}$)	Minimální úhel clonění $\alpha(^{\circ})$
20 až <50	15
50 až <500	20
≥ 500	30

Tab. 7.4 Minimální úhly clonění svítidel pro specifikované jasy světelných zdrojů

Hodnoty uvedené v tab. 7.4 se nepoužívají v případě nepřímých svítidel nebo pro svítidla s dolní složkou světelného toku montovaná pod úrovní očí.

Závojevé oslnění odrazem a oslnění odrazem - odrazy světla v místě zrakového úkolu mohou měnit viditelnost úkolu, zpravidla ji zhoršovat. Závojevé oslnění a oslnění odrazem mohou být zamezeny nebo zmenšeny uspořádáním pracovních míst vzhledem ke svítidlům, oknům a světlíkům, povrchovou úpravou (matné povrchy), omezením jasu svítidel, oken a světlíků, světlým stropem a světlými stěnami.

Směrovost světla - směr osvětlení se má volit tak, aby svítidlo nebylo v zorném poli a tudíž neoslňovalo. Světlo má dopadat do místa úkolu převážně zleva a shora, pokud možno zezadu přes levé rameno. Směřované osvětlení může být použito pro zvýraznění předmětů, vyjevení textury a vzhledu osob v prostoru. Směřované osvětlení zrakového úkolu může také ovlivnit jeho viditelnost.

Modelace je vyváženost mezi difúzním a směrovaným světlem. Je to platné kritérium jakosti osvětlení prakticky ve všech typech vnitřních prostorů. Celkový dojem vnitřního prostoru je možné zlepšit, jsou-li jeho stavební tvary, osoby a předměty v něm osvětleny tak, že jejich tvar a textura se jeví jasně a příjemně. To nastává tehdy, když světlo má převážně jeden směr; stíny, jež jsou základem dobré modelace, se tvoří bez problémů. Osvětlení nesmí být příliš směrované nebo vytvářet ostré stíny ani nesmí být příliš difúzní (modelace se nesmí zcela ztratit), což

by vedlo k velmi monotónnímu světelnému prostředí.

Hledisko barev - jakost barvy světelných zdrojů smluvně bílého světla se charakterizuje dvěma příznaky:

- (zjevný, viděný, subjektivní) barevný vzhled (tón) světla samotného světelného zdroje,
- schopnost podání barev, která ovlivňuje barevný vzhled předmětů osvětlovaných světelným zdrojem.

Tyto dva příznaky musí být uvažovány odděleně.

Barevný vzhled (tón) světelného zdroje se vztahuje k zdánlivé barvě (chromatičnosti) vyzařovaného světla. T_a se kvantifikuje náhradní teplotou chromatičnosti (T_c). Barevný tón může být popsán také podle tab. 7.5.

Druh světelného zdroje	T_c (K)
Zářivka studené denní světlo	6 500 a více
Zářivka denní světlo	5 400
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka studená bílá	4 000
Slunce při západu	3 500 ÷ 4 000
Žárovka, žárovka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	1 800

Tab. 7.5 Náhradní teplota chromatičnosti různých zdrojů světla

Volba barevného tónu je záležitostí psychologie, estetiky a přirozených požadavků. Volba bude záviset na úrovni osvětlení, barevné úpravě místnosti a nábytku, klimatickém pásmu a druhu prostoru (uživatelské oblasti). V horkých klimatických podmínkách se preferuje chladnější barevný tón, zatímco v chladnějším podnebí se upřednostňuje teplejší barevný tón světla.

Podání barev - pro zrakový výkon, pocit celkové a duševní pohody je důležité, aby barvy předmětů a lidské pokožky v prostředí byly podány přirozeně, věrně a tak, aby lidé vypadali přitažlivě a zdravě. Bezpečnostní barvy musejí být vždy rozlišitelné jako takové.

Světelné zdroje s indexem podání barev menším než 80 nesmějí být použity ve vnitřních prostorech, v nichž osoby pracují nebo pobývají dlouhodobě. Výjimky lze připustit v některých místech anebo činnostech (např. při osvětlení vysokých hal). Musí se však udělat vhodná opatření k zajištění lepšího podání barev v určených pracovních místech se stálou přítomností osob, a kde musí být rozlišovány bezpečnostní barvy.

Minimální hodnoty všeobecného indexu podání barev pro jednotlivé typy prostorů (ploch), zrakových úkolů nebo činností jsou uvedeny v normě ČSN EN 12464-1.

Míhání a stroboskopický jev - míhání působí rušivě a může vyvolat fyziologické projevy, jako například bolesti hlavy. Stroboskopický jev může vést k nebezpečným situacím při změně vnímaného pohybu strojů točivých nebo strojů s vratným pohybem.

Osvětlovací soustavy musí být navrženy tak, aby nevznikalo míhání ani stroboskopický jev. Toho lze zpravidla dosáhnout použitím napájení světelných zdrojů stejnosměrným proudem nebo vyšším kmitočtem (kolem 30 kHz).

Udržovací činitel - projekt osvětlení musí být vypracován s uvažováním celkového udržovacího činitele vypočteného pro zvolené osvětlovací zařízení, prostředí a plán údržby. Doporučená osvětlenost pro každý zrakový úkol se uvádí jako udržovaná osvětlenost. Udržovací činitel závisí na provozních charakteristikách světelných zdrojů a předřadníků, svítidel, prostředí a na plánu údržby.

Projektant musí uvést udržovací činitel a přehled předpokladů přijatých při odvození jeho hodnoty, specifikovat osvětlovací zařízení vhodné pro užití v daném prostředí, připravit kompletní plán údržby, včetně intervalů výměny světelných zdrojů, čištění svítidel a místností a způsobů jeho provádění.

Z energetického hlediska osvětlovací soustava musí vyhovovat požadavkům na osvětlení daného prostoru bez plýtvání energií. Přesto je důležité nedělat kompromisy z hlediska vizuálního a jednoduše nezmenšovat spotřebu energie. To vyžaduje vhodnou volbu osvětlovací soustavy, zařízení, řízení a využití dostupného denního světla.

Stálost osvětlení - rychlé časové změny osvětlenosti, způsobené kolísáním napětí popřípadě mechanickými příčinami, rušivě ovlivňují zrakový vjem a navíc mohou zapříčinit vznik stroboskopického jevu.

Rovnoměrnost osvětlení - je ovlivněna roztečí a rovnoměrným rozmístěním svítidel. Nedodržením požadované rovnoměrnosti negativně ovlivníme zrakový výkon tím, že oko musí stále adaptovat. Rovnoměrnost se určuje poměrem na srovnávací rovině v místě zrakového úkolu nejmenší a místně průměrnou osvětleností. Požadované rovnoměrnosti pro zrakové třídy jsou uvedeny v normách.

7.2. Osvětlování vnitřních pracovních prostor

Práce a pracoviště v kancelářích v současné době prochází velkými proměnami. Nové formy organizace kanceláří, především vytvoření skupinově flexibilního uspořádání, narůstající počet pracovišť s výpočetní technikou obsahující obrazovku a vzrůstající požadavky na strukturované uspořádání pracovišť vyžadují také změnu konvenčního osvětlení.

Proto již nestačí projektovat osvětlení na základě stanovené intenzity osvětlení a mezních křivek oslnění. Je nutné vzít v úvahu a posoudit rozložení jasu v místnosti, rozložení kontrastu, rozložení vertikální intenzity osvětlení v místnosti a uspořádání svítidel osvětlovací soustavy s přihlédnutím k pracovním činnostem a k samotnému pracovišti.

Při stanovení výchozích podmínek osvětlení pro všechny druhy činnosti (administrativní, výpočetní, konstrukční atd.) musíme mít na zřeteli, že zrak člověka je tím nejdůležitějším „pracovním nástrojem“ a osvětlení významným faktorem prostředí.

□ Pracoviště obecně

Ještě před nedávnem se všechna pracoviště s výpočetní technikou posuzovala shodně bez toho, jakým způsobem jsou využívána, jaké další činnosti jsou zde vykonávány. V současnosti lze říci, že tyto prostory můžeme poměrně snadno členit na prostory s trvalou prací s výpočetní technikou a prostory s občasnou prací s výpočetní technikou.

Pracoviště s trvalou prací s výpočetní technikou - vychází se z toho, že každé takové dílčí pracoviště je součástí daného uspořádání prostoru. Pro takové pracoviště existuje přesný popis světelnotechnických vlastností použitých svítidel.

Přitom u řadové skladby pracovišť je již situace komplikovanější. Osvětlovací soustavy takových kanceláří by měly mít pravidelné rozmístění svítidel na stropě, popřípadě ve světelných pásích bílých velkoplošných svítidel s mřížkami orientovanými paralelně k oknu.

Podle úrovně odrazných ploch vymežujících prostor kanceláře mohly v tomto případě vzniknout jasy, které často převyšovaly poměr 1 : 10 stanovený pro zrakovou práci v kancelářích. Optimální hodnoty odraznosti dílčích ploch v kancelářském prostoru jsou uvedeny v tab. 7.6.

Při podrobné analýze pracoviště s trvalou prací s výpočetní technikou lze rozdělit běžné pohledy pracovníka do směrů na klávesnici, obrazovku, předlohu, plochu pracovního stolu a vertikální dělící plochu pracoviště.

Plocha v místnosti	Odraznost $\rho_o(-)$	Osvětlení E (%)	Jas L (%)
Místo úkolu	0,8	100	100
Okolí úkolu	0,35	100	40
Stěny	0,5	50 až 80	30
Strop	0,7	30 až 90	30
Nábytek	0,3	---	20
Podlaha	0,2	50 až 100	25

Tab. 7.6: Optimální hodnoty odraznosti, osvětlení a jasu v kanceláři pro dílčí plochy

Pracoviště s občasnou prací s výpočetní technikou můžeme rozdělit na čtení, psaní, studium, práce s výpočetní technikou, tvůrčí práce, plná koncentrace a komunikativní činnost se zákazníky či spolupracovníky.

Nejvýhodnější by bylo denní osvětlení přicházející z levé strany. Ale tento druh přirozeného světla nesplňuje všechny parametry, není k dispozici vždy, musí být v některých případech potlačeno či zcela eliminováno. K tomuto účelu používáme žaluzie.

Opětovné splnění všech určených požadavků musí platit nejen pro jednu činnost. Činností je více, a proto i osvětlovací soustava musí být odlišná od předcházejícího typu pracoviště, kde je trvalá činnost s výpočetní technikou.

Nejrozsáhlejší část normy ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory obsahuje vysvětlení skladby rozsáhlých tabulek, přehledný obsah tabulek podle oborů a následně samotný tabulkový přehled požadavků pro jednotlivé prostory a definované lidské činnosti.

Tyto oblasti jsou rozděleny následovně:

- komunikační zóny a společné prostory v budovách,
- průmyslové činnosti a prostory,
- administrativní prostory (kanceláře),
- obchodní prostory,
- veřejné prostory,
- školská a výchovná zařízení,
- zdravotnická zařízení,
- dopravní prostory.

U každé položky je uvedena udržovaná osvětlenost, maximálně přípustná hodnota indexu oslnění v systému UGR, minimální hodnota všeobecného indexu podání barev a u některých položek důležité poznámky k aplikaci těchto parametrů. Nejsou-li

v seznamu některé místnosti (prostory), úkoly nebo aktivity uvedeny, musí se převzít hodnoty pro podobné srovnatelné situace.

Ukázka požadavků na osvětlení vzdělávacích zařízení (citováno z normy ČSN EN 12464-1). V tabulce jsou vybrány pouze některé části normy.

Ref. číslo	Druh prostoru, úkolu nebo činnosti	Ě _m (lx)	UGR _L –	U _o –	R _a –	Specifické požadavky
5.36.1	učebny, konzultační místnosti	300	19	0,6	80	osvětlení má být regulovatelné
5.36.3	auditoria a posluchárny	500	19	0,6	80	osvětlení má být regulovatelné, aby splňovalo požadavky na prostory pro audiovizuální prezentace
5.36.5	demonstrační stůl	500	19	0,7	80	v přednáškových sálech 750 lx
5.36.7	místnosti pro výtvarnou výchovu v uměleckých školách	750	19	0,7	90	5 000 K < T _{CP} 6 500 K.
5.36.9	místnosti pro praktickou výuku a laboratoře	500	19	0,6	80	
5.36.17	komunikační prostory a chodby	100	25	0,4	80	

Tab. 7.7: Vzdělávací (školská a výchovná) zařízení

7.3. Osvětlení obytných prostor

□ Denní světlo v bytových prostorech

Pro provádění zrakově náročných činností musí být v každé místnosti dostatečně velké pásmo s denním osvětlením splňující požadavky na pracovní prostředí. V obytné místnosti lze předpokládat činnosti jako čtení, psaní, kreslení, rýsování, práci se sledováním údajů na obrazovce, šití, zrakově náročné zájmové činnosti (filatelie, numizmatika, botanické průzkumy s lupou, mikroskopem). Při zabezpečení dostatečného osvětlení ve středu místnosti podle platných předpisů průměrná hodnota činitele denní osvětlenosti 0,9 % ve středu hloubky místnosti předpokládá, že v blízkosti okna bude dost světla i pro náročnější zrakové činnosti. Takové osvětlení je též dostatečné z hlediska fyziologického (vlivu na endokrinní systém) a pokud není dolní hrana průhledného zasklení výše než 1 200 mm nad podlahou, umožňuje dobrý výhled do venkovního prostředí i sedícím osobám. Horní hrana průhledné části zasklení má být výše než 1 800 mm, čímž je zaručen výhled i pro stojící osobu. Zároveň má sedící osoba ve středu místnosti vidět část oblohy oknem. Ve většině případů jsou tyto požadavky splněny při dodržení závazných požadavků státních technických norem nebo hygienických předpisů.

Ve stísněných poměrech městských center nebo při rekonstrukci stávajících budov není vždy možné dodržet hodnoty činitele denní osvětlenosti. Je třeba však využít možnosti takových stavebních úprav, které částečně eliminují nedostatečné množství světla tím, že se v maximální možné míře použijí opatření na dobré jasové poměry:

- co největší šířka okna, minimalizace neprůsvitných částí okenní stěny (okno od stěny po stěnu), minimalizace okenních pilířů,
- minimalizace nebo úplné vyloučení nadokenního záklenku,
- vyloučení lodžie nebo stínící balkónové desky před místností s velkou délkou,
- použití žaluzií s možností redistribuce světla do zadní části místnosti,
- přisvětlení zadní části místnosti oknem v boční stěně nebo světlíkem,
- použití co nejsvětlejších povrchových úprav stěn, stropu, podlahy a zařízení místnosti,
- světlá povrchová úprava zastiňující fasády.

□ Umělé osvětlení v bytových prostorech

Vstupní prostory - je-li z nich přímý vchod do volného exteriéru, je to místo s rozporuplnými požadavky na osvětlení. To proto, že se oko obtížně srovnává s velkými rozdíly mezi jasy na volném prostranství a v bytě. V nočních hodinách by měl být vstupní prostor nasvětlen decentněji, aby se zrak snadněji adaptoval na tmu při odchodu a na světlo při vstupu do domu. Ve dne je zase žádoucí, aby byl osvětlen na vysokou hladinu. Důvody jsou stejné jako v noci, jen v opačném smyslu. Pomine-li se vysoká intenzita osvětlení, vstupní prostor by měl mít celkové osvětlení. V každé předsíni je obvykle zrcadlo, u kterého je osvětlení, které směřuje na osobu stojící před zrcadlem, aby se v něm mohla zhlédnout. V předsíni zajišťují celkové osvětlení stropní svítidla, u zrcadla další svítidlo umožní zkontrolovat vzhled osoby při odchodu.

Schodiště a chodby - komunikace v bytě se osvětlují podobně jako vstup. Je třeba upozornit na starý nešvar - osvětlovat schodiště jedním svítidlem v patře, popř. druhým na podestě. Pro bezpečnou chůzi je žádoucí rovnoměrně osvětlit celé schodiště, a to je právě zmíněnými způsoby možné jen výjimečně. Je vhodné umístit ještě jedno nebo i několik svítidel na stěny ramen nebo řadu menších do podschodnice.

Obývací pokoj - osvětlení je třeba přizpůsobit rozdílným požadavkům při různých činnostech. Celkové osvětlení doplněné řadou místních svítidel, nástěnných, stolních nebo stojanových. V obývacím pokoji lze spustit svítidlo nad konferenční stůl co nejnižší, avšak jen tak nízko, aby se o ně neudeřil vstávající z křesla a také, aby nezakrývalo obličej proti sobě sedících osob. Nesmí se zapomenout ani na osvětlení ke sledování televize. Je velmi častou chybou sledování obrazovky v naprosté tmě. Vysoký kontrast mezi obrazovkou a tmavou stěnou je příčinou únavy zraku, ale i jiných zdravotních potíží. Vhodné je proto osvětlit stěnu svítidlem, které je umístěno za obrazovkou. V obývacím pokoji je dobré, když lze ovládat intenzitu

osvětlení stmívačem.



Obr. 7.3: Osvětlení chodby



Obr. 7.4: Osvětlení obývacího pokoje

Jídelna - je dobré, když světlo dopadá na prostřenou tabuli. Vyšší hladina osvětlení není na škodu, vhodné je použití svítidla spuštěného poměrně nízko nad stolem. Opět je třeba dodržet zásady jako v případě svítidla spuštěného nad konferenční stůlek v obývacího pokoje. Ani zde se nesmí zapomenout na určitou míru celkového osvětlení.

Kuchyně - pracovní deska je místem s vysokými požadavky na zrakovou práci. Je dobré, když je osvětlena samostatným svítidlem umístěným pod horní skříňky linky - vhodná jsou ta pro lineární zářivky. Svítidla s halogenovými žárovkami jsou spíše módní záležitostí (nedostatečná osvětlenost a větší počet bodových zdrojů světla jsou příčinou několikanásobných stínů - to zhoršuje prostorové vnímání a zvyšuje riziko úrazu). Rovněž je vhodné, aby bylo vidět do hrnců na sporáku. Osvětlení, které bývá součástí odsavače par, je jen zřídka vyhovující.

Pracovna, dílna - hladina osvětlení se volí v souladu s požadavky na zrakovou práci a je třeba respektovat návyky uživatele. Pokud dosahují osvětlenosti v pracovních vysokých hodnot (nebo naopak nízkých), je dobré dbát na to, aby sousední prostor nebyl osvětlen výrazně jinak. Pracovny pro tvůrčí činnost, ať jsou to grafické práce,

modelařina, amatérská elektrotechnika nebo kovářství, všechny takové pracovní nebo dílny je žádoucí osvětlit stejně, jako se osvětlují profesionální pracoviště odpovídajícího charakteru. Na obr. 6.5 je celkové osvětlení pracovní, které zajišťují zářivková svítidla na stropě. Pro dostatečné osvětlení na pracovním stole je vhodné celkové osvětlení doplnit stojanovým svítidlem, které zajistí množství i správný směr světla. Pro oživení prostoru lze využít spuštěné svítidlo nad květinami nebo uměleckým dílem.



Obr. 7.5: Osvětlení pracovní

Dětský pokoj - celkové osvětlení je nezbytné, protože nikdy není předem jasné, které místo si dítě zvolí za nejvhodnější pro své hry. Je nutné osvětlit pracovní stolek. Ten nejlépe samostatným svítidlem, stejně jako osvětlení u lůžka. Osvětlení dětského pokoje má však jednu specifiku navíc, kterou se liší od ostatních prostorů v bytě. Dítě se na svět dívá ze své perspektivy, kdy se svítidlo, které je dostatečně cloněno pro dospělého, stává zdrojem oslnění. Je proto lépe se vyvarovat svítidel otevřených do dolního prostoru; vhodnější jsou svítidla uzavřená.

Ložnice - osvětlení má umožnit základní orientaci. Bezesporu je vhodné, když je lze přizpůsobit okamžité náladě, tedy je-li možné stmívání. Vypínač celkového osvětlení v hlavách lůžka není žádný přepych, ale věc čistě praktická. Samozřejmostí je nezávislé osvětlení u lůžka tak, aby co nejméně rušilo. Funguje-li ložnice i jako šatna, je vhodné celkové osvětlení o něco intenzivnější. Toho se dosáhne osvětlením šatních skříní. Je možné použít směrovatelná svítidla. Jestliže se použije lištový systém, půjde o řešení téměř dokonalé. Svítidla by měla být umístěna s určitým odstupem od skříně a mírně z boku, aby nebylo jejich světlo zacloněno osobou. Svítidlem se míní například halogenová žárovka na malé napětí nebo kompaktní zářivka.

Koupelna, WC - stejně jako v jiných prostorách bytu, i v koupelně je třeba zajistit celkové osvětlení. Stropní svítidlo obvykle vyhoví. Je však třeba respektovat bezpečnostní předpisy a normy, které vymezují použitelná svítidla (s jakým krytím před nebezpečným dotykem) a místa, která jsou pro jejich umístění přípustná. Opatrnost je nanejvýš na místě při řešení osvětlení zrcadla. Vhodné je umístit lineární zdroje podél všech stran zrcadla nebo alespoň okolo bočních. U spodní hrany má smysl pro pány, aby dobře viděli pod bradu při holení. Co se týče osvětlení

záchodu, je řešení poměrně jednoduché. Obvykle postačuje svítidlo v ose mísy nad dveřmi nebo na stropě. Jen je třeba je umístit tak, aby si čtenář nestínil.

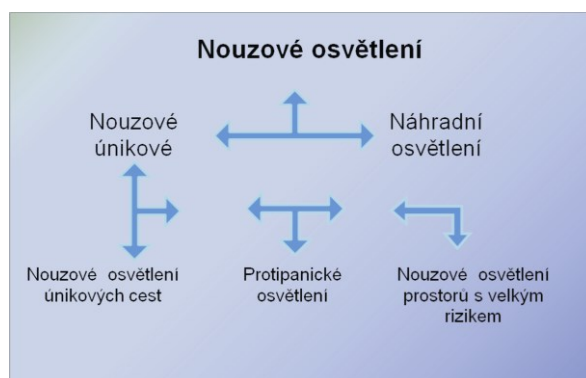
7.4. Nouzové osvětlení

Elektrická osvětlovací zařízení se nejčastěji považují za spotřebiče třetího stupně důležitosti, který nevyžaduje zajištění dodávky elektrické energie záskokovým náhradním zdrojem. To znamená, že obvykle vyhoví jediný napájecí zdroj a jediný přívod. V elektrickém silovém rozvodu však existují i náročnější podmínky pro provoz osvětlovacích soustav, dané například požadavky technologického procesu při výrobě nebo požadavky bezpečnosti osob shromážděných v osvětlovaném prostoru apod. V takových podmínkách se stupeň důležitosti dodávky elektrické energie stanoví podle účelu a funkce prostoru či podle nejdelší povolené doby přerušení osvětlení, a z toho vyplývají i požadavky na provedení rozvodného zařízení.

Je-li třeba zajistit náhradní nebo nouzové osvětlení, musí být napájeno jako zařízení prvního stupně důležitosti, to znamená z nezávislého záskokového zdroje. Volbu záskokového zdroje ovlivňují podmínky pro činnost osvětlovací soustavy, zejména rozsah náhradního osvětlení, tedy požadovaný příkon soustavy, požadovaná doba činnosti této náhradní soustavy, přípustná doba výpadku osvětlení a podmínky pro umístění náhradního zdroje a jeho údržbu.

□ Rozdělení nouzového osvětlení

Nouzové osvětlení se zřizuje pro použití v případě selhání normálního osvětlení a je proto napájeno ze zdroje nezávislého na tom, který napájí normální osvětlení. Obecně lze nouzové osvětlení rozdělit do několika kategorií.

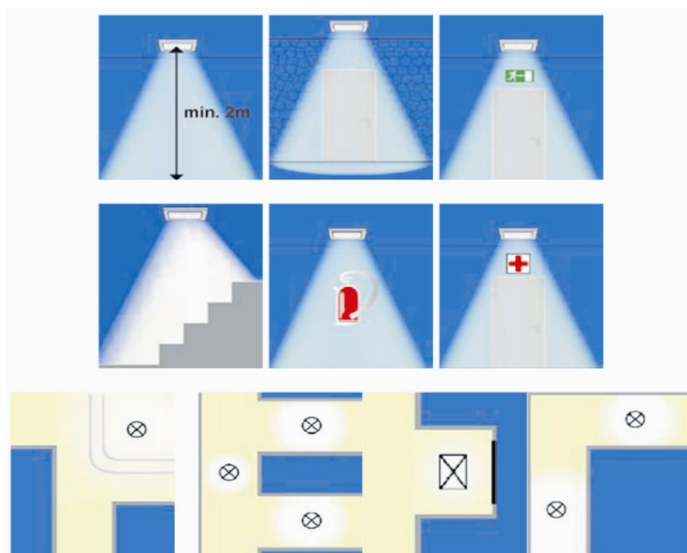


Obr. 7.6. Rozdělení nouzového osvětlení

Nouzové únikové osvětlení - hlavním účelem nouzového osvětlení je umožnit bezpečný odchod z prostoru při výpadku normálního napájení. Nouzové únikové osvětlení musí být poskytnuto včas, automaticky a po potřebnou dobu pro daný typ prostoru. Důležité je si uvědomit, že nouzové únikové osvětlení musí být aktivováno nejen při úplném výpadku napájení normálního osvětlení, ale i v případě, že se jedná

o omezenou poruchu, jako je např. porucha v koncovém obvodu. Zároveň pak platí, že nouzové únikové osvětlení není navrženo k tomu, aby umožňovalo pokračování normální činnosti v provozních nebo obytných prostorech v případě výpadku normálního nebo náhradního osvětlení. Obecně by nouzové únikové osvětlení mělo splňovat tyto podmínky:

- osvětlení označení únikové cesty,
- zajištění osvětlení na těchto cestách a po celé jejich délce tak, aby byl umožněn bezpečný pohyb směrem k východům a těmito východy na místo bezpečí,
- zajištění toho, aby požární hlásiče a požární zařízení podél únikových cest mohla být snadno lokalizována a použita, pro umožnění provádění činnosti související s bezpečnostními opatřeními.



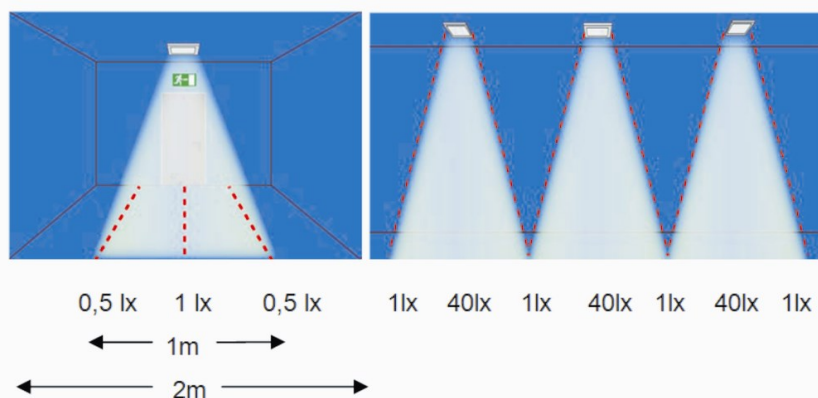
Obr. 7.7: Znárodnění situací, v nichž je nutno použít nouzové osvětlení

Svítilno nouzového osvětlení splňující požadavky ČSN EN 60598-2-22 musí být umístěno na následujících místech viz obr.7.7:

- každé dveře určené pro nouzový východ,
- v blízkosti schodiště tak, aby každá řada schodů byla osvětlena přímým světlem,
- v blízkosti každé změny úrovně,
- nařízené únikové východy a bezpečnostní značky,
- při každé změně směru,
- při každém křížení chodeb,
- vně a v blízkosti každého konečného východu,
- v blízkosti každého místa první pomoci,
- v blízkosti každého hasícího prostředku a požárního hlásiče.

Nouzové osvětlení únikových cest - účelem nouzového osvětlení únikových cest je umožnit přítomným bezpečný odchod z prostoru poskytnutím vhodných podmínek pro vidění a určení směru na únikových cestách a na zvláštních místech a zajistit snadné dosažení a použití protipožárních a bezpečnostních zařízení viz obr. 7.8.

- Pro únikové cesty do šířky 2 m nesmí být horizontální osvětlenost na podlaze podél osy únikové cesty menší než 1 lx a středový pás, široký alespoň polovinu šíře cesty, musí být osvětlen minimálně na 50 % této hodnoty.
- Poměr maximální a minimální osvětlenosti podél osy únikové cesty nesmí být větší než 40 : 1.
- Omezující oslnění musí být zmenšeno omezením svítivosti svítidel v zorném poli (viz ČSN EN1838).
- Pro rozlišení bezpečnostních barev musí být minimální hodnota indexu podání barev Ra světelných zdrojů nouzových svítidel 40.
- Minimální doba svícení nouzového únikového osvětlení přípustná pro únikové účely musí být 1 hodina.
- Nouzové osvětlení únikových cest musí dosáhnout 50 % požadované osvětlenosti do 5 s a plné požadované osvětlenosti do 60 s, viz obr. 7.10



Obr. 7.8: Schématické znázornění požadavků na nouzové únikové osvětlení

Antistresové protipanické osvětlení – účelem tohoto osvětlení (veřejných prostorů) je zmenšit pravděpodobnost vzniku davové paniky a umožnit přítomným bezpečný pohyb směrem k únikovým cestám poskytnutím vhodných podmínek pro vidění a určení směru. Směr světla na únikových cestách a ve veřejných prostorech má být dolů k pracovní rovině. Osvětleny však mají být také všechny překážky do výšky 2 m nad touto plochou. Je používáno v prostorech, ve kterých nejsou určeny únikové cesty, tj. v halách nebo prostorech s podlahovou plochou větší než 60 m², nebo v menších prostorech, pokud v nich je přidavné riziko, jako je používání prostoru velkým množstvím lidí.

Vodorovná osvětlenost nesmí být menší než 0,5 lx na úrovni podlahy uvnitř prázdného prostoru s výjimkou obvodového pruhu o šíři 0,5 m.

Poměr maximální a minimální osvětlenosti protipanického osvětlení v prostoru nesmí být větší než 40 : 1.

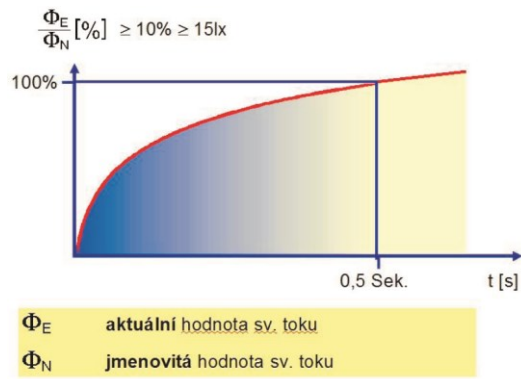
- Omezující oslnění musí být zmenšeno omezením svítivosti svítidel v zorném poli (viz ČSN EN1838).
- Pro rozlišení bezpečnostních barev musí být minimální hodnota indexu podání barev Ra světelných zdrojů nouzových svítidel 40.
- Minimální dovolená doba pro únik je 1 hodina.
- Protipanické osvětlení musí dosáhnout 50 % požadované osvětlenosti do 5 s a plně požadované osvětlenosti do 60 s, viz obr. 7.10.

Nouzové osvětlení prostorů s velkým rizikem - účelem nouzového osvětlení prostorů s velkým rizikem je přispět k bezpečnosti lidí při potencionálně nebezpečných procesech nebo situacích a umožnit jim řádné ukončení těchto činností uskutečňovaných pro bezpečnost ostatních uživatelů těchto prostorů.

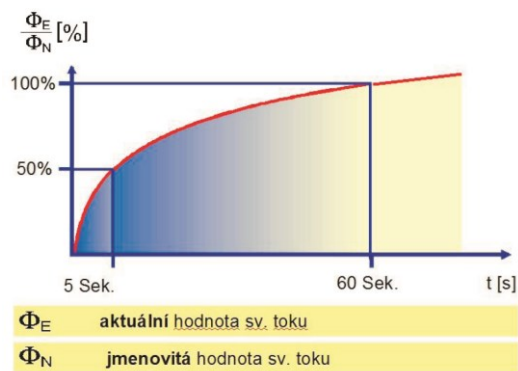
- V prostorách s velkým rizikem nesmí udržovaná osvětlenost na srovnávací rovině být menší než 10 % požadované udržované osvětlenosti pro danou činnost, avšak nesmí být menší než 15 lx.
- Osvětlení nesmí způsobovat škodlivý stroboskopický jev.
- Rovnoměrnost nouzového osvětlení s velkým rizikem nesmí být menší než 0,1.
- Omezující oslnění musí být zmenšeno omezením svítivosti svítidel v zorném poli (viz ČSN EN1838).
- Pro rozlišení bezpečnostních barev musí být minimální hodnota indexu podání barev Ra světelných zdrojů nouzových svítidel 40.
- Minimální doba svícení musí být rovna době trvání nebezpečí pro osoby.
- Nouzové osvětlení prostorů s velkým rizikem musí poskytnout požadovanou osvětlenost trvale, nebo do 0,5 s v závislosti na jeho použití, viz obr. 7.9.

Náhradní osvětlení - účelem náhradního osvětlení je umožnit pokračování v běžné činnosti bez podstatných změn (IEC 60050). Použije-li se náhradní osvětlení pro nouzové únikové osvětlení, musí splňovat rozhodující požadavky normy ČSN EN 1838. Je-li hladina náhradního osvětlení nižší než u minimálního normálního osvětlení, může být použito pouze pro přerušení nebo dokončení činnosti.

Osvětlení samostatné části únikové cesty systémem nouzového únikového osvětlení musí být provedeno pomocí dvou nebo více svítidel, aby se celý systém určování směru k východu nestal neúčinným při poruše jednoho svítidla.



Obr. 7.9: Dostupnost požadované hladiny osvětlenosti pro prostory s velkým rizikem



Obr. 7.10: Dostupnost požadované hladiny osvětlenosti pro únikové cesty a protipanické prostory



Shrnutí pojmů

- Stanovení správného způsobu osvětlení ve vnitřních prostorech je velice důležité nejen z hlediska vlivu na sběr informací pozorovatelem, ale má důležitý vliv na zdraví pozorovatele a jeho psychickou pohodu.
- Minimální požadavky na hodnoty osvětlenosti pro různé typy prostorů a druhy činností.



Otázky

1. Definujte pojem rovnoměrnost osvětlení.
2. Čím můžeme regulovat osvětlovací soustavu?
3. Jaké jsou druhy rozdělení světla ve vnitřních prostorech?



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

8 ŘÍZENÍ PROVOZU OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV



Čas ke studiu: 80 MINUT



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- Možnosti stmívání světelných zdrojů.
- Přínosy regulace osvětlovacích soustav.
- Výhody digitálního šíření osvětlovacích soustav.



Výklad

8.1. Řízení a regulace osvětlení

Mezi hlavní důvody regulace osvětlení patří dosažení požadovaného osvětlení s ohledem na vykonávanou činnost, přizpůsobení osvětlení požadavkům uživatele, dosažení požadovaného osvětlení v závislosti na úrovni denního světla a snížení provozních nákladů na osvětlení. Výsledkem regulace osvětlení je zlepšení kvality osvětlení, zpříjemnění pobytu a práce, snížení příkonu svítidel a ztrát na napájecím vedení. Dříve byly světelné zdroje regulovány z důvodu přizpůsobení jasů určité situaci, v posledních desetiletích osvětlovací zařízení regulují intenzitu osvětlení převážně z ekonomického hlediska. S vývojem elektronických technologií se ustupuje od klasického způsobu ovládání osvětlovací soustavy změnou napájecího napětí. Přistupuje se k řízení osvětlení pomocí různých inteligentních řídicích systémů. Tyto systémy poskytují možnost řídit a ovládat osvětlovací soustavu z hlediska maximálního využití denního světla a přítomnosti osob. V dnešní době existují systémy, které se zabývají nejen řízením osvětlení, ale také ovládáním všech technologií v budově, jako jsou vytápění, klimatizace, bezpečnostní systémy a požární signalizace. Přestože ekonomické a energetické úspory jsou hlavním kritériem pro volbu těchto systémů, nabízí tyto systémy také zvýšení komfortu osvětlování a provozní bezpečnosti.

Nejdůležitější kritéria pro řízení umělého osvětlení:

- **Komfort řízení** – spočívá v poskytnutí pohodlného ovládání dané osvětlovací soustavy. Komfort spojený s kvalitou řízení osvětlovací soustavy se dosahuje použitím různých senzorů a dálkových ovládaní a vzájemné provázanosti jednotlivých zařízení.
- **Úspora elektrické energie** – řídicí systémy dosahují vysoké úspory při optimálním návrhu osvětlovací soustavy ve spojení s využitím dostupného denního světla, s časovými spínači a s použitím světelných a pohybových senzorů.

- **Flexibilita** – přizpůsobivost řídicího systému je důležitou vlastností řídicích prvků zabezpečující variabilitu použití.
- **Přesnost a funkčnost systému** – je dána kvalitou použitých řídicích prvků,
- **Ekonomické náklady** – jsou jedním z rozhodujících kritérií při výběru řídicího systému a souvisí s předcházejícími kritérii.

Regulovat osvětlovací soustavu lze:

- **klasickými spínači** – řízením rovnoměrně rozmístěné osvětlovací soustavy dosáhneme tzv. okruhování svítidel a jednotlivé okruhy spínáme vypínači nebo časovým naprogramováním. Je to jeden s nejjednodušších principů řízení osvětlovacích soustav. Nutná je ovšem podmínka zachování vyhovující rovnoměrnosti osvětlení a intenzity osvětlení. Rozsah stmívání bývá obvykle 100 % a 50 %. Hlavní výhodou tohoto řízení jsou velmi nízké investiční náklady.
- **stmívači** – dosahujeme plynulé regulace osvětlovací soustavy svítidel. Existují různé druhy stmívačů od analogových až po elektronické v závislosti na použitém zdroji osvětlení a předřadného přístroje. Tyto stmívače můžeme řídit ručně pomocí tlačítek, řídicím systémem nebo dálkovým ovládáním. Povel ke stmívání může být také spuštěn z čidla přítomnosti osob, čidlem na denní osvětlení nebo časovým spínačem. Při návrhu stmívání, se nemůže u některých světelných zdrojů využívat celý rozsah změny světelného toku viz tab. 8.1.

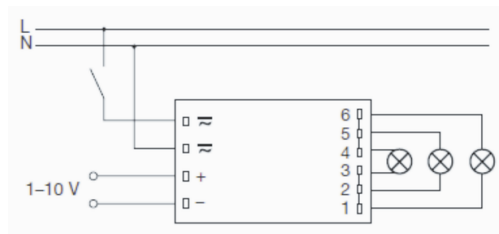
Druh svítidla	Rozsah regulace (%)
Svítidlo se žárovkami	0-100
Svítidlo s halogenovými žárovkami	0-100
Zářivkové svítidlo s klasickým předřadníkem	50-100
Zářivkové svítidlo s elektronickým předřadníkem	1-100
Svítidlo s halogenidovou výbojkou	70-100
LED svítidlo	0-100

Tab. 8.1 Rozsah regulace pro různé typy světelných zdrojů

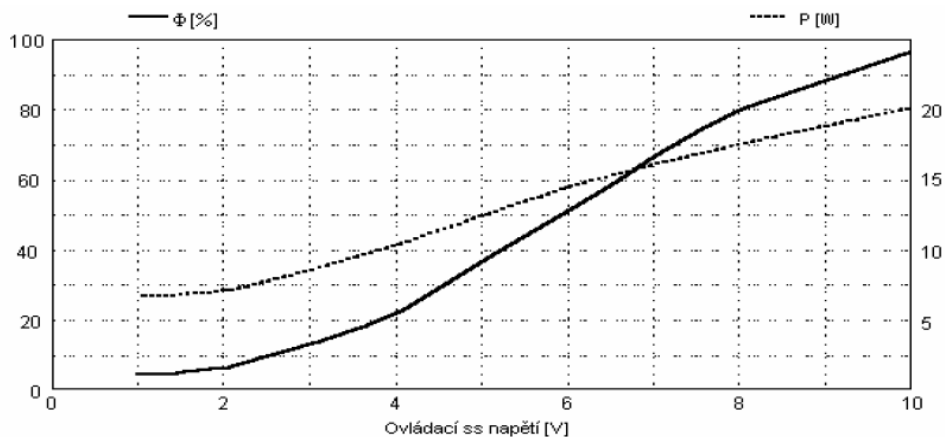
8.2. Řídicí a kontrolní systémy

□ Analogové řízení

Analogově řízené elektronické předřadníky jsou ovládány úrovní řídicího napětí na vstupu předřadníku. Pro toto ovládání je použito dvou vodičového signálního vedení. U analogového systému dochází k úbytkům napětí na vedení a nemusí být tedy splněna podmínka nastavení všech elektrických předřadníků osvětlovací soustavy na stejnou úroveň. Řídicí napětí je v rozsahu 1 - 10 V.



Obr. 8.1 Regulace halogenových žárovek s elektronickým stmívatelným transformátorem 1 ÷ 10 V



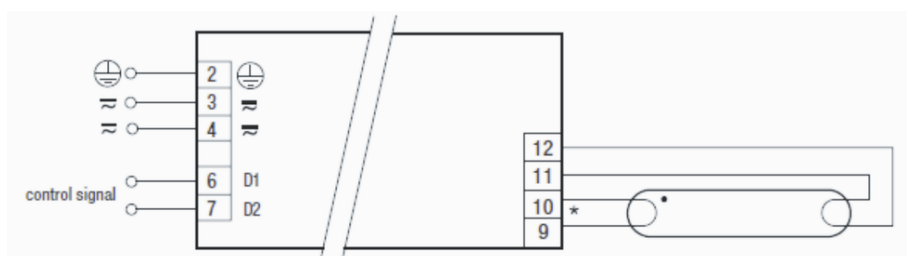
Obr. 8.2 Graf závislosti světelného toku a příkonu na ovládacím napětí

□ Digitální řízení

Dnes již zaběhlým standardem je digitální řízení elektronických předřadníků. Zde se používá starší rozhraní DSI nebo novější DALI. Výhodou obou (DSI i DALI), oproti analogovému přenosu, je větší odolnost proti rušení a proti přepólování řídicího napětí. DALI rozhraní má možnost zpětného hlášení nefunkčního světelného zdroje. Systémové rozhraní DALI navíc umožňuje uložit světelné scény do paměti přístroje, nejsou tedy zapotřebí další paměťové moduly. Řízení probíhá opět po vedení (sběrnici), ale pomocí digitálního telegramu. Digitálním ovládáním je zajištěno nastavení všech stmívatelných předřadníků na stejnou úroveň.

Rozhraní DSI

V DSI (Digital Serial Interface = digitální sériové rozhraní) se převádí signály obslužných elementů (tlačítka, senzory, domovní řídicí systémy atd.) na digitální data a přenáší je k jednotlivým elektronickým předřadným přístrojům. Protože jednotlivé předřadníky jsou řízeny digitálně, je úroveň světelného toku od prvního do posledního svítidla stejná. V digitálním stmívacím systému jsou jednotlivé hodnoty stmívání přiřazeny jedné definované hodnotě světla. Odstupňování je v souladu s logaritmickou křivkou citlivosti oka, vnímání průběhu stmívání okem je proto lineární.



Obr. 8.3 Schéma zapojení stmívatelného elektronického předřadníku DSI

Rozhraní DALI

Vlastní protokol DALI byl vyvinut v polovině devadesátých let mezinárodní elektrotechnickou komisí (International Electrotechnical Commission - IEC). Ovládání pomocí analogových rozhraní, jako je systém 1 - 10 V, neumožňuje ani flexibilitu ani možnost řízení jednotlivých svítidel v osvětlovacím systému. Proto byl vyvinut sběrniceový systém, který umožňuje digitální komunikaci mezi všemi zúčastněnými komponenty v osvětlovacím systému nebo v celých systémech správy budov. Systém DALI je možné integrovat jako subsystém do nadřazeného systému správy budovy.

DALI je akronymum a znamená (Digital Addressable Lighting Interface = digitální adresovatelné světelné rozhraní). Je to mezinárodní norma, která zaručuje vzájemnou kompatibilitu řízených stmívatelných předřadníků od různých výrobců. Rozhraní DALI je uvedeno v normě zářivkového předřadníku IEC 60929 v příloze E. DALI protokol určuje vzájemnou digitální komunikaci mezi jednotlivými prvky osvětlovací soustavy. Jsou zde vyspecifikovány parametry přenosu a definovány příkazy pro řízené prvky a jejich odpovědi včetně definice datové struktury. Každý

prvek lze individuálně řídit, protože má svoji předepsanou adresu. Řízené prvky jsou rozděleny podle typů:

- typ 0 - digitální předřadníky pro lineární nebo kompaktní zářivky,
- typ 1 - veškerá zařízení nouzového osvětlení,
- typ 2 - prvky s vysokotlakými výbojkovými zdroji,
- typ 3 - řízené digitální transformátory pro nízkonapěťové halogenové zdroje,
- typ 4 - fázové měniče pro klasické a halogenové žárovky,
- typ 5 - prvky s analogovým výstupem 1 - 10V,
- typ 6 - 255 - rezerva pro další vyvíjené prvky, již dnes jsou k dispozici DALI řadiče pro LED diody, standardně většina výrobců dodává reléové moduly atd.

Systém DALI byl navržen pro:

- max. 64 individuálních jednotek (individuálních adres),
- max. 16 skupin (skupinových adres),
- max. 16 scén (světelných hodnot scén).

DALI sběrnice zároveň napájí všechny prvky v systému a celkový příkon prvků zapojených na DALI sběrnici nesmí překročit 250 mA. Limitní délka sběrnice nesmí překročit 300 m nebo pokles napětí 2 V.

Některé z možností DALI protokolu: vypnout, stmívej na úroveň, krok nahoru, nastav aktuální úroveň, krok dolů, nastav výkon na úroveň, zapni a krokuj nahoru, nastav úroveň poruch systému, nastav maximum, nastav čas stmívání, krokuj dolů a vypni, nastav rychlost stmívání, nastav minimum, nastav scénu, odeber ze skupiny.

Některé z příkazů DALI protokolu: aktuální úroveň, typ scény, čas stmívání, maximální úroveň, úroveň poruch systému, příslušnost ke skupině, typ verze, minimální úroveň.

Porovnání analogového ovládání 1 - 10 V versus DALI:

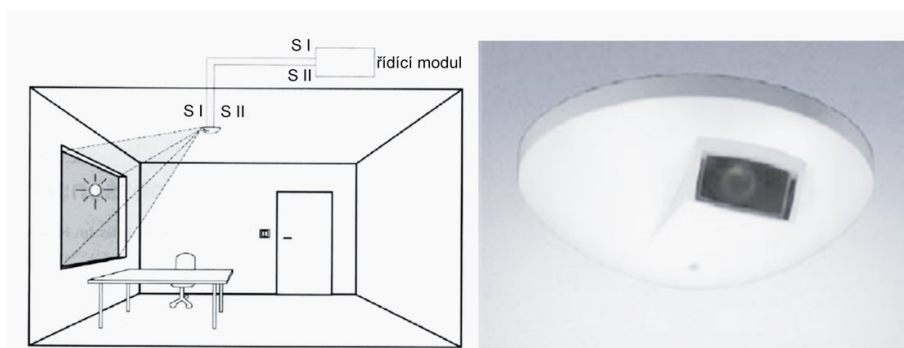
- Analogové ovládání 1 - 10 V: galvanické oddělení řídicího rozhraní, dvoudrátové vedení, rozsah stmívání 1 až 100%, není zpětné hlášení, neadresovatelné zařízení, nelze vypínat jednotky pomocí rozhraní.
- DALI: galvanické oddělení řídicího rozhraní, dvoudrátové vedení, rozsah stmívání 1 - 100%, zpětné hlášení provozního stavu, skupinové, individuální a vysílací adresy, paměť na uložení scén, programovatelný průběh stmívání, napojení na systém správy budov pomocí konvektorů, snadná nová konfigurace systému a integrace nových komponentů.

Senzory

Inteligentní řídicí systémy využívají senzory k automatické regulaci umělého osvětlení. Senzory mohou snímat intenzitu denního osvětlení, intenzitu osvětlení v místnosti a přítomnost osob. Získané informace zpracuje řídicí systém a nastaví míru regulace.

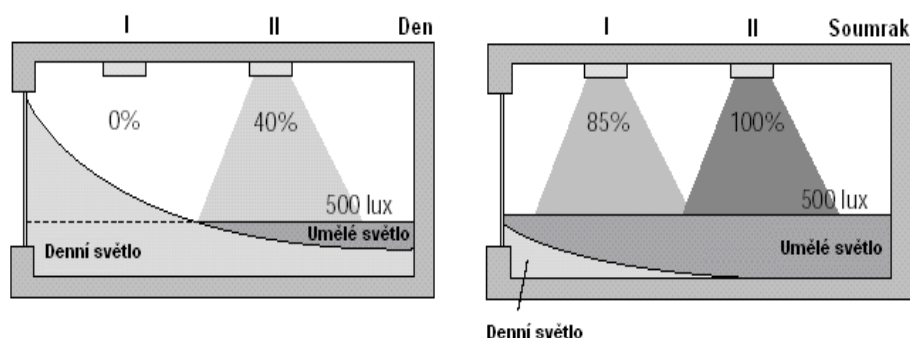
Světelné senzory

Světelné senzory používají pro snímání intenzity osvětlení především fotodiody anebo fototranzistory. Některé typy senzorů mohou přímo ovládat stmívatelné elektronické předřadníky, přičemž nastavení referenční hodnoty osvětlenosti se provádí přímo na senzoru. Napájení senzoru se provádí přímo z předřadníků nebo z řídicích jednotek.



Obr. 8.4 Příklad použití světelného senzoru typ LSD pro snímání osvětlení

Pomocí řídicí jednotky může čidlo ovládat dvě skupiny svítidel (I, II) tak, aby intenzita osvětlení v místnosti byla na konstantní hodnotě v průběhu celého dne.



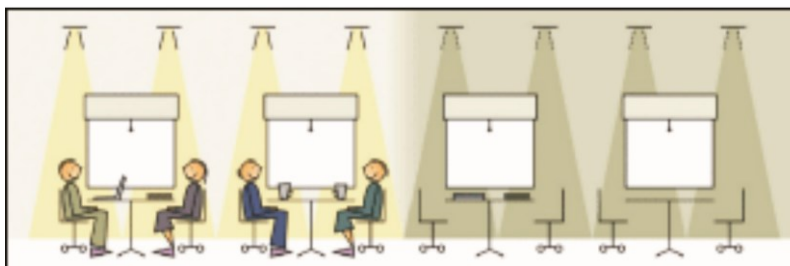
Obr. 8.5 Řízení osvětlení na konstantní hladinu intenzity osvětlení

Kombinované senzory

Jsou to například senzory, pomocí kterých se reguluje úroveň osvětlení podle denního světla a zároveň podle přítomnosti osob. Například pokud je ve svítidlech umístěn senzor obsahující pohybový a světelný senzor, při dostatečné denní osvětlenosti stmívá na minimální hodnoty osvětlenosti a v místech, kde se

nenacházejí žádní pracovníci, pak dojde po nastaveném čase k dalšímu snížení na předem nastavenou hodnotu. Vypnutí těchto svítidel by vytvořilo nepříjemnou atmosféru (černé díry), proto se svítidla jen stmívají. Zaměstnanci pracují v příjemném světelném prostředí a provozovatelé mohou ušetřit náklady na spotřebu elektrické energie.

Součástí těchto kombinovaných senzorů mohou být také IR přijímače pro dálkové ovládání osvětlovací soustavy, které ovšem slouží pouze ke zvýšení komfortu ovládání.



Obr. 8.6 Příklad použití kombinovaného senzoru

8.3. Inteligentní osvětlovací soustavy

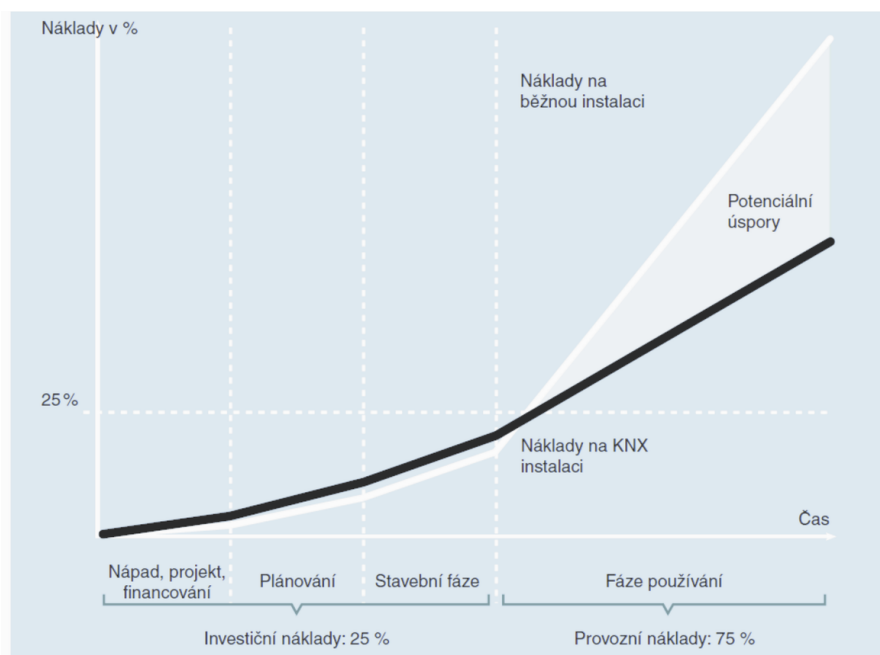
□ Inteligentní systém pro vnitřní řízení KNX

KNX je jediný celosvětový otevřený standard pro automatizaci domácností a systém technologie budov v souladu s EN 50090. Jde o inteligentní systém, který díky čidlům a senzorům přináší vyšší komfort a úsporu energií především u velkých komerčních budov. S výhodou lze tento systém použít u objektů, jako jsou administrativní budovy, obchody, banky, hotely, zařízení pro volný čas, sportovní areály, školy, nemocnice, průmyslové budovy a všude tam, kde je kladen důraz na komfort.

U běžných elektrických instalací je nutné předem určit, jak a kde budou spínací systémy budovy instalovány, dříve než výstavba vůbec začne, ale u KNX lze tyto volby ponechat otevřené. Je tomu tak proto, že vše v systému lze kdykoli změnit nebo rozšířit bez obvyklého nepořádku a pokládání nových kabelů. Navíc jsou všechna zařízení a instalace technologie budovy propojeny pomocí jediného sběrníkového vedení. Sběrníkové vedení je položeno paralelně k napájecímu vedení 230 V. Pokud bude aktivováno čidlo (např. tlačítko), akční člen (např. ovládání svinovací žaluzie) provede všechny potřebné přepínací povely.

Důkladné naplánování elektrické instalace je velice důležité. Sběrníkové vedení by mělo být položeno dříve, než je postaven první podhled. A všude tam, kde se plánuje umístění spínačů světla, výstupů svítidel, zásuvek atd., by měl být položen souběžně se silovým kabelem i kabel pro inteligentní řízení. Náklady jsou minimální, přínos obrovský. Díky tomu existuje v průběhu celé životnosti budovy volnost v propojování požadovaných funkcí technologie budovy.

I když se při plánování stavby může zdát cena KNX řešení dražší než běžné řešení, náklady výrazně klesnou poté, co je objekt předán do užívání. Důvodem je, že počáteční investiční náklady pokrývají průměrně pouze cca 25% veškerých nákladů budovy. Provozní náklady představují cca 75%. A právě zde lze dosáhnout velkých úspor. Potřeby, co se týče řízení provozu budovy, se postupem času mění. Může k tomu dojít díky tomu, že soukromý dům bude obydlený několika generacemi, nebo že místnosti v komerční nemovitosti jsou poskytnuty jiným uživatelům, novým nájemníkům nebo novým majitelům.



Obr. 8.7 Přehled nákladů

Flexibilita

Uvážíme-li, že většina budov je navržena pro užívání po několik desetiletí, je nevyhnutelné, že dříve nebo později se využití jejich místností změní. Řešení je zřejmé: mít možnost snadno měnit funkce budovy podle momentálních potřeb uživatelů, bez bourání zdí a pokládání nových kabelů, při vynaložení nízkých nákladů.

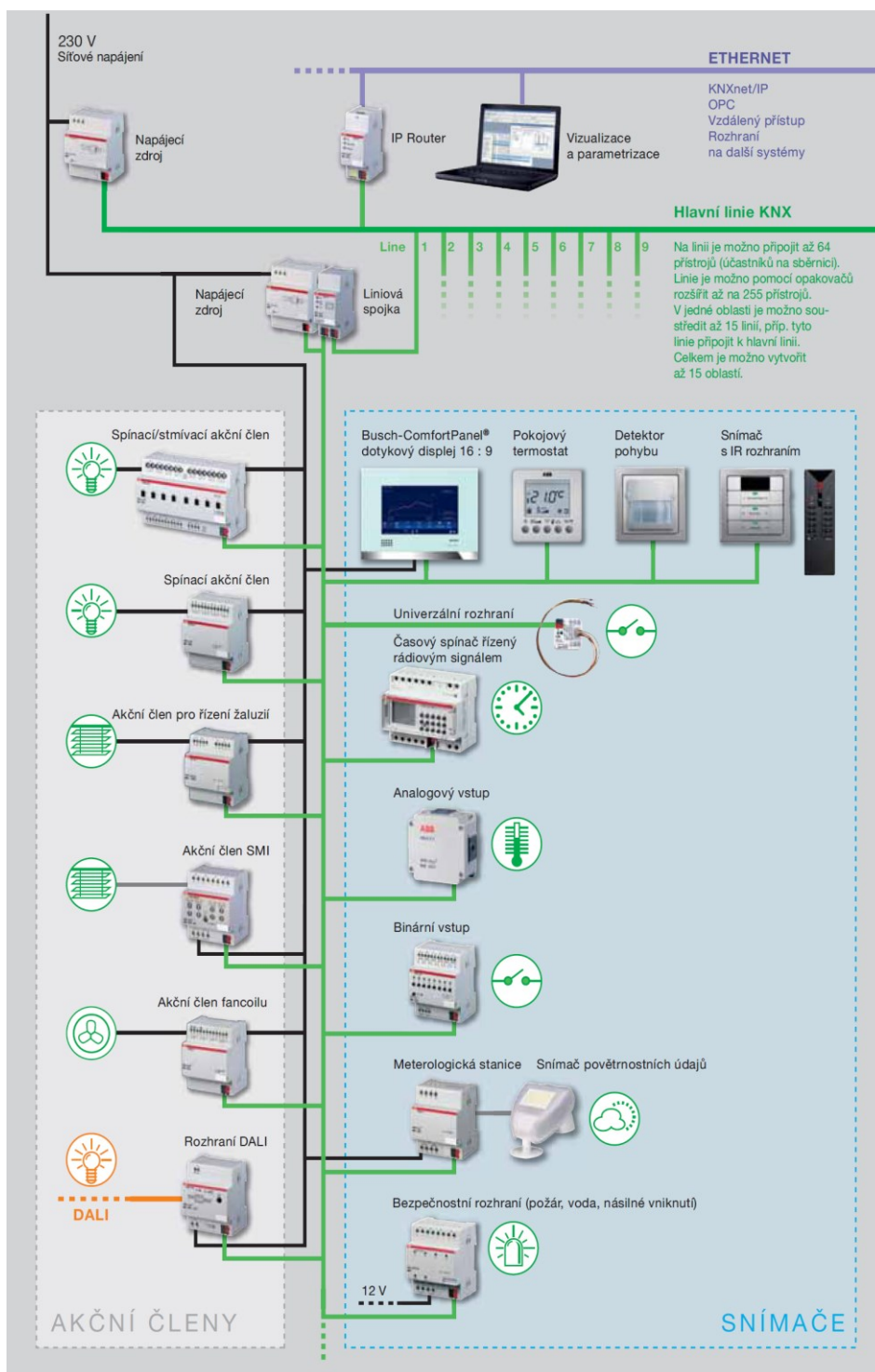
Bezpečnost a zabezpečení

Technologie budovy musí rychle a inteligentně reagovat ve všech kritických situacích, i bez přítomnosti obsluhy. Běžné elektrické instalace mají však omezené možnosti a brzy dosáhnou svých limitů.

Efektivita nákladů

Při zvažování efektivity nákladů není rozhodující pouze prvotní stavební investice, ale také následující provozní náklady. Platí, že technologie budovy šetří finanční

prostředky více tím, že je flexibilní a může být pružně a levně přizpůsobena novým požadavkům. Když vezmeme v úvahu neustále se zvyšující tlak na ochranu životního prostředí a stoupající ceny energií, je jasné, že je nutno do projektu rovněž začlenit inteligentní řešení pro efektivní využívání energie.



Obr. 8.8 Schéma inteligentního systému



Shrnutí pojmů

- Regulace osvětlovací soustavy.
- Analogové řízení.
- Digitální řízení (DALI).



Otázky

1. Jaké jsou kritéria pro řízení umělého osvětlení?
2. Rozsah regulace pro různé typy světelných zdrojů.
3. Inteligentní osvětlovací soustavy popis funkce.



Další zdroje

- [1] Světelná technika, Sokanský K., Novák T. a kol.
- [2] Světlo a osvětlování, Habel J., Dvořáček K. a kol.
- [3] www.csorsostrava.cz.
- [4] www.odbornecasopisy.cz (časopis Světlo).
- [5] Světelná technika a osvětlování, Habel, J. a kol.
- [6] INDALUX ILUMINACION TECNICA, s.l. Lighting engineering 2002: Control and lighting application. Valladolid, 2002.
URL: <<http://www.indal.es/en/doctecnicaeng/lighting-engineering>>

9 BEZPEČNOST TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat problematiku bezpečnosti konstrukčních řešení technických zařízení
- orientovat se v legislativě bezpečnosti konstrukčních řešení technických zařízení
- specifikovat vyhrazená technická zařízení
- se orientovat v normách souvisejících s bezpečností konstrukčních řešení technických zařízení



VÝKLAD

9.1. Bezpečnost konstrukčních řešení

□ Úvod

Konstrukce technického zařízení či stroje je komplexní záležitostí. Optimální návrh stroje včetně jeho bezpečnosti vyžaduje totiž spolupráci technických odborníků: technologa, který ví, co má být vyráběno, v jakém množství a kvalitě, strojaře, jenž provádí vlastní návrh mechanické konstrukce stroje, elektroprojektanta, který zajišťuje návrh elektropohonů a ovládání stroje a kvalifikované osoby, která s podobným strojem pracuje. Tito pracovníci mají, na základě vlastních zkušeností, ale i platných harmonizovaných evropských norem, za úkol společně posoudit každé jednotlivé riziko (nebezpečí), které se v souvislosti s uvažovaným technickým zařízením vyskytuje (konstrukce, funkce a způsob řízení, montáž a údržba, aj.), a společně hledat možnosti, jak tato rizika minimalizovat, aby se rizika eliminovala nebo snížila tak, aby byla akceptovatelná. Na zbylá, zbytková rizika pak musí upozornit v průvodní dokumentaci ke stroji, aby si uživatel mohl zpracovat své místní bezpečnostní pokyny pro obsluhu, údržbu apod.

Bezpečnost je jeden z hlavních požadavků kladených na dané strojní (technické) zařízení a měla by být nedílnou součástí návrhu konstrukce každého zařízení uváděného do technické praxe. Její úroveň závisí na správném posouzení možné míry rizika zařízení pro obsluhu i jeho okolí. Vhodnou konstrukcí, dodržáním bezpečnostních zásad při jeho návrhu, využitím bezpečnostních prvků (technická opatření), ale i vypracováním místních provozních předpisů (organizační opatření) dochází k zvýšení bezpečnosti, a tím i ke snížení mechanického, elektrického či jiného rizika na požadovanou úroveň. Je tedy vhodné, aby alespoň jeden ze

zúčastněných návrhu konstrukce zařízení byl odborně způsobilý v oblasti identifikace nebezpečí a posouzení rizik stroje.

S bezpečností a bezporuchovou činností technického zařízení úzce souvisí funkční spolehlivost bezpečnostních prvků jeho elektrické části, které jsou dnes nezbytnou součástí jeho řídicího a bezpečnostního systému. Hlavní úlohou bezpečnostního systému je pak omezit riziko na přijatelnou úroveň. Výrobce strojního zařízení tak musí při jeho návrhu uvážit pravděpodobnost vzniku poruchy všech prvků bezpečnostního systému a musí zajistit, že všechny poruchy včetně pravděpodobných chyb operátora, selhání hardwaru či softwaru a změna podmínek okolního prostředí, nepřinesou nepřijatelná rizika. Požadované funkční bezpečnosti zařízení potom odpovídají normami definované bezpečnostní kategorie a funkce zajišťované bezpečnostním systémem. Pro konstruktéra elektrických zařízení stroje je tedy v současnosti naprosto nepostradatelné se jednoznačně orientovat v problematice bezpečnosti strojního zařízení tj. v bezpečnostní technice.

Zajišťování bezpečnosti je nedílnou součástí péče o jakost, která je vyjádřena závaznými požadavky, včetně postupů prokazování jejich splnění. Ty jsou zahrnuty do zákonů a předpisů zavedených v právních systémech jednotlivých států.

▣ Základní legislativa pro bezpečnost konstrukčních řešení

Z hlediska posuzování bezpečnosti strojů existují dílčí rozdíly v legislativě pro nové a již provozované či rekonstruované stroje. Obecně se řídí směrnicemi Evropského parlamentu (ES) a jim odpovídajícími nařízeními vlády (NV) realizovanými příslušnými zákony. Pro posouzení shody vlastností technického zařízení se základními požadavky daného nařízení vlády jsou pro jednotlivé skupiny výrobků používány harmonizované technické normy. Hlubší znalost těchto právních předpisů by měla být vlastní každému projektantovi či konstruktérovi.

Definice strojního zařízení, základní technické požadavky na jeho bezpečnost a posuzování jeho shody se řídí Směrnicí 2006/42/ES resp. NV č. 176/2008 Sb. Podobně se řídí technické požadavky na elektrická zařízení nízkého napětí Směrnicí 2006/95/ES resp. NV č. 17/2003 Sb., požadavky na výrobky z hlediska jejich elektromagnetické kompatibility Směrnicí 2004/108/ES resp. NV č. 616/2006 Sb. a požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu Směrnicí 94/9/EHS resp. NV č. 23/2003 Sb.

Požadavky výše uvedených směrnic a nařízení vlády jsou uváděny do praxe zákonem č. 22/1997 Sb. Odkazy na jednotlivé normy, které musí nové výrobky plnit, jsou součástí nařízení vlády č. 17, 18 a 24/2003 Sb. Orgánem kontrolujícím splnění těchto zákonných požadavků je ministerstvo průmyslu a obchodu, jehož činným orgánem pro uvedenou oblast je Česká obchodní inspekce.

To, že zařízení splňuje technické požadavky stanovené ve všech nařízeních vlády, která se na něj vztahují a že byl při posouzení jeho shody se základními požadavky dodržen stanovený postup daný zákonem č. 22 (§ 13 odst. 3) ho opravňuje obdržet označení shody CE tj., že výrobek splňuje všechny příslušné základní požadavky na bezpečnost, ochranu zdraví, ochranu životního prostředí podle dané směrnice, že podléhá právním i technickým předpisům společným pro všechny státy EU a tedy není nijak omezen jeho volný pohyb v rámci EU. Toto se týká i rekonstrukce, renovace nebo modernizace provozovaného výrobního zařízení.

U výrobních zařízení, především strojů a strojních zařízení, která jsou uváděna na trh nebo do provozu jako nová, musí být bezpečnost integrována přímo do konstrukčního řešení zařízení tak, aby byly splněny všechny platné požadavky NV č. 170/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů, kterým byla do českého právního systému převzata Směrnice 98/37/ES, popřípadě další evropské směrnice a jim odpovídající NV a v návaznosti i všechny platné požadavky příslušných technických předpisů. Bezpečnost stroje je tak nutnou podmínkou uvedení výrobku na trh anebo do provozu.

Požadavky pro dosažení minimální provozní bezpečnosti starých strojů řeší směrnice 89/655/EEC resp. NV 378/2001 Sb. Rozsah a technická i ekonomická náročnost úprav, které musí být na provozovaných výrobních zařízeních provedeny, závisí na úrovni rizika, které je s daným zařízením spojeno. Odpovědnost za posouzení rizika a zajištění všech kroků a úprav potřebných pro dosažení minimální požadované úrovně bezpečnosti provozovaných zařízení nese výhradně provozovatel, stejně jako v oblasti zajišťování bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců při práci. Požadavky a úkoly, popsané především Zákoníkem práce, do něhož je mimo jiné začleněna první část Směrnice 89/655/EEC, kladou vysoké nároky nejen na etickou vyspělost zaměstnavatelů, ale i na odbornou způsobilost a zkušenosti osob, které provádějí posuzování rizika a navrhují vhodná bezpečnostní opatření k jejich odstranění nebo minimalizaci.

Poznamenejme, že z hlediska legislativy je na stroj po rekonstrukci, generální opravě či modernizaci nahlíženo jako na stroj nový.

Za bezpečnost nových strojů je tak zodpovědná firma nebo osoba, která stroj uvádí v EU na trh (většinou výrobce). U strojů již provozovaných je osobou zodpovědnou z hlediska bezpečnosti práce vždy zaměstnavatel (jeho vedoucí pracovníci). Odkazy na bezpečnost práce a pracovního prostředí lze nalézt v zákoníku práce (zákon 65/1965 Sb. a jeho novely) a nařízení vlády 378/2001Sb. Kontrolním orgánem pro tuto kategorii je ministerstvo práce a sociálních věcí a jeho činné orgány - oblastní inspektoráty práce (dříve inspektoráty bezpečnosti práce).

Poznamenejme, že technické parametry výrobku jsou záležitostí smlouvy mezi dodavatelem a odběratelem, zatímco bezpečnost strojního zařízení ve státech EU je vyžadována platnou legislativou.

Posuzování shody, zkoušení a certifikaci výrobků zajišťují zkušební laboratoře a certifikační organizace např. Strojírenský zkušební ústav, s. p., Elektrotechnický zkušební ústav, s.p., Institut pro testování a certifikaci, a.s. nebo v zahraničí např. TÜV, BG / BGIA.

□ **Vyhrazená technická zařízení**

Vyhrazenými technickými zařízeními jsou dle zákona č. 174/1968 Sb. zařízení se zvýšenou mírou ohrožení zdraví a bezpečnosti osob, majetku, která podléhají dozoru podle tohoto zákona. Jsou to technická zařízení tlaková, zdvihací, elektrická a plynová. Podle stupně nebezpečnosti se vyhrazená technická zařízení zařazují do tříd, popř. skupin, viz vyhláška č. 73/2010 Sb., a jsou pro ně stanoveny způsoby prověřování odborné způsobilosti organizací, podnikajících fyzických osob a fyzických osob k činnostem na těchto zařízeních, což od těchto subjektů vyžaduje splnit stanovenou kvalifikaci, neboť práce, obsluha, údržba, revize, projektování a

další činnosti na těchto zařízeních vystavují pracovníky v některých případech zvýšenému ohrožení života nebo zdraví.

Pokud jde o vyhrazená elektrická zařízení jde:

1. o elektrické zařízení v prostorech s nebezpečím výbuchu plynů a par, elektrické zařízení v prostorech s nebezpečím požáru nebo výbuchu prachů nebo výbušnin, elektrické zařízení v prostorech z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem zvláště nebezpečných a elektrické zařízení v plynujících dolech a uhelných dolech a také zařízení, kterým je v souvislosti s těmito prostory a doly zajištěna ochrana před bleskem a před nebezpečnými účinky statické elektřiny a

2. o elektrické zařízení silové v ostatních prostorech a s tímto zařízením související spínací a řídicí zařízení; za spínací a řídicí zařízení se považují i ovládací a bezpečnostní obvody.

Při činnostech na elektrickém zařízení, včetně spotřebičů a dalších elektrických prvků, které bývají rovněž součástí technických zařízení, je tedy třeba vycházet z předepsaných postupů a řešení nebo alespoň z ověřených poznatků, které zaručují bezpečnost provozu, a tím do jisté míry i spolehlivost. Cílem je zajištění potřebné úrovně bezpečnosti, odstranění nebo minimalizace rizik u vyhrazených i technických zařízení v míře a úrovni, jaké nařizuje platná legislativa v návaznosti na úroveň techniky.

Nedílnou součástí návrhu dnešních technických zařízení jsou bezpečnostní prvky a systémy, používané v podmínkách průmyslové výroby tam, kde existuje nebezpečí újmy na zdraví či životech lidí nebo poškození životního prostředí. Jejich úkolem je v případě nesprávné činnosti udržet technické zařízení či technologický provoz v bezpečném stavu.

Jednotný návod jak navrhovat zařízení související s bezpečností dnes poskytují příslušné normy. Ty umožňují exaktně postihnout míru rizika kvantitativními metodami a navrhnout odpovídající ochranný systém. Pokud jsou ochranné systémy navrženy v souladu s uznávanými normami, lze jasně prokázat jejich vhodnost.

□ **Bezpečnost stroje a strojních zařízení**

Základní pojmy, zásady pro konstrukci a všeobecná bezpečnostní hlediska použitelná na všechna strojní zařízení jsou obsažena v normě ČSN EN ISO 12100, která je obecnou normou typu A. Konkrétní požadavky na výrobek obsahují normy výrokové typu C, zabývající se detailními bezpečnostními požadavky pro jednotlivý stroj nebo technologickou skupinu strojů. Avšak ani normy typu C problematiku posuzování rizika souvisejícího se strojními zařízeními neřeší vyčerpávajícím způsobem, neboť se zabývají pouze nejzávažnějšími riziky a obsahují upozornění, že pro méně závažná rizika je nutné uplatnit postupy, stanovené obecnými normami typu A a typu B.

Poznamenejme, že posouzení rizika musí být provedeno ale i pro ty části stroje, které jsou mimo rámec normy (někdy je to z hlediska bezpečnosti podstatná část ovládacího systému), neboť řada zákazníků smluvně vyžaduje dodání dokumentace posouzení rizika.

K realizaci posouzení rizika a snížení rizika stroje, viz obr. 1.1, musí konstruktér brát v úvahu tyto činnosti v uvedeném pořadí:

- určit mezní hodnoty strojního zařízení, ty zahrnují předpokládané používání i předvídatelné nesprávné použití
- identifikovat nebezpečí a příslušné nebezpečné situace
- odhadnout riziko pro každé identifikované nebezpečí a každou nebezpečnou situaci
- zhodnotit riziko a rozhodnout o nutnosti snížení rizika
- vyloučit nebezpečí nebo snížit riziko spojené s nebezpečím ochrannými opatřeními.

První dva body zahrnují analýzu rizika, zbylé tři body hodnocení rizika. Všechny body dohromady jsou nástrojem posouzení rizika.

K identifikaci významných nebezpečí, která může stroj či technologický celek vytvářet, je vhodný následující soupis základních nebezpečí. Jde o rizika mechanická (pásky, převody, rotující části, zvedání, klesání, pružinové systémy), elektrická (oblouk, porucha zemnění, nadproud, elektrostatická energie), tepelná (horké povrchy, tavenina), procesní (vibrace, hluk, elektromagnetické záření, surové materiály a látky, tlak) a rizika plynoucí ze zanedbání ergonomických zásad, uklouznutí, zakopnutí, pád, kombinace nebezpečí a nebezpečí spojená s prostředím, ve kterém je předpokládáno, že bude stroj používán. Příklady nebezpečí, nebezpečných situací a událostí jsou uvedeny v příloze B normy ČSN EN ISO 12100.

Touto normou je doporučeno posuzovat riziko ve fázi konstrukce strojního zařízení ve třech krocích:

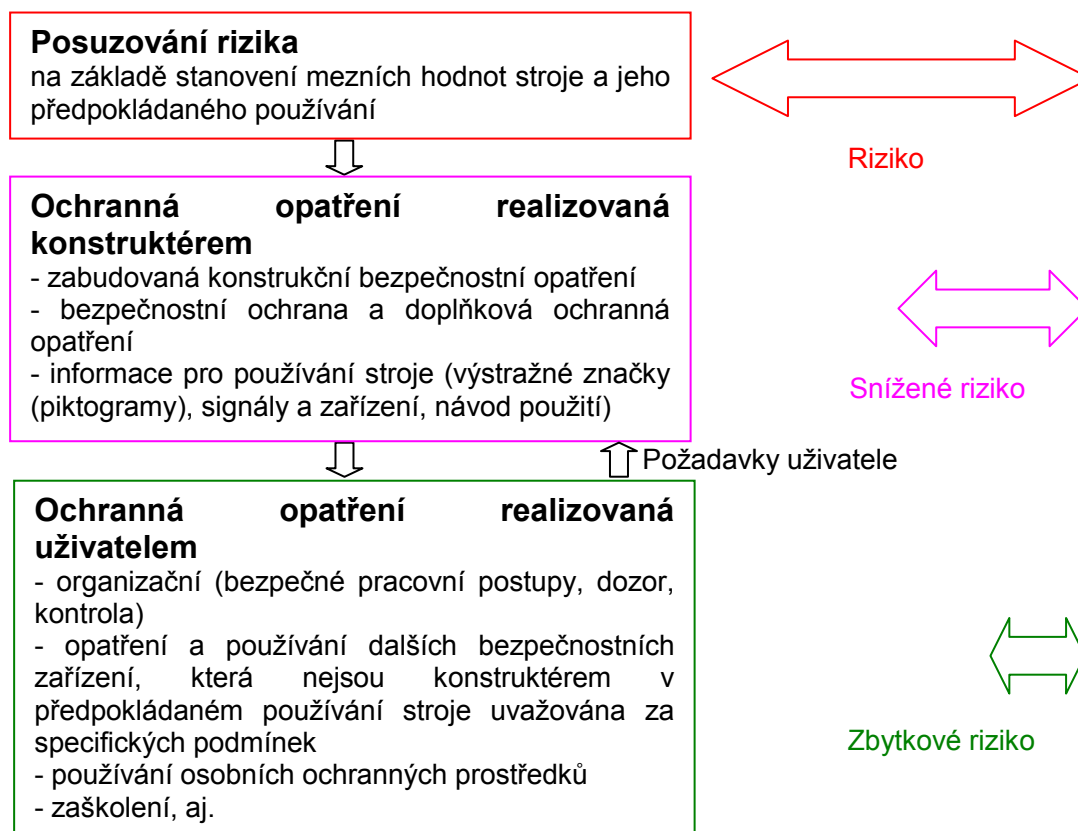
1. vyloučení nebezpečí nebo snížení rizika konstrukcí, použitím méně nebezpečných materiálů nebo využitím ergonomických zásad
2. snížení rizika použitím bezpečnostní ochrany a doplňkových ochranných opatření, kdy ochranné opatření je opatření určené ke snížení rizika a bezpečnostní ochrana je ochranné opatření používající zařízení k ochraně osob, která nemohou být dostatečně snížena opatřeními zabudovanými v konstrukci
3. jestliže není použitím předchozích dvou kroků riziko dostatečně sníženo, musí informace pro používání (průvodní dokumentace) obsahovat upozornění na jakékoliv zbytkové riziko.

Ke splnění cíle největšího snížení rizika je nutné ještě vzít v úvahu následující čtyři faktory v uvedeném pořadí:

- bezpečnost stroje během všech fází jeho životnosti
- schopnost stroje vykonávat funkci
- použitelnost stroje
- výrobní a provozní náklady stroje a náklady na jeho vyřazení.

Riziko lze zcela vyloučit tedy jen prvním krokem. Další dva kroky je pouze omezují a nemohou je zcela odstranit. Je potřeba mít ale na paměti i to, co může být považováno za odpovídající technickým možnostem v současnosti, nemusí být považováno za odpovídající technickým možnostem v budoucnosti. Uvedená doporučení a postupy jsou zcela obecné. Pro konkrétní nebezpečí a nebezpečné

situace jsou třeba konkrétní hodnoty parametrů, aby je bylo možné posoudit a kvantifikovat (měřit) míru omezení rizika.



Obr. 1.1. Proces snižování rizika z strojního zařízení

Posouzení rizika či analýza rizik je tedy proces spojený s návrhem strojního zařízení za účelem maximálního snížení možného rizika. Riziko je výsledkem nebezpečí a kombinuje pravděpodobnost výskytu úrazu nebo škody a míru této závažnosti s cílem optimálně zvýšit bezpečnost ve všech fázích jeho života. Vyvinout nový stroj a až poté na něm provádět analýzu rizik např. externím posuzovatelem, je tedy věcně nesprávné, neboť neumožňuje optimalizovat bezpečnost. Navíc je tento způsob spojen s více náklady, kterým je možno se vyhnout tím, že včasné provedenou analýzou rizik se můžeme zbavit potenciálně hrozícím bezpečnostním nedostatkům na stroji již vyrobeném. Napomáhají tomu i technické a právní předpisy, vypracované na základě dlouholetých zkušeností konstruktérů a výrobců, umožňující analýzu rizik pojmenovat a vytvořit návod na její vypracování. Odráží se v nich pokroky techniky, nové technologie a zvyšující se nároky na bezpečnost, tudíž nejsou neměnné. To vyžaduje mít neustále přehled o předpisech vztahujících se k bezpečnosti strojních zařízení, což je organizačně, časově a finančně náročné, zejména pro malovýrobce. Bez ohledu na uvedené, faktem zůstává, že potenciální riziko nelze nikdy eliminovat, lze je pouze účinně řídit, tj. identifikovat a znát zdroje nebezpečí, umět ohodnotit velikost rizika a přijmout opatření na jeho snížení na akceptovatelnou míru.

Poznamenejme, že posouzení rizika se provádí pro všechny fáze životního cyklu stroje, od výroby přes montáž, provoz, údržbu až po likvidaci a že normy stanovují jen obecné zásady posouzení rizik, ale nemohou stanovit, co je vhodné pro každý jednotlivý případ s ohledem na specifika prostředí a subjektivní názor posuzovatele.

□ Bezpečnost elektrického zařízení stroje

Bezpečnost strojů a zařízení je soubor vlastností pomáhajících zabránit vzniku nehody (úrazu, škody). Nedílně k ní patří i aktivní systém bezpečnosti stroje, postavený na bezpečnostních částech řídicích systémů (SRP/CS), které spolu s bezpečnostními a kontrolními prvky brání nebezpečným manipulacím a ohrožení obsluhy, identifikují (hlídají) jednak nebezpečné stavy (hledisko bezpečnosti) a jednak nežádoucí či nestandardní stavy (hledisko spolehlivosti) a uvádějí stroj do bezpečného stavu, čímž ho současně i chrání. Ovládací systém stroje, realizovaný obvykle programovatelnými elektronickými systémy (PES), přesněji jeho části SRP/CS, zajišťují požadované bezpečnostní funkce stroje a předvídatelné chování stroje i za nestandardních podmínek (situací). Bezpečnostní funkce tedy mají za úkol zajistit nezměněné chování celého řízeného systému a jeho spolehlivost. Role lidského operátora (obsluhy) je tím eliminována a člověk spíše vystupuje jen v roli supervizora. Důvodem je pomalá lidská reakční doba na nebezpečnou událost, stres, únava, neschopnost efektivně řešit více závažných problémů vyskytujících se najednou či prostě lidské selhání, což dokazují i analýzy nehod a úrazů v průmyslu. Mezi častými příčinami úrazů tak např. můžeme najít jednoduchou monotónní práci při zakládání a vyjímání čokoliv do a ze stroje, která vede ke ztrátě pozornosti a tím vysoké pravděpodobnosti rizika úrazu. Automatický provoz tedy obecně významně snižuje rizika i nároky na obsluhu během nebezpečné události. Aplikace automatizovaných bezpečnostních funkcí má však smysl pouze tam, kde je celková doba na zjištění problému, správného rozhodnutí a nápravné akce operátora delší než doba od vychýlení procesu z parametrů do vzniku havarijní události. Lidská obsluha, díky pokročilé automatizaci zbavená těžké, neergonomické, monotónní práce, tak zůstává primárně omezena jen na ty činnosti, kde je nutné při práci myslet, používat fantazii, zkušenosti, to co stroje zatím neumí.

Systémy řízení jsou obvykle složité, takže je prakticky nemožné, aby bylo plně určeno každé selhání režimu nebo se vyzkoušely všechny možné varianty jeho chování. Protože je obtížné předpovědět jejich bezpečnost, provádí se jejich důkladné testování. Cílem je navrhnout systém, který by zabránil nebezpečným chybám nebo kontroloval jejich výskyt. Nebezpečné chyby mohou vzniknout například nesprávnou specifikací systému, hardware či software, opomenutím ve specifikaci požadavků na bezpečnost, náhodnými nebo systematickými mechanismy selhání hardware, chybami software, chybou lidského faktoru, vlivy prostředí (např. elektromagnetické pole, teplota, mechanické jevy) nebo poruchou v systému napájení. Je tudíž zřejmé, že bezpečnostní řídicí systémy budou vždy dělat to, co jsme jim dal projektant do „víčku“. Pokud tedy řídicí systém udělá nesprávné rozhodnutí, je to následek selhání lidského faktoru při jeho návrhu.

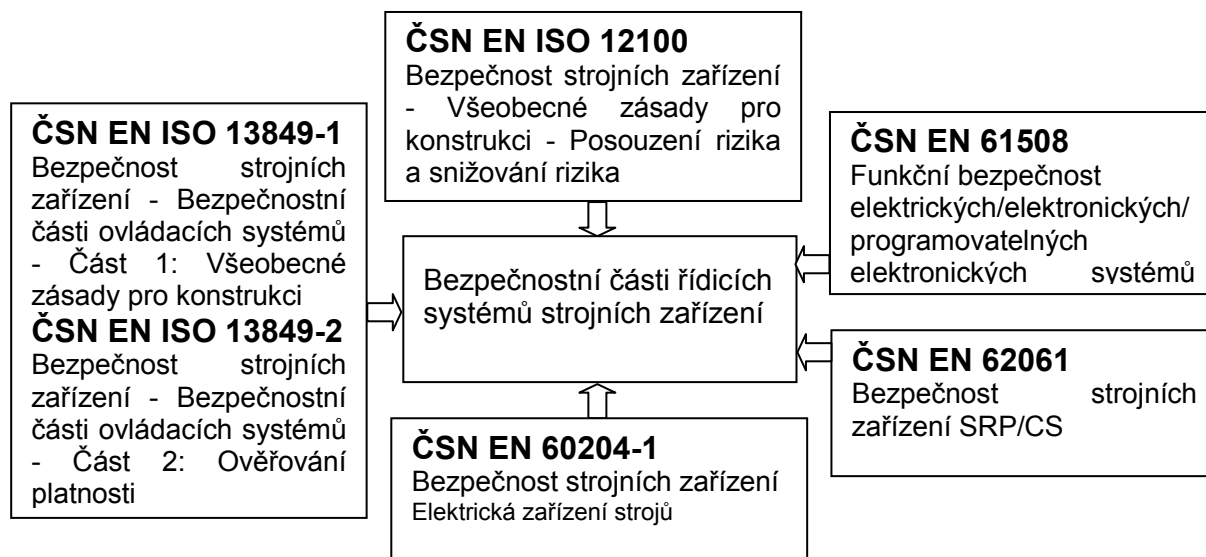
Návrhář pracující v této oblasti by tedy měl zvládat nejen základní požadavky na elektrickou bezpečnost a provedení elektrických zařízení a instalací, ale i znát zásady funkční bezpečnosti neboť ta, spočívá výhradně na výrobcích, přesněji jeho konstruktérech. Volba vhodných bezpečnostních opatření přitom závisí především na úrovni rizika způsobovaného příslušným zařízením. Logickým krokem při vývoji nového stroje či strojního zařízení je tedy dokumentované posouzení nebo alespoň odhad rizika, což ale vyžaduje značné praktické zkušenosti. Bezpečnost elektrického zařízení tak ovlivňuje významným způsobem výslednou bezpečnost stroje jako celku a ve výsledku i produktivitu práce, neboť rychle umožňuje obnovit jeho funkci.

Funkční bezpečnost spočívá v korektní funkci zařízení a spolehlivé funkci bezpečnostních částí řídicího systému, který v případě poruchy, jak již bylo zmíněno, musí uvést strojní zařízení do bezpečného stavu. Protože se většinou jedná o řídicí systémy elektrické, jsou zmíněné požadavky realizovány tzv. bezpečnostními obvody. Pojmem „bezpečnostní obvod“ se označují elektrické obvody řídicího systému určené k zajišťování bezpečnostních funkcí. Hlavním důvodem používání těchto obvodů je zvýšení úrovně ochrany proti možnému ohrožení osob, zařízení, výrobního procesu a životního prostředí. Bezpečnostní funkce řídicího systému jsou iniciovány vstupním signálem řídicího přístroje a vykonávány bezpečnostními částmi řídicího systému za účelem dosažení bezpečného stavu strojního zařízení nebo jeho části. K typickým bezpečnostním funkcím, které jsou zpravidla zajišťovány prostřednictvím tzv. bezpečnostních modulů, patří např. nouzové vypnutí, nouzové zastavení, dvouruční ovládání zařízení, kontrola doběhu pohonu hydraulických lisů, popř. blokování pohonů nebezpečných pohybů v závislosti na poloze ochranných krytů nebo na signálech optoelektronických ochranných zařízení. Problematika funkční bezpečnosti je podrobně řešena v normách ČSN EN řady 61508 spolu úrovní integrity bezpečnosti (SIL), jakožto měrné jednotky kvantifikující omezení rizika. Pro úplnost jen poznamenejme, že do funkční bezpečnosti nezahrnujeme pasivní bezpečnostní prvky či systémy např. kryty, izolace, aj., neboť ta se týká výhradně ochrany před nebezpečími, která mohou být vyvolána nekorektní funkcí bezpečnostních obvodů automatizovaných systémů řízení strojních zařízení.

Obecným návrhem a posouzením bezpečnostních částí ovládacích systémů se zabývá velký soubor technických norem. Nejvýznamnější z nich je ČSN EN ISO 13849-1 Bezpečnost strojních zařízení. Bezpečnostní části ovládacích systémů. Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci a ČSN EN 62061 Bezpečnost strojních zařízení. Funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických řídicích systémů související s bezpečností. Norma ČSN EN ISO 13849-1 obsahuje bezpečnostní požadavky a pokyny pro zásady konstrukce a integrace bezpečnostních částí ovládacích systémů, včetně návrhu softwaru. Pro bezpečnostní části SRP/CS specifikuje vlastnosti, které zahrnují úroveň vlastností (PL) požadovanou k vykonávání bezpečnostních funkcí a platí pro bezpečnostní části ovládacích systémů (SRP/CS) bez ohledu na druh používané technologie a energie (elektrické, hydraulické, pneumatické, mechanické, atd.) pro všechny druhy strojních zařízení. Nespecifikuje však bezpečnostní funkce nebo úroveň vlastností, které mají být použity v jednotlivém případě. Je návodem pro konstruktéry a posuzovatele ovládacích systémů, jak správně provést posouzení úrovně PL pro zvolený SRP/CS, který provádí požadovanou bezpečnostní funkci.

Norma ČSN EN 62061 specifikuje funkce řídicích systémů vztahující se k funkční bezpečnosti strojního zařízení. Stanovuje postupy a požadavky pro dosažení požadované funkce. Spolu s předchozí normou patří do oblasti norem strojního zařízení v rámci IEC 61508. Je určena pro usnadnění specifikace funkce řídicích systémů vztahujících se k bezpečnosti s ohledem na významná nebezpečí spojená se strojem dle normy ISO 12100-1. Poskytuje metodiku a požadavky pro stanovení požadované úrovně integrity bezpečnosti (SIL) pro každou řídicí funkci související s bezpečností, která má být v rámci elektrického řídicího systému souvisejícího s bezpečností (SRECS) realizována. Je určena pro použití v rámci soustavného snižování rizika popsáno v ISO 12100-1. Navržená metodika pro přiřazení SIL je součástí v informativní přílohy této normy A. Jsou uvedena opatření pro koordinaci

funkce SRECS s požadovaným snížením rizika, při respektování pravděpodobnosti a důsledků nahodilých a systémových vad v elektrickém řídicím systému. Je určena pro konstruktéry strojního zařízení, výrobce řídicích systémů a montážní pracoviště a ostatní pracovníky, kteří se podílejí na specifikaci, návrhu a potvrzení platnosti (validace) SRECS.



Obr. 1.2. Normy související s bezpečností částí řídicích systémů strojních zařízení

Rozsah použití norem ČSN EN ISO 13849-1 a ČSN EN 62061 ilustruje následující tabulka.

Tab. 1.1 Srovnání použití norem k posouzení bezpečnostních částí ovládacích systémů

	Technická zařízení pro řídicí funkce související s bezpečností	ČSN EN ISO 13849-1	ČSN EN 62061
A	neelektrická zařízení (např. hydraulická)	zahrnuje	nezahrnuje
B	Elektromechanická zařízení, např. relé nebo jednoduchá elektronická zařízení	Omezeno na stanovené architektury, platí až do PL = e	Všechny architektury; platí až do SIL 3
C	Složitá elektronická zařízení, např. programovatelná	Omezeno na stanovené architektury, platí až do PL = d	zahrnuje
D	A v kombinaci s B	Omezeno na stanovené architektury, platí až do PL = e	Všechny architektury; platí až do SIL 3
E	C v kombinaci s B	Omezeno na stanovené architektury, platí až do PL = d	Všechny architektury; platí až do SIL 3
F	C v kombinaci s A nebo C v kombinaci s A a B	zahrnuje	zahrnuje

Konstrukční opatření ovládacího (řídícího) systému dle norem viz obr. 1.2 musí být volena tak, aby jejich bezpečnostní vlastnosti poskytovaly dostatečný stupeň snížení rizika. Správná konstrukce ovládacích systémů stroje, jak již bylo zmíněno, může totiž vyloučit nepředvídatelné a potenciálně nebezpečné chování stroje (neúmyslné spuštění, neovládaná změna rychlosti, porucha ochranných zařízení, aj.). Je přirozené, že ovládací systémy musí být navrženy tak, aby obsluze umožnily bezpečnou a snadnou, nejlépe intuitivní, interakci se strojem, která vyžaduje systematickou analýzu podmínek spuštění a zastavení stroje. Dále, musí být tyto systémy schopny omezit pohyby částí strojního zařízení, obrobků, břemen, apod. na rozsah navržených bezpečných parametrů včetně dynamických účinků (např. rozsah rychlosti, zrychlení, zpomalení, nosnost). Po konstrukční stránce musí být bezpečnostní řídicí systém takový, aby pravděpodobnost nahodilých poruch hardware a systematických poruch, které mohou nepříznivě ovlivnit vlastnost bezpečnostních ovládacích funkcí, byla dostatečně malá. Architektura bezpečnostních obvodů pak musí odpovídat normám ČSN EN ISO 13849-1 (PL) a ČSN EN 61508 (SIL).

Závěrem kapitoly si zopakujeme životní cyklus bezpečného návrhu stroje:

1. Diskuze konstrukce, obhlídka podobného stroje
2. Analýza rizikovosti: výstupem jsou nebezpečná místa, PL_r/SIL uvedená v průvodní dokumentaci
3. Realizace konstrukce
4. Verifikace (kontrola) bezpečnosti provozu, validace konstrukce přezkoušením funkčnosti stroje a testování jeho parametrů
5. Technická dokumentace (vydání prohlášení o shodě, splnění bezpečnostních norem, návod pro obsluhu a seřizování, návod pro údržbu a nastavení, použité metody programování, upozornění na případné nedostatky v návodu či piktogramy, aj.)



Otázky

1. Kdo se podílí na návrhu konstrukce strojního zařízení?
2. Co patří k hlavním požadavkům kladeným na technické zařízení?
3. Jak se liší požadavky kladené na nové a již provozované technické zařízení?
4. Co jsou to vyhrazená technická zařízení?
5. Co vše musí brát v úvahu konstruktér pro posouzení rizika stroje?
6. Lze snížit absolutně bezpečnostní rizika stroje?
7. V kolika krocích posuzujeme rizikovost konstrukce stroje?
8. Které normy řeší bezpečnost elektrických částí strojních zařízení?
9. Na čem je založen systém aktivní bezpečnosti stroje?
10. Jaká je úloha lidské obsluhy v systému bezpečnosti stroje?

11. Co je to funkční bezpečnost?

12. Co tvoří životní cyklus bezpečného návrhu stroje?



Použitá literatura a další zdroje

ČSN EN ISO 12100, Bezpečnost strojních zařízení - Všeobecné zásady pro konstrukci - Posouzení rizika a snižování rizika

ČSN EN ISO 13849-1, Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci

ČSN EN ISO 13849-2, Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 2: Ověřování platnosti

ČSN EN 60204-1, Bezpečnost strojních zařízení, Elektrická zařízení strojů - Část 1: Všeobecné požadavky

ČSN EN 61508 - 1 ed. 2, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností - Část 1: Všeobecné požadavky

ČSN EN 62061, Bezpečnost strojních zařízení - Funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických řídicích systémů souvisejících s bezpečností

Urban, Z.: Současná legislativa a nové normy nejen pro znalce (1. část), Elektro

Urban, Z.: Současná legislativa a nové normy nejen pro znalce (2. část), Automa

Vaculková, E.: Bezpečnost a lidský faktor v automatizovaných systémech, Automa č. 2, 2011

Kotulan, A. : Základní bezpečnostní předpisy pro elektrická zařízení strojů a jak jim vyhovět. Elektro č. 6, 2012

Dudek, J.: Elektrotechnika pro FBI, učební text VŠB TU Ostrava, 2012

10 SPOLEHLIVOST SYSTÉMU.



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat spolehlivost systému
- popsat postup analýzy spolehlivosti systému
- definovat spolehlivostní ukazatele
- rozlišit poruchy systému
- definovat spolehlivostní model systému



VÝKLAD

10.1. Spolehlivost

□ Úvod

Požadavky na spolehlivost a bezpečnost se v současnosti stávají neoddělitelnou součástí technických požadavků kladených na strojní zařízení a je jen obtížně představitelné, že by proces vývoje a návrhu nějakého moderního stroje mohl být úspěšný bez toho, aniž by vycházel z jasně definovaných požadavků na spolehlivost a bezpečnost. Tyto požadavky obvykle formuluje budoucí uživatel strojního zařízení (vývoj na zakázku) nebo případně sám výrobce. V případě složitých technických systémů, jejichž poruchy mohou vést k ohrožení zdraví a životů lidí, velkým materiálním škodám či poškození životního prostředí, jdou požadavky na spolehlivost „ruku v ruce“ s požadavky na bezpečnost a jsou tedy, jak již bylo zmíněno, stanoveny závaznými předpisy (zákony, vyhlášky, směrnice, standardy ...).

Spolehlivost je tedy důležitým znakem jakosti strojního zařízení, protože podstatným způsobem ovlivňuje jeho schopnost uspokojovat očekávané požadavky zákazníků. Společně s požadavky na funkční vlastnosti má výrazný vliv na náklady spojené s provozem, údržbou a opravami. Je chápána jako stálost užitných vlastností, a to zejména vlastností funkčních, ergonomických, vlivů na životní prostředí apod., po stanovenou dobu a za daných podmínek užívání. Spolehlivost, jako komplexní vlastnost, je charakterizována dílčími vlastnostmi, jako je bezpečnost, bezporuchovost (nepřetržité plnění předepsané funkce), životnost (plnění požadované funkce do dosažení mezního stavu při předepsané údržbě a opravách), udržitelnost (předcházení poruch údržbou, opravou, diagnostikou), resp. jejich kombinacemi. Poslední dvě vlastnosti, bezporuchovost a udržitelnost, úzce souvisí s pohotovostí tj. schopností zařízení vyhovovat technickým podmínkám po danou dobu (udává pravděpodobnost, že se zařízení bude nacházet v libovolně zvoleném okamžiku v provozuschopném stavu). Problematika spolehlivosti strojního

zařízení zahrnuje zejména studium, analýzu a hodnocení jeho vlastností ve vztahu ke spolehlivosti v závislosti na „spolehlivostních“ vlastnostech jeho prvků.

Pro zajištění spolehlivosti stroje je důležitá předvýrobní etapa jeho životního cyklu (specifikace požadavků, volba koncepce, návrh a vývoj, výroba, instalace, provoz a údržba, likvidace), ve které se podle zkušeností rozhodujícím způsobem „zakládá“ na jeho bezporuchovosti a bezpečnosti, ale i životnosti a udržovatelnosti. Jedním z výchozích cílů předvýrobní etapy by mělo být navrhovat či projektovat stroj s předem specifikovanou úrovní spolehlivosti; proto je nutné tyto znaky definovat obdobně jako funkční (technické) parametry (výkonnost, rozměry, hmotnost aj.). Skutečně dosahovaná bezpečnost, životnost, bezporuchovost, udržovatelnost, zajištěnost údržby a pohotovost závisí na podmínkách, za kterých se objekt nebo systém používá, proto při specifikaci znaků spolehlivosti je nutné vždy současně definovat podmínky skladování, přepravy, instalace a užití, které se budou uplatňovat. Kromě podmínek, za nichž bude objekt nebo systém provozován, je důležité brát v úvahu zásady a pravidla údržby a organizaci zajištění údržby. Požadavky na spolehlivost se mají, je-li to možné, vyjadřovat kvantitativně metodami analýzy spolehlivosti resp. analýzou rizik z hlediska bezpečnosti, které umožňují navrhovat stroje s předem stanovenou požadovanou spolehlivostí.

Pro výslednou spolehlivost již provozovaného systému je podstatné, zda během jeho provozu provádíme obnovu bezporuchového stavu, nebo ne. Podle toho rozlišujeme systémy obnovované a neobnovované. Obnova je přitom chápána jako vlastní přechod z poruchového do bezporuchového stavu, zatímco činnost, která k tomu vedla, se označuje jako oprava. Systém pak může být neobnovovaný z důvodu neopravitelnosti či nerentability.

□ **Analýza spolehlivosti**

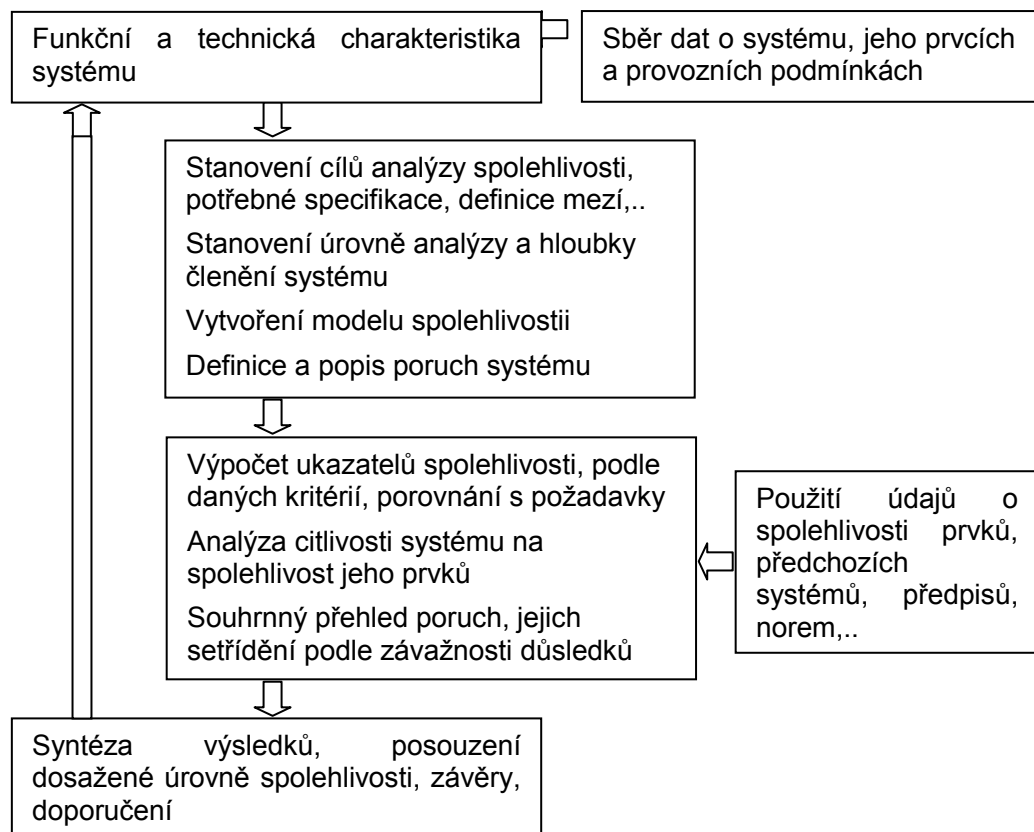
Analýzu spolehlivosti a bezpečnosti můžeme rozdělit do čtyř kroků (etap) v daném pořadí:

- funkční a technická analýza
- kvalitativní analýza
- kvantitativní analýza
- syntéza výsledků analýzy.

Návaznost těchto etap a přehled základních úkolů, které jsou v rámci každé etapy realizovány znázorňuje obr. 2.1.

Funkční a technická analýza je zaměřena na shromažďování dat o systému a jeho účelu, cílových vlastnostech, funkčních a technických charakteristikách. Jde o data a informace nezbytné pro definování systému a jeho vlastností a stanovení rozsahu, zaměření a hloubky analýzy. Především je nutné shromáždit co nejpodrobnější informace o prvcích, ze kterých je systém vytvořen. Pojem prvek systému je přitom chápán jako taková část systému, pro kterou může být provedena analýza a pro kterou mohou být specifikovány projevy poruch. Výběr prvků systému by měl především vycházet ze skutečně existujících a dostupných informací o jejich spolehlivosti. Dostupnost údajů je potom kritériem hloubky a rozsahu dělení systému. Je-li však dělení systému provedeno příliš detailně, jsou zvolené metody analýzy zbytečně složité, což neúměrně prodlužuje i dobu analýzy. Vyústěním této etapy

analýzy je zpracování studie, obsahující koncepci spolehlivosti, stanovení požadavků na spolehlivost se zvláštním důrazem na požadavky bezporuchovosti, životnosti, udržitelnosti, pohotovosti, bezpečnosti případně dalších ukazatelů, která zahrnuje identifikaci hlavních prvků a funkcí systému, definování vnějších omezení funkčních vlastností, provozních podmínek a primárního hodnocení funkční nebezpečnosti systému s cílem určit a klasifikovat nebezpečné poruchové stavy systému, které mohou vést k ohrožení zdraví a životů lidí, vzniku velkých materiálních škod nebo poškození životního prostředí (obecně poruchy se závažnými důsledky). Vychází se přitom z analýzy funkcí systému a posouzení důsledků selhání těchto funkcí. Výsledky této analýzy vždy mají předběžný charakter a je třeba je doplňovat a verifikovat na základě výsledků dalších kroků analýzy.



Obr. 2.1. Postup analýzy spolehlivosti systému

Na hodnocení funkční nebezpečnosti navazuje kvalitativní analýza spolehlivosti prvků soustavy, v rámci které se posuzuje, zda jednotlivé prvky soustavy splňují příslušné požadavky. Jejím cílem je, najít všechny možné poruchy, jejich příčiny a vzájemné souvislosti, popsat důsledky, které mohou mít a specifikovat jejich vliv na funkci systému a vytvořit odpovídající model spolehlivosti systému. Model musí vycházet ze strukturního členění systému a z řady předpokladů přijatých pro řešení, např. k jaké konfiguraci systému nebo jeho provozní fázi se model vztahuje, které poruchy jsou považovány za závažné, případně které faktory významně ovlivňují vznik těchto poruch včetně zohlednění vlivu fyzikálních jevů a procesů, které mohou vyústit v určité fázi provozu až do poruchového stavu (např. vlivem degradace materiálu). Z těchto důvodů je žádoucí ověřit řadu hypotéz a předpokladů o správné nebo předpokládané poruchové funkci vztahujících se k analyzovanému systému a

zohlednit vliv různých provozních podmínek, variant údržbových postupů, chování obsluhy v normálních nebo mezních situacích apod. Kvalita provedené analýzy se přímo odvíjí od použitého modelu spolehlivosti.

Vzhledem k tomu, že samotný model a všechny jeho charakteristiky mají ze své podstaty náhodnou (stochastickou) povahu, řídí se stochastickými zákony a jsou proto zatíženy určitou „nejistotou“ ve svých vlastnostech, bude i výsledek analýzy zatížen jistým rizikem nejistoty v závěrech a doporučeních. Míru tohoto rizika je možné snižovat, nelze ho však zcela odstranit. Nejistoty jsou např. spojeny s posouzením důsledků poruch prvků na závažnost poruchy systému, s odhadem pravděpodobností vzniku poruchy prvků, s posouzením vlivu změny provozních podmínek na vznik poruchy apod. Tyto nejistoty můžeme posoudit a do jisté míry zmenšit analýzou citlivosti systému na uvedené náhodné vlivy.

Dalším krokem postupu je potom kvantitativní analýza. Při ní se vychází z výsledků kvalitativní analýzy a s využitím metod analýzy poruchových stavů (metoda analýzy stromu poruchových stavů, metoda blokového diagramu bezporuchovosti) se určí pravděpodobnosti všech poruchových stavů systému se závažnými důsledky a posoudí se zda tyto číselné hodnoty splňují příslušné požadavky. Výpočet (odhad) číselných hodnot vhodně vybraných ukazatelů spolehlivosti např.: pravděpodobnosti vzniku poruchy, stupně závažnosti poruchy, střední doby mezi poruchami, anebo jiného ukazatele. Číselnou hodnotu pravděpodobnosti lze získat vhodnou a dovolenou manipulací s modelem a uvážením elementárních jevů, které strukturovaný model spojuje v analyzovaný poruchový (nežádoucí) stav systému.

Kvalitativní analýza zahrnuje i kvantitativní hlediska. Identifikace a definice možných poruch, jejich projevů, důsledků a rizika jejich vzniku mají vždy stochastickou povahu a nesou v sobě i jistou chybu v odhadu. Proto vždy můžeme v analýze pouze předpokládat vznik poruch a jejich důsledků a to obvykle na základě zkušeností získaných empiricky z provozu stejných nebo příbuzných systémů. Tyto zkušenosti potom přenášíme do očekávaného chování nového systému. Přitom je třeba uvážit i takové způsoby poruch, případně též jejich kombinací, které jsou pouze předpověditelné, to jest i takových, které se dosud ještě nevyskytly a s nimiž nejsou žádné praktické zkušenosti. U nich potom nemáme k dispozici žádné ověřené kvantitativní informace o pravděpodobnosti jejich vzniku, musíme je odhadovat a tím do analýzy vnášíme další nejistoty stochastické povahy. Tyto nejistoty je možné případně korigovat teprve mnohem později, až na základě skutečného provozu. Takže kvalitativní a kvantitativní aspekty analýzy jsou vzájemně úzce spojeny a podmíněny. Závěry z kvalitativní a kvantitativní analýzy napomáhají objasnit řadu aspektů spojených se spolehlivostí systému a zpětně mohou korigovat i původní členění systému na prvky, jejich výběr, jejich spolehlivostní vlastnosti a ovlivnit i použitý model spolehlivosti systému.

Analýza spolehlivosti má tedy iterativní charakter. Je integrální součástí všech vývojových prací na systému, přináší náměty a návrhy na změny systému, které jsou důsledkem odhalených nedostatků. První závěry z analýzy vedou ke změnám v systému a ke zvýšení jeho spolehlivosti. Vliv těchto změn a modifikací vyvolává potřebu opakování (aktualizaci) analýzy až do té doby, dokud nejsou splněny na začátku projekčních prací stanovené cíle. Iterativní aspekty, obsažené v analýze spolehlivosti ukazuje obr. 2.1.

Poznamenejme, že platné normy pro spolehlivost nspecifikují jaké metody a postupy mají být při analýze použity a případ od případu se způsob provádění analýzy může lišit, a že kvantitativní analýzu je možné obecně provádět „ručně“ pokud jsou systémy jednoduché a ne příliš rozsáhlé, jinak se provádí pomocí výpočetní techniky a speciálních, k tomu účelu vypracovaných programů.

□ Základní spolehlivostní ukazatele neobnovovaných systémů

Spolehlivost jako obecná vlastnost není sama o sobě kvantifikovatelná. Z tohoto důvodu se za účelem jejího hodnocení definují ukazatele spolehlivosti. Jsou to kvantitativní charakteristiky jedné nebo několika vlastností určujících spolehlivost objektu. Jejich číselnými hodnotami posuzujeme spolehlivost prvků a systému jako celku. Ukazatele spolehlivosti jsou závislé na tom, do jaké míry umíme jednoznačně rozlišit, je-li sledované zařízení (systém) v provozuschopném stavu, v mezním stavu nebo ve stavu poruchy, přičemž porucha je jev spočívající v ukončení schopnosti výrobku plnit požadovanou funkci, a to z jakékoliv příčiny a do jakéhokoliv stupně. Naproti tomu závada je stav funkční jednotky charakterizovaný neschopností provádět požadovanou funkci a je často důsledkem poruchy jednotky samotné. Poruchy dělíme co do podstaty na havarijní a degradační a podle stupně závažnosti na nepodstatné, malé, větší, závažné, kritické a havarijní.

Havarijní porucha se vyskytuje spontánně, bez předem zjištěné příčiny a bez tendence změn měřitelných vlastností, často s náhodným rozdělením dob do poruchy. Účinkem takovéto poruchy je bezprostřední selhání zařízení či elektrického obvodu vlivem nějakého jeho prvku. Zvláštním typem poruchy je selhání, kdy porucha trvá po omezenou dobu a samovolně odezní.

Degradační porucha vzniká následkem postupných změn od počáteční hodnoty k stanovené měřitelné vlastnosti mezní hodnoty prvku zařízení či obvodu.

Každá porucha má příčinu a původce, které lze určit až po zjištění prvotní poruchy a po stanovení podmínek jejího vzniku.

Ukazatele spolehlivosti mají teoretické a empirické charakteristiky. Základem pro teoretické charakteristiky je teorie pravděpodobnosti, empirické charakteristiky jsou vyhodnocovány statistickými metodami hodnocením statisticky oprávněného náhodného výběru. Nejpoužívanější ukazatele spolehlivosti v technické praxi jsou: pravděpodobnost poruchy

$$Q(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau,$$

kde součin $f(t)dt$ udává, s jakou pravděpodobností nastane ve sledovaném systému porucha ve velmi krátkém čase dt , následujícím za časovým okamžikem t , dále pravděpodobnost bezporuchového provozu (stavu)

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau,$$

intenzita poruch

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-Q(t)},$$

která udává podmíněnou hustotu poruch v čase t za předpokladu, že k poruše zatím nedošlo a střední doba do poruchy (mean time to failure)

$$MTTF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = - \int_0^{\infty} t dR(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$

Funkce $f(t)$ v definičních vztazích ukazatelů spolehlivosti je hustota pravděpodobnosti poruchy a základní sledovanou náhodnou veličinou je čas (doba, časový interval) t měřený od uvedení zařízení do provozu do okamžiku poruchy. Z uvedených definic ukazatelů je zřejmé, že spolu navzájem souvisí. Primárním je vztah mezi pravděpodobností bezporuchového provozu $R(t)$ a intenzitou poruch $\lambda(t)$ daný diferenciální rovnicí

$$\lambda(t) dt = - \frac{dR(t)}{R(t)},$$

kde součin $\lambda(t) dt$ udává pravděpodobnost, že systém neporouchaný v čase t se porouchá v malém časovém intervalu dt po časovém okamžiku t . Řešení této rovnice získáme integrací její levé a pravé strany

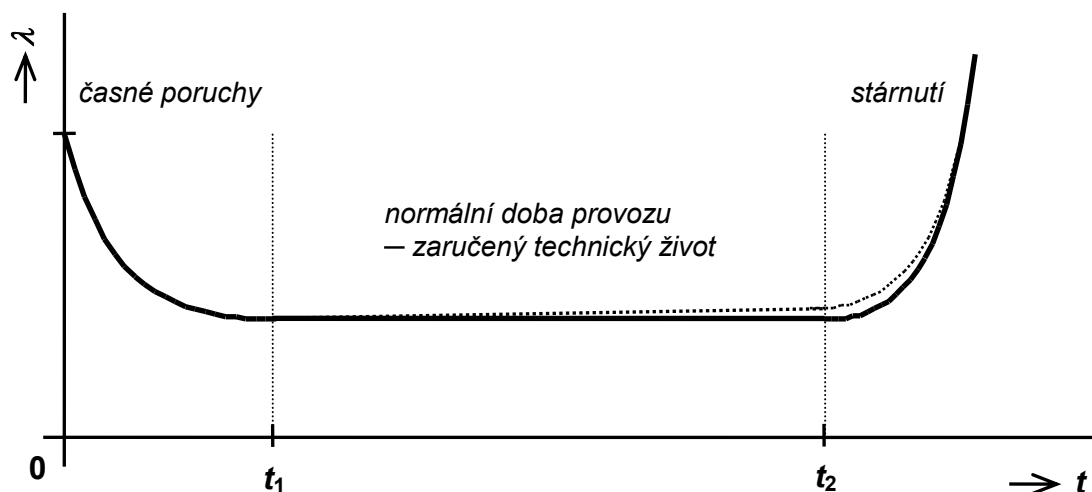
$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau}.$$

Známe-li časový průběh intenzity poruch, zjištěný např. empiricky viz obr. 2.2, kde v intervalu $\langle t_1, t_2 \rangle$ je v období tzv. normálního provozu intenzita poruch považována za konstantní (skutečný průběh je zakreslen přerušovanou čarou) a pro řešení diferenciální rovnice bude platit

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

a dále i

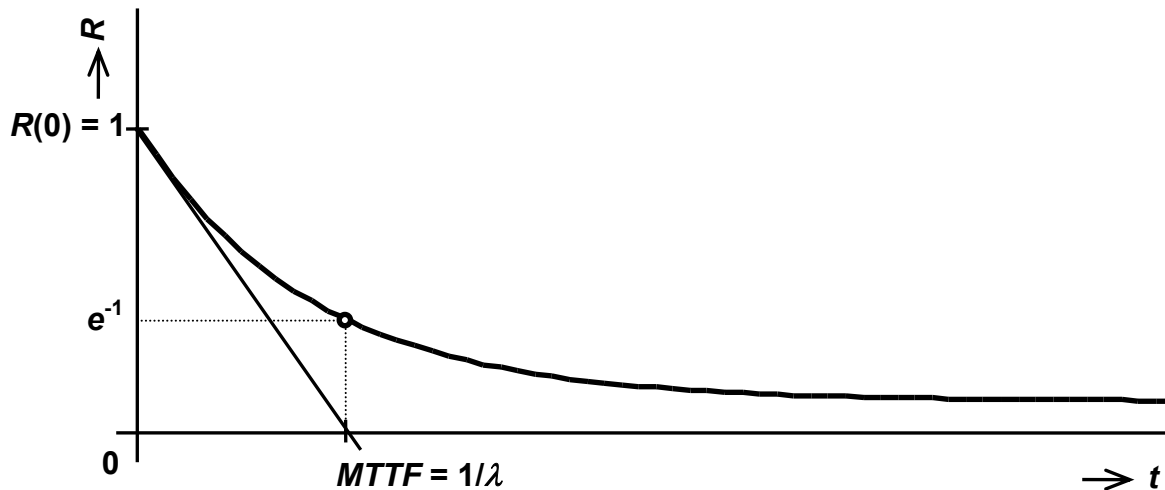
$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{a} \quad MTTF = \frac{1}{\lambda}.$$



Obr. 2.2. Typická charakteristika intenzity poruch

Měřítkem životnosti zařízení je právě normální doba provozu čili jeho zaručený technický život.

Všechny definiční vztahy ukazatelů spolehlivosti se řídí exponenciálním rozdělením a odpovídají exponenciálnímu zákonu poruch na obr. 2.3.



Obr. 2.3. Graf exponenciálního zákona poruch, času $t = 0$ s odpovídá bezporuchový stav tj. $R(0) = 1$

Příklad 2.1

Určete střední dobu do poruchy prvku nebo části podsystemu technického zařízení jehož intenzita poruch má hodnotu $\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$.



Střední dobu do poruchy zařízení jednoduše vypočteme dosazením do definičního vztahu

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^6 \text{ h.}$$

Odpovídající doba v letech 114,16 roků, korespondující s časem t_2 na obr. 2.2, je nadhodnocená, protože reálně nemůžeme předpokládat, že i po tak dlouhé době bude mít intenzita poruch konstantní hodnotu. Hodnota střední doby do poruchy je reálně nejméně o řád menší. Výpočet je tedy nutné vždy logicky kontrolovat.

Empirický tvar ukazatelů spolehlivosti je:

$$Q(t) = \frac{n_p(t)}{n} = 1 - \frac{n_b(t)}{n}, \quad R(t) = 1 - \frac{n_p(t)}{n} = \frac{n_b(t)}{n}, \quad \lambda(t) = \frac{n_p(t + \Delta t) - n_p(t)}{[n - n_p(t)]\Delta t},$$

kde n ($n > 30$) je počet zařízení (výrobků) ve zkoušeném souboru, $n_p(t)$ a $n_b(t)$ je počet porouchaných a bezporuchových zařízení ve sledovaném intervalu $\langle 0, t \rangle$. Pro počet zařízení $f(t)$ porouchaných během doby Δt , vztažený k počtu zařízení souboru n na počátku platí

$$f(t) = \frac{n_p(t + \Delta t) - n_p(t)}{n \Delta t}$$

Příklad 2.2

Určete počet bezporuchových prvků po jednom roce jejich provozu, předpokládáme-li, že mají konstantní intenzitu poruch $\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$ a exponenciální rozdělení poruch. Do provozu bylo uvedeno ve stejném čase $t = 0$ s 100 těchto prvků.



Vlivem poruch se bude počet funkčních prvků zmenšovat exponenciálně podle vztahu $n_b(t) = n e^{-\lambda t}$. Po dosazení za čas $t = 1$ rok v hodinách bude počet bezporuchových prvků

$$n_b(8760) = 100 e^{-1 \cdot 10^{-5} \cdot 8760} \approx 91,61 \approx 91.$$

Po roce provozu bude ještě funkčních 91 prvků.

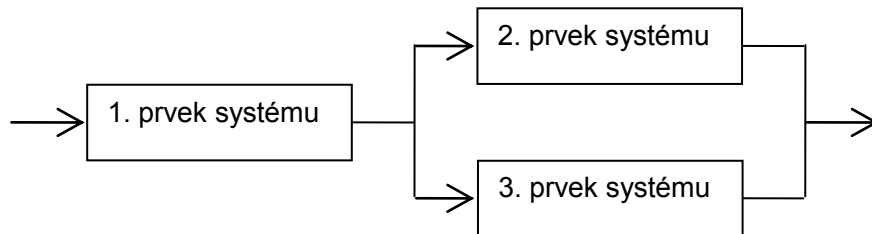
Každý ukazatel spolehlivosti mění svou hodnotu v závislosti na velkém počtu vlivů. V časovém období normálního provozu zpravidla předpokládáme, že např. intenzita poruch je konstantní, avšak to je hrubé zjednodušení. Skutečná hodnota intenzity poruch, na které se prvek či část systému ustálí, závisí na mnoha okolnostech, především na technologické úrovni výroby (stejný typ výrobku se může lišit ve spolehlivosti např. vlivem toho, že pochází od jiného výrobce nebo z různých období stejného výrobce), vlivu prostředí a provozních podmínkách (zatížení, teplota, mechanické namáhání), materiálu, konstrukci, lidském faktoru (nedodržení výrobních postupů a podmínek provozu), systému kontroly, diagnostika a profylaxe (opatření předcházejí poruchám) a v neposlední řadě i velikosti a složitosti objektu.

Poznamenejme, že pravděpodobnost, že se nevyskytne v systému nedetekovaná chyba, nelze vyjádřit žádným spolehlivostním ukazatelem, neboť kromě vlastní pravděpodobnosti výskytu chyby tu totiž hraje významnou roli i pravděpodobnost její detekce.

□ Model spolehlivosti

V teorii spolehlivosti, jak již bylo zmíněno, soubor několika vázaných prvků tvoří systém, které plní určitou funkci. Dílčí prvky se zpravidla sestávají ze součástí či jejich skupin. Mohou to být i celá složitá zařízení, ale také jednotlivé operace potřebné k dosažení požadované funkce. Prvky pokládejme za neobnovované a dvoustavové (prvek je a nebo není funkční), přičemž přechod mezi jednotlivými stavy je okamžitý, což odpovídá havarijním poruchám. Poruchy pak považujeme za vzájemně nezávislé, což ale může být značná idealizace. Způsob, jakým každý z prvků přispívá k nespolehlivosti systému jako celku, lze nejnázorněji znázornit blokovým spolehlivostním modelem. Každý prvek je v něm zastoupen jedním blokem a bloky jsou řazeny zpravidla sériově nebo paralelně. Spojnice mezi označenými bloky tvoří orientované cesty mezi vstupem a výstupem systému. Každá cesta popisuje jeden provozuschopný stav systému, který bude bezporuchový, budou-li

bezporuchové všechny prvky ležící alespoň na jedné cestě, spojující vstup s výstupem systému. Porucha tedy nastává tehdy, nedostane-li se signál ze vstupu na výstup. Blokový model je jednoduchý, neboť obsahuje jen konečný počet n nezávislých prvků, pro který je snadné na základě počtu pravděpodobnosti určit pravděpodobnost současného výskytu několika nezávislých jevů jako součin pravděpodobnosti každého z nich. Základem práce se systémem je vyhodnocení jeho okamžitého stavu. Ten je dán kombinací stavu všech jeho jednotlivých prvků, kterých je 2^n (dva možné stavy pro n prvků). Pravděpodobnost bezporuchového provozu libovolného prvku, jak již bylo zmíněno, je dána spolehlivostní funkcí času $R(t)$. Příklad ilustrující princip blokového modelu spolehlivosti je na obr. 2.4. Z obrázku je patrné, že provozuschopnost systému bude zaručena, budou-li bezporuchové prvky systému 1 a 2 nebo 1 a 3. Systém je tudíž zálohovaný a jeden z prvků 2 nebo 3 je tzv. redundantní (nadbytečný). Redundance zvyšuje odolnost systému proti poruchám a tím i jeho spolehlivost.



Obr. 2.4. Elementární spolehlivostní model systému

Příklad 2.3

Určete střední dobu do poruchy systému tvořeného 10 sériově zapojenými prvky s intenzitou poruch o hodnotě $\lambda = 1 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$.



Střední doba do poruchy systému tvořeného n sériově řazenými prvky o konstantní intenzitě poruch je logicky dána součtem n dílčích poruch prvků, tedy

$$MTTF = \frac{1}{n\lambda} = \frac{1}{10 \cdot 1 \cdot 10^{-5}} = 1 \cdot 10^4 \text{ h} = 1,14 \text{ roku.}$$

K modelování spolehlivosti složitějších systémů se používají sofistikovanější modely jako např. stavový graf, přechodový graf, metoda seznamu, metoda rozkladu, metoda FMEA, Markovovské modely, aj. Spolehlivostní modely slouží k předpovídání spolehlivosti a napomáhají tak dosažení požadavku na co nejvyšší spolehlivost.

Na závěr poznamenejme, že vždy volíme minimální nutný soubor technických prvků, tak aby stačily k realizaci požadovaného rozsahu a kvality jeho funkcí, neboť z teorie pravděpodobnosti plyne, že čím menší bude počet použitých prvků, tím bude menší pravděpodobnost poruchy



Otázky

1. Jaký je vztah mezi spolehlivostí a bezpečností systému?
2. Co ovlivňuje spolehlivost systému?
3. Z kolika kroků se skládá spolehlivostní analýza?
4. Jaký je postup analýzy spolehlivosti systému?
5. Co zahrnuje funkční a technická analýza zařízení?
6. Jaký je vztah mezi kvalitativní a kvantitativní analýzou?
7. Z jakého důvodu zavádíme spolehlivostní ukazatele?
8. Který z ukazatelů spolehlivosti udává míru životnosti zařízení?
9. Jakou intenzitu poruch předpokládáme v normální době provozu zařízení a jaké mu odpovídá rozložení poruch?
10. Jak členíme model spolehlivosti a k čemu slouží?
11. Co je to redundance systému?



Použitá literatura a další zdroje

- Hlavička, J. :Spolehlivost a diagnostika. ČVUT Praha, 1989
- Bednařík, J. a kol.: Technika spolehlivosti v elektrotechnické praxi, SNTL, Praha 1990
- ČSN IEC 50(191), Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 191: Spolehlivost a akost' služieb
- Vdoleček, F.: Spolehlivost a technická diagnostika, Studijní text pro podporu kombinovaného studia, Brno, 2002
- ČSN EN 61703, Matematické výrazy pro ukazatele bezporuchovosti, pohotovosti, udržitelnosti a zajištění údržby
- ČSN EN 61078, Techniky analýzy spolehlivosti - Blokový diagram bezporuchovosti a booleovské metody
- ČSN EN 60812, Techniky analýzy bezporuchovosti systémů – Postup analýzy způsobů a důsledků poruch (FMEA)
- Mykiska, A.: Bezpečnost a spolehlivost technických systémů, ČVUT Praha, 2006
- PAŘÍZEK, J.: Spolehlivost a technická diagnostika. Skripta Univerzita obrany Brno, 2007.
- Analýzy spolehlivosti a bezpečnosti v praxi, Sborník 35. setkání odborné skupiny pro spolehlivost, Brno, 2009
- Pelantová, V., Fuchs, P.: Řízení jakosti a spolehlivosti, Technická univerzita Liberec, 2009

11 HODNOCENÍ BEZPEČNOSTI PODLE ČSN EN ISO 13849.



Čas ke studiu: 1,5 hodiny



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- posoudit konstrukci bezpečnostních částí ovládacích systémů stroje
- rozlišit úrovně vlastností bezpečnostní funkce
- definovat strukturu bezpečnostní funkce
- stanovit požadovanou úroveň vlastností bezpečnostní funkce
- hodnotit dosaženou úroveň vlastností bezpečnostní funkce
- definovat vliv kvantitativních spolehlivostních parametrů na úroveň vlastností



VÝKLAD

11.1. Norma ČSN EN ISO 13849-1

□ Úvod

Norma ČSN EN ISO 13849-1 spolu s normou ČSN EN ISO 13849-2, zmíněné již v 1. kapitole, je základní norma bezpečnostní techniky. Poskytuje potřebné bezpečnostní požadavky a pokyny nutné k posouzení konstrukce a integrace bezpečnostních částí ovládacích systémů stroje (SRP/CS – safety-related part of a control system) včetně návrhu software, jako součást strategie celkového snížení rizika nebezpečnosti stroje v souladu ČSN EN ISO 12100-1. Úroveň vlastností požadovanou k vykonávání bezpečnostních funkcí, definovanou pravděpodobností nebezpečné poruchy, pak zajišťují části ovládacích systémů s odpovídající spolehlivostí, které jsou určeny k plnění bezpečnostních funkcí. Tyto části mohou obsahovat hardware a software a mohou být buď oddělené od ovládacího systému stroje nebo mohou být jeho integrální součástí. Kromě bezpečnostních funkcí mohou SRP/CS poskytovat také provozní funkce (např. dvouruční ovládání jako prostředek spuštění pracovního cyklu).

Schopnost bezpečnostních částí ovládacích systémů k vykonávání bezpečnostní funkce při předvídatelných podmínkách je v normě charakterizována jednou z pěti úrovní, které se nazývají úrovně vlastností (PL – performance level) nebo úrovně funkční způsobilosti či výkonnostní úrovně. Tyto úrovně vlastností jsou rozlišeny pravděpodobností nebezpečné poruchy PFH_D za hodinu a musí jim odpovídat či přesněji musí být podle nich vybírány i bezpečnostní prvky s odpovídajícími parametry.

Pravděpodobnost nebezpečné poruchy bezpečnostní funkce závisí na zvolené struktuře hardware a software, rozsahu mechanismů detekce závady [diagnostické

pokrytí (*DC* – diagnostic coverage)], spolehlivosti součástí [střední doba do nebezpečné poruchy *MTTF_d*], poruše se společnou příčinou (*CCF* – common cause failure), procesu konstrukce, provozním zatížení, podmínkách prostředí a pracovních postupech.

Aby tato norma pomohla konstruktérovi a usnadnila mu posouzení dosažené úrovně vlastností (*PL*), používá metodologii, která je založena na kategorizaci struktur podle specifických konstrukčních kritérií a specifikovaného chování v podmínkách závady. Těmto kategoriím je přidělena jedna z pěti úrovní, označených jako kategorie B, 1, 2, 3 a 4.

Úrovně vlastností a kategorie se mohou vztahovat na bezpečnostní části ovládacích systémů, jako jsou:

- ochranná zařízení (např. dvouruční ovládání, blokovací zařízení), elektrická snímací ochranná zařízení (např. fotoelektrické clony), zařízení citlivá na tlak
- ovládací jednotky (např. logická jednotka pro ovládací funkce, zpracování dat, monitorování, atd.) a
- prvky silového ovládání (např. relé, ventily, atd.)

a stejně tak na ovládací systémy, které vykonávají bezpečnostní funkce u všech druhů strojních zařízení – od jednoduchých zařízení (např. malých kuchyňských strojků nebo automatických dveří a vrat) až po výrobní zařízení (např. balicí stroje, tiskové stroje, lisy).

Připomeňme si jen, že norma platí pro bezpečnostní části ovládacích systémů (*SRP/CS*) bez ohledu na druh používané technologie a energie (elektrické, hydraulické, pneumatické, mechanické, atd.) pro všechny druhy strojních zařízení, ale neuvádí specifické požadavky na konstrukci výrobků, které jsou součástí bezpečnostních částí ovládacích systémů a že zajištění funkční bezpečnosti těchto systémů tj. zajištění vykonávání bezpečnostních funkcí za „každých okolností“ je důležité zejména tam, kde jejich funkční selhání by mohlo být příčinou vzniku nebezpečných situací s vysokou úrovní rizika.

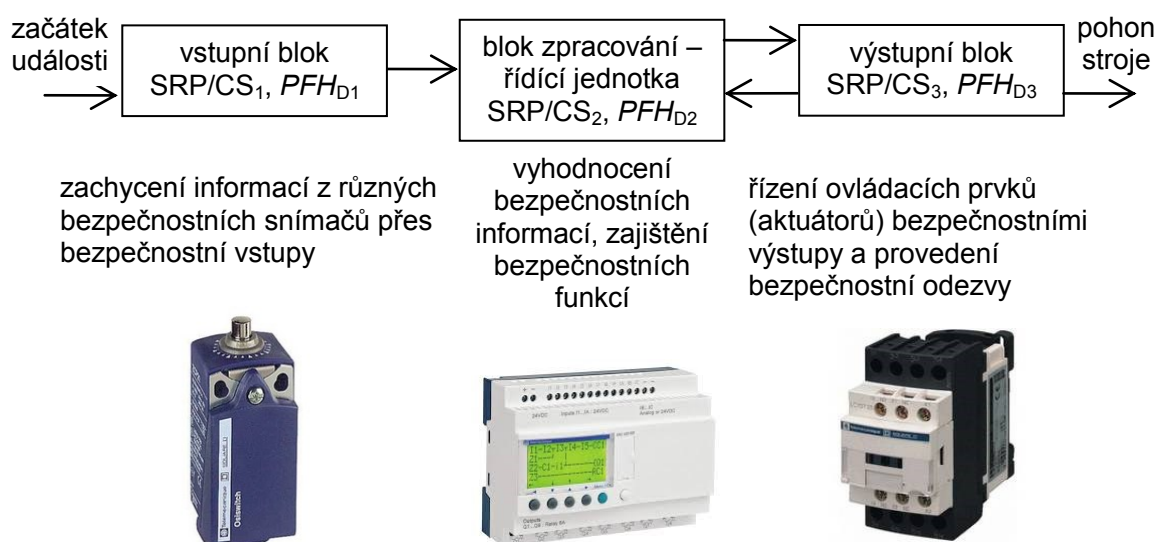
□ Realizace bezpečnostní funkce

Funkce bezpečnostních částí ovládacích systémů, dříve nazývaných bezpečnostními logickými obvody, implementovanými v rámci ovládacího (řídícího) systému stroje je vysvětlena v 1. kapitole, kde jsou i zmíněny typické příklady bezpečnostních funkcí. Připomeňme si jen, že hlavním cílem použití bezpečnostních částí ovládacích systémů je zvýšení ochrany proti možnému ohrožení osob, zařízení nebo výrobního procesu v blízkém okolí stroje, nelze-li již riziko snížit jeho konstrukcí.

Obecná struktura realizace bezpečnostní funkce, kterou zajišťuje příslušný bezpečnostní obvod ovládacího systému, je na obr. 3.1. Bezpečnostní obvod je realizován kombinací obecně několika bezpečnostních částí ovládacího systému. Principiálně ho můžeme rozdělit do následujících bloků: bloku zpracování, realizovaného vyhodnocovací (řídící) jednotkou či přístrojem, který reaguje na bezpečnostní vstupní signály (např. signál z mechanického polohového spínače, optoelektronické brány, tlačítka apod.) vstupního bloku (snímače) a vytváří bezpečnostní výstupní signály pro ovládací prvky (např. relé, hlavní kontakty stykače, elektromagneticky ovládaný ventil, elektrický pohon, hlásič aj.) výstupního bloku

(aktuátoru), který včasnou reakcí chrání stroj a jeho okolí např. tím, že pohon stroje odpojí od zdroje energie nebo, že ho uvede do bezpečného stavu. Jednotlivé bloky mohou být spojeny propojovacími prostředky (elektrické, optické, bezdrátové), které propojují navzájem si odpovídající analogové nebo binární vstupy/výstupy. Bezpečnostní část ovládacího systému – jedna jednotka SRP/CS (subsystém) je tedy část ovládacího systému, která reaguje na bezpečnostní vstupní signály a vytváří bezpečnostní výstupní signály. Vyhodnocovací jednotka může být elektronická (programovatelný i neprogramovatelný procesorový systém s kontaktními i bezkontaktními vstupy i výstupy např. bezpečnostní PLC či bezpečnostní integrované systémy), elektromechanická (relé, stykač) i mechanická (řídící přístroje s tzv. nuceným rozpínáním např. čidla polohy). Zvláštním případem vyhodnocovací jednotky je tzv. bezpečnostní modul (logický elektronický či elektromechanický modul nebo multifunkční bezpečnostní kontrolér), který sám o sobě může realizovat bezpečnostní funkci (např. nouzové zastavení, hlídač ochranných dveří, hlídač světelné závory, hlídač klidových poloh, dvouruční ovládání aj.) nebo může být zapojen mezi blok zpracování a výstupní blok na obr. 3.1 a kontrolovat nejen sám sebe, ale i stav signálů aktuátoru (akčního členu), což je vyžadováno ke splnění požadavků u vyšších kategorií normy. Bezpečnostní modul však musí být navržen tak, aby jeho závada nezpůsobila ztrátu bezpečnostní funkce systému, jehož je součástí a dále až do odstranění této závady nesmí umožnit uvedení stroje do provozu, což je velmi důležitá vlastnost, neboť porucha kteréhokoliv prvku bezpečnostní funkce, znamená ztrátu bezpečnostní funkce a může znamenat, že stroj nemusí být uveden jejím následkem do bezpečného stavu.

Pro zajímavost uvedme, že na trh byl koncem 80. let uveden nejprve bezpečnostní modul určený pro nouzové zastavení. Finančně tento prvek nebyl vůbec výhodný, ale dramaticky ušetřil místo v rozvaděči (namísto 4 stykačů stačilo zapojit 1 modul o šířce 8 cm). Jeho další výhodou je vyšší spolehlivost a snadná údržba podobně jako u bezpečnostních integrovaných systémů.



Obr. 3.1. Obecná struktura realizace bezpečnostní funkce/ bezpečnostního obvodu

Každá bezpečnostní funkce vždy obsahuje celý řetězec, od sběru a zpracování informace až k vykonání příslušné akce, i když je integrována do ovládacího systému stroje a neobsahuje tudíž samostatný blok zpracování, který je součástí řídicí

jednotky automatického ovládacího systému stroje. V tomto případě se jedná o tzv. bezpečnostní integrované systémy (safety systems), tvořené bezpečnostním PLC „vyzbrojeném“ klasickými bezpečnostními snímači a aktuátory (např. stykače, ventily). Předností integrovaných systémů je, že uvedou při detekci chyby celý systém do bezpečného stavu. Dle vypínací sekvence se snaží co nejdříve dosáhnout stavu se všemi výstupy v logické 0, a poté následuje zastavení stroje nebo strojního zařízení (části výroby).

Bezpečnostní funkce může být realizována jednou nebo více SRP/CS a několik funkcí se může dělit o jednu nebo více SRP/CS (např. o logickou jednotku, silový ovládací prvek). Jeden bezpečnostní systém pak může plnit jednu nebo několik bezpečnostních funkcí.

Ovládací systém stroje, jako komplexní systém, potom reaguje na vstupní signály od částí prvků stroje, obsluhy, vnějšího ovládacího zařízení nebo od jakýchkoliv jejich kombinací a vytváří výstupní signály takové, že se stroj chová předpokládaným způsobem. Ovládací systém může používat jakoukoliv technologii nebo jakoukoliv kombinaci různých technologií (elektrickou, hydraulickou, pneumatickou, mechanickou) stejně jako jednotlivé části bezpečnostního obvodu, které jsou jeho důležitou součástí. Bezpečnostní funkce, realizované na různých technologických principech, pak mohou splnit i nejnáročnější požadavky kategorií 3 a 4 normy. Obecně pak platí, že pro každou použitou bezpečnostní část ovládacího systému musí být zvolena kategorie s normou předepsanou architekturou, která má velký vliv na dosaženou úroveň vlastnosti.

Poznamenejme, že jsou-li pro diagnostiku použity monitorovací systémy, jsou tyto systémy považovány za bezpečnostní části ovládacího systému.

□ **Příspěvek ke snížení rizika ovládacím systémem a hodnocení dosažené úrovně vlastností**

Účelem postupu návrhu celkové konstrukce stroje je dosažení bezpečnostních cílů v souladu se zásadami snižování procesu rizika daných normou ČSN EN ISO 12100-1, kam náleží i snížení rizika zabudovanými konstrukčními bezpečnostními opatřeními v podobě konstrukce bezpečnostních částí ovládacího systému, kterou se dosáhne požadovaného snížení rizika na požadovanou úroveň vlastnosti PL_r (required performance level) návrhem bezpečnostního obvodu, nepodařilo-li se snížit hodnotu rizika na tuto úroveň opatřeními provedenými v konstrukci stroje. Požadovaná úroveň vlastností, je úroveň vlastností, používaná k tomu, aby bylo dosaženo pro každou bezpečnostní funkci požadovaného snížení rizika tzv. ochranným opatřením v oblasti konstrukce, viz obr. 3.3.

Jak již bylo zmíněno v 2. kapitole, vzniklo za tímto účelem několik metod modelování spolehlivosti vhodných i pro odhad kvantitativních hledisek úrovně vlastností pro jakýkoliv druh bezpečnostního systému, ale za účelem usnadnění posouzení těchto kvantitativních hledisek úrovně vlastností požadované bezpečnostní funkce norma zavedla zjednodušenou metodu, která je založena na definici pěti stanovených architektur, které splňují specifická konstrukční kritéria a chování v podmínce závady.

Úroveň vlastností bezpečnostní funkce je v pak normě definována pravděpodobností nebezpečné poruchy za hodinu, tj. pravděpodobností selhání (výpadku) SRP/CS. Je stanoveno pět diskrétních úrovní vlastností (a až e) s definovanými rozsahy pravděpodobnosti nebezpečné poruchy viz tab. 3.1, které vymezují schopnosti

bezpečnostních částí ovládacích systémů k vykonávání bezpečnostní funkce při předvídatelných podmínkách. Písmeno e odpovídá nejvyšší úrovni. Jestliže dosahuje úroveň vlastností hodnoty a až c, mají bezpečnostní části vyloučit závady, při úrovních d až e mají bezpečnostní části ovládacího systému vést k vyloučení, detekci nebo tolerování závad.

Tab. 3.1 Úrovně vlastností, průměrná pravděpodobnost nebezpečné poruchy PFH_D

	PFH_D (h^{-1})	odpovídá době v letech
a	$\geq 10^{-5}$ až $< 10^{-4}$	asi do 2 let
b	$\geq 3 \cdot 10^{-6}$ až $< 10^{-5}$	asi od 2 let do 30 let
c	$\geq 10^{-6}$ až $< 3 \cdot 10^{-6}$	asi od 30 let do 100 let
d	$\geq 10^{-7}$ až $< 10^{-6}$	asi od 100 let do 1000 let
e	$\geq 10^{-8}$ až $< 10^{-7}$	asi nad 1000 let

Příklad 3.1

Určete odpovídající úroveň vlastností bezpečnostní funkce se strukturou bezpečnostního obvodu podle obr. 3.1 složeného z polohového spínače, bezpečnostního PLC a stykače, jejichž pravděpodobnosti nebezpečné poruchy jsou v pořadí $3,6 \cdot 10^{-6} h^{-1}$, $6,5 \cdot 10^{-7} h^{-1}$, $3,2 \cdot 10^{-7} h^{-1}$.



Výsledná hodnota pravděpodobností nebezpečné poruchy vyšetřovaného bezpečnostního obvodu je dána

$$PFH_D = PFH_{D1} + PFH_{D2} + PFH_{D3} = 3,6 \cdot 10^{-6} + 6,5 \cdot 10^{-7} + 3,2 \cdot 10^{-7} = 4,57 \cdot 10^{-6} h^{-1},$$

protože prvky jsou řazeny sériově. Z tab. 3.1 vidíme, že vypočtené hodnotě pravděpodobností nebezpečné poruchy obvodu náleží úroveň vlastností b.

Pokud výrobce v katalogu neudává hodnotu PFH_D , ale střední dobu do poruchy $MTTF_d$, pak pro jednokanálový systém s průměrnou pravděpodobností nebezpečné poruchy platí přepočet

$$PFH_D = \frac{1}{MTTF_d},$$

tedy pro náš bezpečnostní obvod

$$\frac{1}{MTTF_d} = \frac{1}{MTTF_{d1}} + \frac{1}{MTTF_{d2}} + \frac{1}{MTTF_{d3}}.$$

Při samotném návrhu technického řešení bezpečnostní části ovládacího systému musí být požadovaná úroveň vlastností minimálně rovna skutečné úrovni vlastností,

tedy kontrolním výpočtem ověřené úrovni vlastností navržené bezpečnostní funkce ovládacího systému, pro kterou musí platit

$$PL \geq PL_r.$$

Tato požadovaná úroveň funkční vlastnosti pak musí být definována a dokumentována pro každou bezpečnostní funkci, která je vykonávána bezpečnostní součástí řídicího systému.

Hodnocení dosažené úrovně vlastností pro každou bezpečnostní část ovládacího systému nebo pro kombinaci bezpečnostních částí ovládacího systému, která vykonává bezpečnostní funkci, musí být podle normy proveden odhad hodnoty úrovně vlastností nejen na základě hodnoty pravděpodobnosti nebezpečné poruchy PFH_D či střední doby do nebezpečné poruchy $MTTF_d$, ale i uvážením následujících kvantitativních parametrů:

- hodnoty diagnostického pokrytí DC , kdy ve většině případů může být hodnota DC odhadnuta metodou režimů poruchy a analýzy poruchy (metoda FMEA)
- poruchy se společnou příčinou CCF , kdy jedna závada v kterékoliv části ovládacího systému nesmí vést ke ztrátě bezpečnostní funkce
- kategorie (architektura) bezpečnostních částí ovládacího obvodu, které jsou objektivně dané a ověřením nezjistitelných kvalitativních hledisek ovlivňujících
 - bezpečnostního software
 - chování bezpečnostní funkce v podmínce (podmínkách) závady
 - systematické poruchy
 - schopnosti vykonávat bezpečnostní funkci v očekávaných podmínkách prostředí, které jsou součástí subjektivního hodnocení dosažené úrovně vlastností.

Hodnoty těchto parametrů/hledisek jsou určeny podle příloh C, D, E, F, G a J normy nebo jsou tyto parametry udány výrobcem.

Dosažení kvalitativních hledisek úrovně vlastností může být prokázáno použitím doporučených opatření podle části 4.6 normy a přílohy G. Z kvalitativních hledisek má nejvyšší váhu bezpečnostní software.

V aplikacích, u nichž mohou být bezpečnostní části ovládacího systému považovány za jednoduché a je-li požadovaná úroveň vlastností a až c, může být kvalitativní odhad úrovně vlastností ospravedlněn logickou konstrukcí.

Možností, jak dosáhnout potřebné úrovně vlastností bezpečnostního ovládacího systému, je vždy vícero. Záleží jen konstruktérovi, jaké technologické provedení bezpečnostních prvků s odpovídajícími spolehlivostními parametry ($MTTF_d$, DC , doba používání, atd.) upřednostní. S přihlédnutím na pořizovací náklady však většinou stojí před volbou, má-li použít jeden speciální bezpečnostní prvek nebo kombinaci standardních prvků s vyšší variabilitou bezpečnostní části ovládacího systému, kterou lze dosáhnout stejné úrovně bezpečnosti, jaké dosahuje prvek speciální, ale za cenu nižšího diagnostického pokrytí. Snížení rizika, a tedy i vyšší spolehlivosti, lze dosáhnout především volbou osvědčených (certifikovaných) součástí a/nebo použitím osvědčených bezpečnostních zásad, aby byly

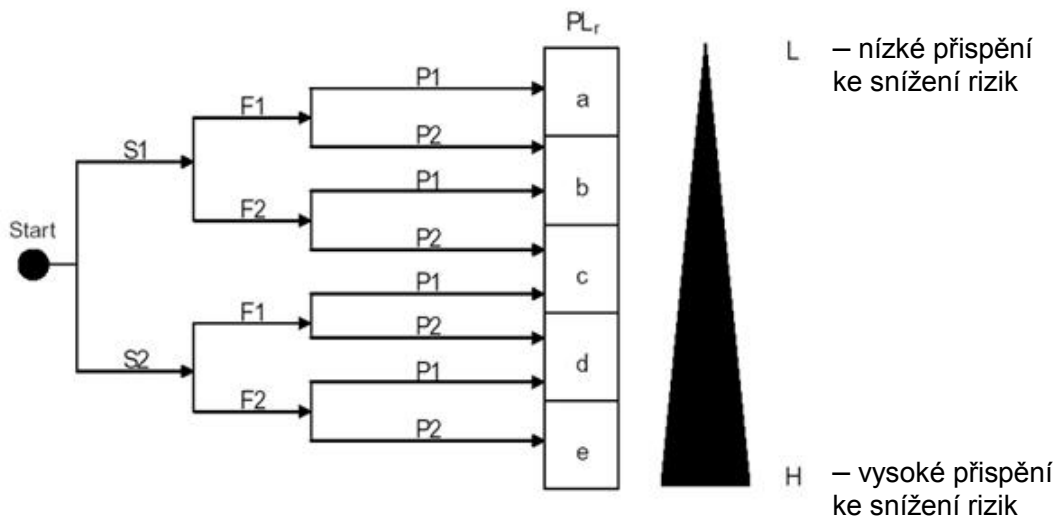
minimalizovány nebo vyloučeny kritické závady nebo poruchy viz ČSN EN ISO 13849-2. Vyloučení nebezpečného účinku závady nebo poruchy je pak úkolem zlepšené konstrukce bezpečnostních částí ovládacího systému, který má zajistit pokračování činnosti systému po případné poruše části či částí jeho architektury např. redundancí (zálohováním) prvků systému bezpečnostního obvodu, napájení, sběrnic, vstupů a výstupů, monitorováním i zálohováním dat, pravidelnou kontrolou funkce, automatickým rozpoznáváním poruchy apod.

Poznamenejme, že pro hodnocení dosažené úrovně vlastností je nutné znát:

- kompletní schéma elektroinstalace (alespoň bezpečnostních obvodů)
- analýzu rizikovosti
- logické schéma bezpečnostní logiky
- pokud se jedná o programovatelnou logiku, tak výpis bezpečnostního ovládacího programu.

□ Převod rizika do požadované úrovně vlastnosti

Zajištění dosažení požadovaného snížení rizika pro každou bezpečnostní funkci tedy odpovídá požadovaná úroveň funkční vlastnosti, a té zase musí odpovídat výsledná úroveň funkčních vlastností prvků navrženého bezpečnostního obvodu. Čím větší je požadovaná míra snížení rizika bezpečnostními částmi ovládacího systému, tím vyšší musí být hodnota požadované úrovně funkční vlastnosti. K odhadu zjištění požadované úrovně funkční vlastnosti pro každou bezpečnostní funkci se využívá diagram rizik na obr. 3.2, který je součástí přílohy A normy.



Legenda k parametrům rizika:

S Váženost zranění	F Četnost nebo trvání vystavení riziku
S1 Lehké zranění (obecně bez trvalých následků)	F1 Zřídka až méně časté nebo krátké trvání vystavení riziku
S2 Těžké zranění (obecně s trvalými následky), včetně smrti	F2 Časté až stálé nebo dlouhé trvání vystavení riziku
	P Možnost vyloučení rizika nebo snížení poškození
	P1 Možné za určitých podmínek
	P2 Téměř nemožné

Obr. 3.2 Graf rizika pro určení požadované úrovně vlastností bezpečnostní funkce

Diskutujeme nyní jednotlivé parametry grafu rizika na obr. 3.2. Jak vidíme, při vzniklé poruše bezpečnostní funkce jsou v odhadu rizika uvažována pouze lehká zranění (obvykle s přechodnými následky), závažná zranění (obvykle s trvalými následky) a smrt. Při určení vážnosti zranění pomocí parametrů S1 nebo S2 by měly být vzaty v úvahu obvyklé následky úrazů a běžné léčebné postupy. Například pohmoždění a/nebo tržné rány bez komplikací mají být klasifikovány jako S1, zatímco amputace nebo smrt by měly být klasifikovány jako S2.

Obecně platná perioda času odpovídající době vystavení rizika, charakterizována parametry F1 nebo F2 nemůže být specifikována. Parametr F2 má být zvolen tehdy, je-li osoba vystavena nebezpečí často nebo nepřetržitě. Je nepodstatné, zda je vystavena nebezpečí táž osoba nebo postupně různé osoby, např. při používání výtahů. Parametr četnosti má být zvolen podle četnosti a doby trvání přístupu k nebezpečí. Perioda vystavení nebezpečí má být odhadnuta na základě průměrné hodnoty, která může být uvažována ve vztahu k celkové době, v průběhu které je zařízení používáno. Například, je-li nezbytný pravidelný vstup mezi nástroje stroje při cyklickém provozu sloužící pro posuv a pohyb obrobku, měl by být zvolen parametr F2. Je-li však požadován přístup pouze čas od času, má být zvolen parametr F1.

Poznamenejme, že je-li četnost vyšší než jednou za hodinu, má být v tomto případě, bez jakéhokoliv zdůvodnění, zvolen parametr F2.

Pokud jde o možnost vyloučení rizika nebo snížení poškození, je důležité vědět, zda může být rozpoznána nebezpečná situace, a zda může být vyloučena dříve, než může dojít k úrazu. Například důležitá je úvaha, zda může být nebezpečí přímo identifikováno jeho fyzikálními vlastnostmi, anebo zda může být identifikováno pouze technickými prostředky, např. sdělovači. Jiná důležitá hlediska, která ovlivňují volbu parametru P zahrnují, například:

- provoz s dozorem nebo bez dozoru
- provoz s odborníky nebo laiky
- rychlost s jakou vzniká nebezpečí (např. rychle nebo pomalu)
- možnosti vyvarování se nebezpečí (např. uniknutím)
- praktické bezpečnostní zkušenosti vztahující se k procesu.

Vyskytne-li se nebezpečná situace a je-li reálná možnost vyloučení úrazu nebo významného snížení jeho účinků, má být zvolen pouze parametr P1. Parametr P2 má být zvolen tehdy, není-li téměř žádná možnost vyloučení nebezpečí.

Příklad 3.2

Uřčete z grafu rizika požadovanou úroveň vlastností bezpečnostní funkce, která zajistí při otevření krytu neřízené zastavení stroje tzv. neřízené odstavení.

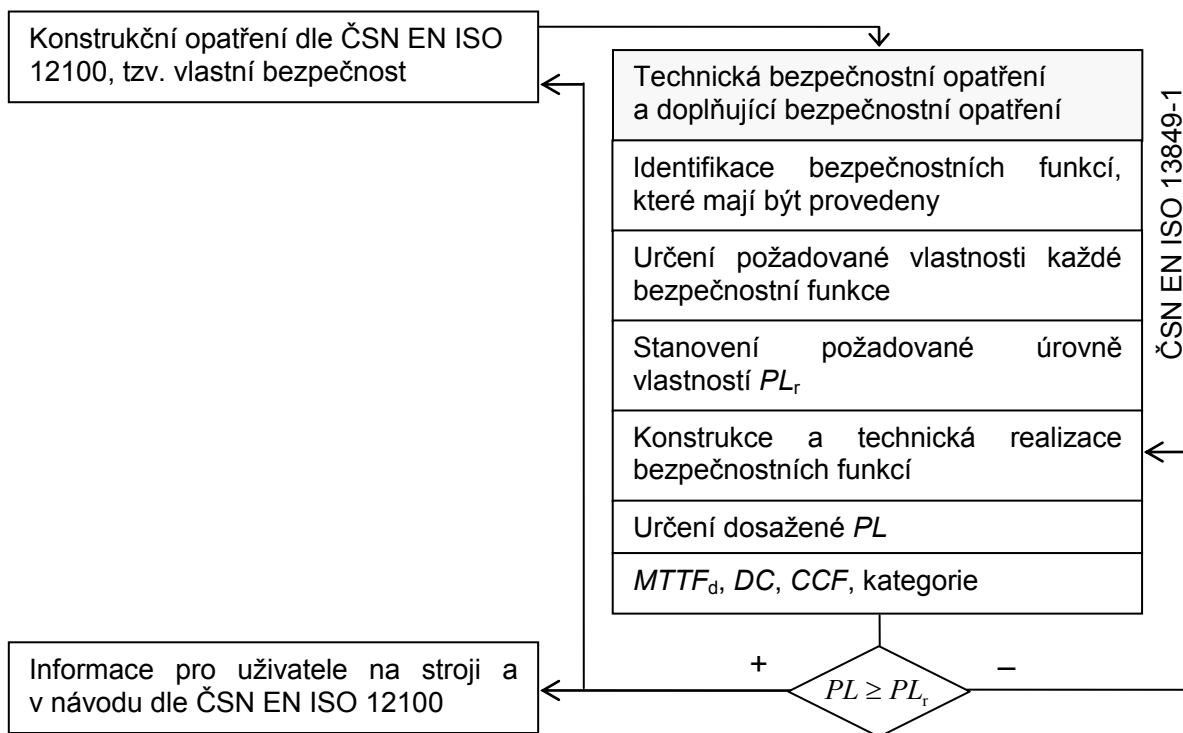


Realizujeme bezpečnostní funkci, nouzové vypnutí, která zajistí, že při otevření krytu dojde k odpojení napájení motoru stroje. Uvažujeme, že nedojde-li k zastavení stroje,

hrozí obsluze stroje pravděpodobně zlomení ruky nebo amputace prstu, což jsou zranění s trvalými následky, kterým v grafu rizik odpovídá parametr S2. Bude-li obsluha vystavena riziku často, díky manipulaci s výrobkem, přisoudíme tomuto riziku parametr F2. Půjde-li za určitých podmínek vyhnout se nebezpečí, a tím vyloučit možnost rizika, díky dostatečnému zaškolení obsluhy, volme parametr F1. Z grafu rizika na obr. 3.2 pro cestu S2, F2, P1 vyplyne požadovaná úroveň vlastností $PL_r = d$.

□ Diskuze kvantitativních parametrů ovlivňujících dosaženou úroveň vlastností

Odhad rizika a zjištění požadované úrovně vlastností určí tedy úroveň snížení rizika. Zda bylo či nebylo požadované úrovně snížení rizika dosaženo, záleží především na již výše uvedených kvantitativních parametrech $MTTF_d$, DC , CCF a architektuře bezpečnostního obvodu. Celý proces snižování rizika je přehledně zachycen v blokovém schématu na obr. 3.3.



Obr. 3.3. Celkový proces snížení rizika na jeho požadovanou úroveň

Vliv kvantitativních parametrů na úroveň vlastností a vztah mezi nimi je zachycen na obr. 3.4. Tento obrázek zachycuje zjednodušený postup pro určení úrovně vlastností bezpečnostní funkce a je z něj zřejmé, že úroveň vlastností je funkcí různých rozsahů střední doby do nebezpečné poruchy $MTTF_d$, diagnostického pokrytí DC v rozmezí „žádné až vysoké“, kategorií architektur bezpečnostních obvodů v rozmezí B až 4 a poruchy se společnou příčinou CCF a že úroveň PL lze přiřadit ke konkrétní úrovni SIL. Zdůrazněme ale, že úroveň PL není možné z úrovně SIL odvodit. Roli kvantitativních parametrů si v této části rozeberme podrobněji.

Střední doba do nebezpečné poruchy je kvalitativním vyjádřením bezpečnostní funkce a je mírou jakosti (kvality) nejen jednotlivých prvků, ale i celého bezpečnostního řetězce resp. každého jeho kanálu počínaje snímačem a konče

aktuátorem (akčním členem). Z praktických důvodů je výhodné udávat její hodnotu v letech a neuvažovat její hodnotu vyšší než 100 roků. Určení hodnoty $MTTF_d$ je nejnáze možné nalézt metodami a postupy doporučenými normou v příloze C a D a podle navržených technických bezpečnostních opatření ji přiřadit jedno ze tří hodnocení: nízká, střední nebo vysoká, viz obr. 3.4. Z obrázku plyne, že čím vyšší bude hodnota $MTTF_d$, tím vyšší bude i hodnota úrovně vlastností.

3 roky $\leq MTTF_d < 10$ roků, krátká doba ■		10 roků $\leq MTTF_d < 30$ roků, střední doba ■		30 roků $\leq MTTF_d < 100$ roků, dlouhá doba ■			
a	■	■	■	■			
b	■	■	■	■	■	1	
c		■	■	■	■		
d			■	■	■		
e					■	2	
					■	3	
určení PL, a až e	DC < 60 % žádné		60 % \leq DC < 90 % nízké	90 % \leq DC < 99 % střední	60 % \leq DC < 90 % nízké	90 % \leq DC < 99 % střední	99 % \leq DC vysoké
	kat. B	kat. 1	kat. 2		kat. 3		kat. 4
žádné opatření pro snížení CCF		CCF \geq 65 %					určení SIL, 1 až 3

Obr. 3.4 Vliv technických bezpečnostních opatření na stanovení úrovně vlastností

Výrobci často uvádí hodnotu B_{10d} , jelikož spolehlivost některých prvků bezpečnostních obvodů je závislá na počtu cyklů spínání. Tato hodnota odpovídá počtu cyklů, kdy 10% zkoušených součástí nebezpečně selže. Při znalosti střední hodnoty četnosti spínání n_{op} nebo omezené doby provozu prvku bezpečnostního obvodu T_{10d} můžeme střední dobu do nebezpečné poruchy určit přepočtem, za předpokladu exponenciálního rozložení poruchy,

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \cdot n_{op}} = \frac{T_{10d}}{0,1},$$

po dosazení

$$n_{op} = \frac{3600 \cdot d_{op} \cdot h_{op}}{t_{cykl}},$$

kde d_{op} je střední doba provozu ve dnech za rok, h_{op} střední doba provozu v hodinách za den a t_{cykl} střední doba mezi začátkem dvou po sobě následujících cyklů spínání v s/cykl.

Příklad 3.3

Proveďte hodnocení střední doby do nebezpečné poruchy ovládacího ventilu, který sepne dvakrát za den, znáte-li hodnoty parametrů: $B_{10d} = 40\,000\,000$ cyklů, 240 pracovních dnů, dvousměnný provoz, 10 s pracovní cyklus ventilu.



Nejprve musíme určit střední hodnotu četnosti spínání ventilu n_{op} uvážením jeho střední doby provozu za rok $d_{op} = 240$ dnů, střední doby provozu za den $h_{op} = 2 \cdot 8 = 16$ h pro 8 h trvání směny a střední doby mezi začátkem dvou po sobě následujících cyklů spínání $t_{cykl} = 10$ s/cykl, neboť dvěma sepnutím odpovídá právě jeden pracovní cyklus spínání.

$$n_{op} = \frac{3600 \cdot d_{op} \cdot h_{op}}{t_{cykl}} = \frac{3600 \cdot 240 \cdot 16}{10} = 1382400 \text{ cyklů/rok.}$$

Střední dobu do nebezpečné poruchy ovládacího ventilu pak stanovíme

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \cdot n_{op}} = \frac{40000000}{0,1 \cdot 1382400} = 289,35 \text{ roků}$$

a následně i omezenou dobu provozu ventilu

$$T_{10d} = 0,1 \cdot MTTF_d = 0,1 \cdot 289,35 = 28,94 \text{ roků.}$$

Na základě obr. 3.4 vidíme, že střední dobu do nebezpečné poruchy ovládacího ventilu ohodnotíme označením „dlouhá“. Tato hodnota je ale platná pouze pro omezenou dobu provozu ventilu T_{10d} 28,94 roků.

Diagnostické pokrytí je mírou účinnosti diagnostiky a udává snížení pravděpodobnosti nebezpečných poruch hardwaru bezpečnostního systému v důsledku provádění automatických diagnostických testů (monitorování). Je definováno podílem intenzity detekovaných nebezpečných poruch a intenzity všech poruch, tj. detekovaných bezpečných i nebezpečných poruch dohromady. Udává se v procentech a klasifikuje se podle rozsahu: minimální $DC < 60\%$, $60\% \leq$ nízké $DC < 90\%$, $90\% \leq$ střední $DC < 99\%$, $99\% \leq$ vysoké DC , viz obr. 3.4. Zjišťuje se testováním nebo odhadem (metoda FMEA). Podmínkou jeho hodnocení je, aby byl bezpečnostní systém vybaven logickou jednotkou, která je schopna během provozu nebo při cyklickém testování (diagnostikování) závadu odhalit. Čím má diagnostické pokrytí vyšší hodnotu, tím více musí být logická jednotka schopna detekovat stav různých částí bezpečnostního systému stroje, blíže viz příloha E normy, kde jsou pro zjednodušení uvedeny tabulky, ve kterých je hodnota diagnostického pokrytí uvedena pro jednotlivá zařízení.

Poznamenejme, že bezpečná porucha, je taková porucha, která není schopna uvést bezpečnostní systém stroje do nebezpečného stavu, v němž není schopen plnit svou funkci. Zda se tato možnost nastane nebo ne, závisí na architektuře kanálů bezpečnostního systému (redundance, monitorování, zpětná vazba) a na jeho konkrétní aplikaci. Naproti tomu nebezpečná porucha je porucha, která je schopna uvést bezpečnostní systém stroje do nebezpečného stavu (závada) nebo do stavu kdy není schopen plnit svou funkci.

Výslednou hodnotu diagnostického pokrytí všech n součástí bezpečnostních částí ovládacího systému bez vyloučení závady určíme z definice průměrného diagnostického pokrytí

$$DC_{\text{avg}} = \frac{\frac{DC_1}{MTTF_{d1}} + \frac{DC_2}{MTTF_{d2}} + \dots + \frac{DC_n}{MTTF_{dn}}}{\frac{1}{MTTF_{d1}} + \frac{1}{MTTF_{d2}} + \dots + \frac{1}{MTTF_{dn}}} = \frac{DC_1 \cdot PFH_{D1} + DC_2 \cdot PFH_{D2} + \dots + DC_n \cdot PFH_{Dn}}{PFH_{D1} + PFH_{D2} + \dots + PFH_{Dn}}$$

Příklad 3.4

Určete průměrnou hodnotu diagnostického pokrytí bezpečnostního obvodu z příkladu 3.1, známe-li hodnoty diagnostického pokrytí jeho prvků: polohového spínače 75 %, bezpečnostního PLC 99 % a stykače 60 %.



Hodnotu průměrného diagnostického pokrytí DC_{avg} získáme dosazením do definičního vztahu pro $n = 3$. Bez ohledu na to, v jakých jednotkách dosadíme hodnotu pravděpodobností nebezpečné poruchy PFH_D příslušného prvku bezpečnostního obvodu, v našem případě tedy v h^{-1} , získáme hodnotu

$$\begin{aligned} DC_{\text{avg}} &= \frac{DC_1 \cdot PFH_{D1} + DC_2 \cdot PFH_{D2} + DC_3 \cdot PFH_{D3}}{PFH_{D1} + PFH_{D2} + PFH_{D3}} = \\ &= \frac{75 \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} + 99 \cdot 6,5 \cdot 10^{-7} + 60 \cdot 3,2 \cdot 10^{-7}}{3,6 \cdot 10^{-6} + 6,5 \cdot 10^{-7} + 3,2 \cdot 10^{-7}} = 66,6\%. \end{aligned}$$

Jak vidíme, výsledná hodnota diagnostického pokrytí je 66,6 %, což je nízká hodnota.

Poruchy různých jednotek způsobené jednotlivými událostmi (jedním nebo více jevy), kde tyto poruchy nejsou ve vzájemném příčinném vztahu, jsou známy jako poruchy se společnou příčinou. Společné poruchy jsou současně probíhající poruchy souvisejících prvků způsobené společnou nebo sdílenou příčinou (např. dva nefunkční elektromotory z důvodu závady na společném elektrickém jističi). Vznikají, když vnější příčina vyřadí z funkce více součástí nezávisle na $MTTF_d$. Prvky, které selžou v důsledku společné příčiny obvykle selžou při stejné funkci. Společné poruchy nastávají i z jiných příčin, než jenom závislých na konstrukci, může se jednat o faktory prostředí, lidské chyby, poškození atd. Ignorování vlivů závislosti a společných poruch může způsobit nadhodnocení úrovně spolehlivosti anebo bezpečnosti. Kroky k jejich omezení zahrnují např. následující opatření:

- použití rozdílných prvků a technologií
- použití osvědčených součástek
- oddělení
- ochrana proti přepětí
- zlepšení elektromagnetické kompatibility,

kteřá jsou součástí tabulky, uvedené v normě v příloze F pro odhad poruchy se společnou příčinou. Každému opatření odpovídá určitý počet bodů. Pokud jsou opatření splněna, je zapsáno dané bodové hodnocení, pokud je opatření splněno jen částečně, obdrží nula bodů. Po součtu všech bodů musí být celková hodnota vyšší než 65. Pokud tomu tak není, je nutné opatření doplnit a tabulku vyplnit znovu, aby bylo dosaženo snížení četnosti těchto poruch se společnou příčinou.

Poznamenejme, že odhad CCF a jejich následků je kvantitativní proces, který by se měl pochopitelně aplikovat na celé zařízení a měl by brát v úvahu každou bezpečnostní část řídicího systému.

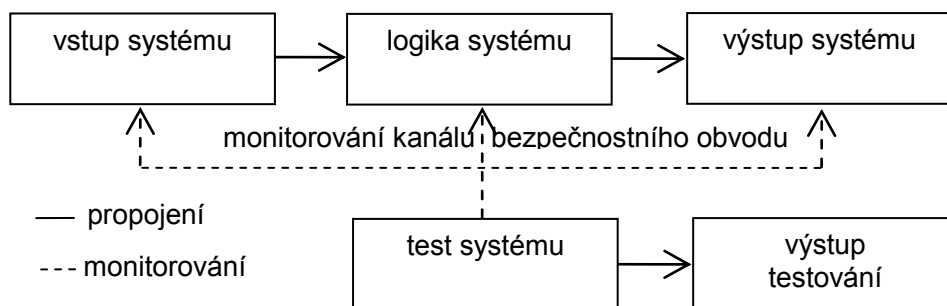
Posledním z diskutovaných kvantitativních parametrů je volba kategorie bezpečnostních částí ovládacího systému, jejímž cílem je zajištění jeho chování v podmínce závady. Základní myšlenkou tohoto přístupu je, že čím více závisí snížení rizika na bezpečnostním systému stroje, tím odolnější musí systém být proti poruchám (jako např. zkratky, svařené kontakty atd.), a tomu musí odpovídat struktura (architektura) bezpečnostní funkce. Připomeňme si je jen, že každá část řetězce bezpečnostní funkce, realizovaná bezpečnostním prvkem vykonává určitou funkci, a to zpravidla vstupní, logického řešení a aktivace. Skupiny prvků, které provádějí tyto funkce nazýváme subsystémy. Řetězec bezpečnostní funkce tvoří kanál. I když bezpečnostní řídicí systém, jeho logická jednotka, bude vnitřně odolná vůči chybám (např. duplexní kanál), může selhat, díky závadě vstupního a aktivačního (výstupního) prvku, protože systém je jednokanálový. Spolehlivost bezpečnostního systému zvýšíme, bude-li redundantní, přidáním (konstrukcí) dalšího kanálu. Má-li dva kanály, může tolerovat jednu poruchu a stále být funkční. Prvky kanálu se stejnou funkcí pak norma popisuje jako „bloky“. Další zvýšení spolehlivosti bezpečnostního systému, z hlediska jeho bezpečnostní funkce, zajistíme, zařadíme-li do něj diagnostická opatření pro detekci poruch, na jejichž základě můžeme obnovit bezpečný stav systému. Norma definuje pět základních typů systémové architektury, kterým odpovídá pět kategorií, které si dále blíže následovně charakterizujeme.

Základní kategorií je B. Bezpečnostní části ovládacího systému stroje této kategorie musejí být navrženy tak, aby odolávaly očekávaným vlivům. Musí používat základní bezpečnostní zásady, blíže viz norma ČSN EN ISO 13849-2. Jelikož řídicí obvody jsou pouze základního typu, může dojít k selhání bezpečnostní funkce vlivem jediné poruchy. Kategorie B sama neobsahuje žádné speciální bezpečnostní opatření, avšak tvoří základnu pro ostatní kategorie. Co do blokového schématu je její architektura totožná se strukturou bezpečnostního obvodu na obr. 3.1 resp. architekturou na obr. 3.5. bez testovacího bloku a monitorování. Z obr. 3.4 vidíme, že maximální dosažitelná úroveň vlastností pro kategorii B je b.

Kategorie 1 má stejnou strukturu obvodu jako kategorie B a může stále selhat v případě jediné poruchy. Protože však musí používat dobře ověřené bezpečnostní zásady viz norma ČSN EN ISO 13849-2 (např. předimenzování), je selhání méně pravděpodobné než u kategorie B. Tato kategorie je zaměřena na především prevenci poruch. Dosahujeme jí pomocí vhodných konstrukčních zásad, bezpečnostních prvků ($MTTF_d$ každého kanálu kategorie 1 má vyšší hodnotu než v kategorii B) a materiálů. Z obr. 3.4 vidíme, že maximální dosažitelná úroveň vlastností pro kategorii 1 je c.

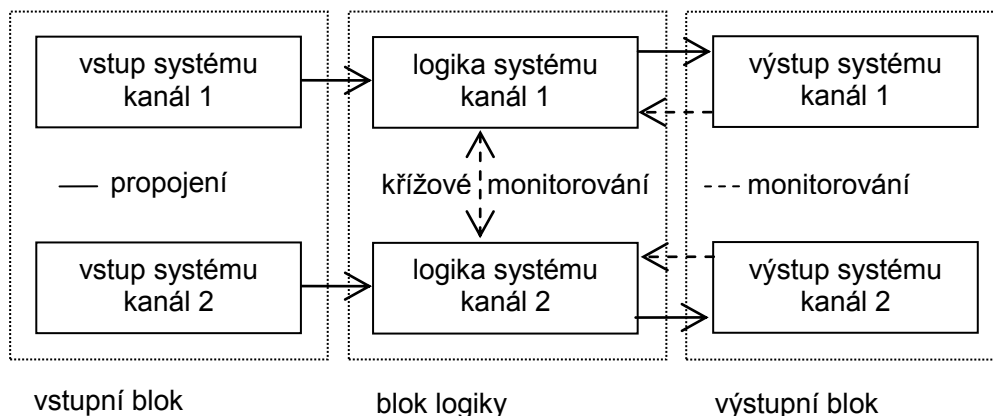
Kategorie 2 musí používat osvědčené bezpečnostní zásady, ale navíc musí být použito diagnostické monitorování pomocí funkčního testu systému nebo

subsystému, viz obr. 3.5. Musí probíhat při spuštění a následně pravidelně s četností, která odpovídá požadavkům na bezpečnostní funkce podle druhu a použití stroje. Podle normy musí být míra testování nejméně stokrát častější než požadovaná míra. Ztráta bezpečnostní funkce je detekována při kontrole. Systém nebo subsystém mohou stále selhat při jediné poruše mezi funkčními testy, ale to je obvykle méně pravděpodobné než u kategorie 1. Pokud dojde k detekci poruchy, musí být nastolen zabezpečený stav, a jestliže to není možné, systém musí vydat výstražný signál. Z obr. 3.4 vidíme, že maximální dosažitelná úroveň vlastností pro kategorii 2 je d. Poznamenejme, že interval kontroly funkčnosti ovládacího systému stroje musí být uveden v technické dokumentaci, že pokyny pro provádění testu musí být součástí návodu použití stroje a že obsluha musí být prokazatelně poučena, jak má správně postupovat.



Obr. 3.5. Architektura kategorie 2

Kategorie 3 musí používat osvědčené bezpečnostní zásady, ale navíc systém nebo subsystém nesmí selhat v případě jediné poruchy. Znamená to, že systém musí mít toleranci jedné chyby, aby byla jeho bezpečnostní funkce zachována. Nemusí však být detekovány všechny chyby. Nahromadění nedetekovaných chyb tak může vézt ke ztrátě bezpečnostní funkce. Nejčastějším způsobem jak dosáhnout tohoto požadavku je použití dvoukanálové architektury, viz obr.3.6, aby byla jedna porucha detekována, což zajišťuje hodnota diagnostického pokrytí, přičemž platí podle obr. 3.4, že čím větší je hodnota $MTTF_d$ systému, tím menší je potřebná hodnota diagnostického pokrytí, které ale musí mít hodnotu nejméně 60 %.



Obr. 3.6. Architektura kategorie 3

Kategorie architektury 4 má stejnou strukturu obvodu jako kategorie 3 a musí používat osvědčené bezpečnostní zásady. Má stejný diagram požadavků jako

kategorie 3, ale vyžaduje vyšší monitorování, tj. vyšší diagnostické pokrytí. Rozdíl mezi kategoriemi 3 a 4 spočívá v zásadě v tom, že u kategorie 3 musí být detekována většina poruch, kdežto u kategorie 4 musí být detekovány všechny jednotlivé poruchy. Jednotlivá závada v jakékoliv části bezpečnostního systému tedy nesmí vést ke ztrátě bezpečnostní funkce, ty se vždy vykonávají. Rovněž nahromadění nedetekovaných závad nesmí vést ke ztrátě bezpečnostní funkce. DC musí být nejméně hodnotu 99 %. Ani kombinace chyb nesmí způsobit nebezpečnou poruchu. Z obr. 3.4 vidíme, že maximální dosažitelná úroveň vlastností pro kategorii 4, ale i 3 je e, tedy čím vyšší kategorii bezpečnostních částí ovládacího systému volíme, tím dosáhneme vyšší požadované úrovně vlastností.

Výsledky výpočtů jednotlivých kvantitativních parametrů se nakonec „pomyslně“ dosadí do tabulky na obr. 3.4, ze které je možné „vyčíst“ maximální úroveň vlastností bezpečnostního systému s vybranými prvky. Pokud je hodnota nižší než požadovaná úroveň vlastností, je nutné opakovat celý proces na obr. 3.3 a volit jednotlivé prvky a strukturu systému s lepšími bezpečnostními vlastnostmi.

Poznamenejme, že pro bezpečnostní část řídicího systému, která se odlišuje od stanovených struktur, musí být proveden podrobný výpočet, aby bylo možné prokázat splnění požadované úrovně vlastností.

Při konstrukci bezpečnostních součástí řídicího systému je důležité, aby výrobce pro vlastní potřeby, zdokumentoval v souladu s normou následující informace:

- bezpečnostní funkce zajišťované bezpečnostními součástmi řídicího systému
- vlastnosti každé z bezpečnostních funkcí
- přesné body, ve kterých bezpečnostní součásti začínají a končí
- okolní podmínky
- úroveň funkční vlastnosti
- zvolenou kategorii
- parametry vztahující se ke spolehlivosti ($MTTF_d$, DC, CCF a dobu použití)
- opatření proti systematickým závadám
- použitou technologii
- veškeré bezpečnostní závady, které byly zohledněny
- důvody k vyloučení závad
- důvody pro konstrukci (např. zohledněné závady, vyloučené závady)
- dokumentace softwaru
- opatření proti důvodně předvídatelnému chybnému použití.

Všeobecně je tato dokumentace určena pro interní využití ze strany výrobce a nepředává se uživateli stroje.

Za účelem usnadnění (automatizace) postupu vyhodnocování dosažené úrovně vlastností vznikly různé softwarové systémy. Mezi nejvíce rozšířené systémy patří program Sistema, německé organizace IFA, zdarma dostupný na internetu, který implementuje požadavky a postupy normy ČSN EN ISO 13849-1. Umožňuje modelovat strukturu ovládacích systémů na základě předepsaných architektur a

bezprostředně zobrazovat vliv změny kvantitativních parametrů na celý systém. Díky tomuto systému je uživatel ušetřen od časově náročného vyhledávání v tabulkách a výpočtu vzorců, výsledek včetně kompletní dokumentace celého procesu lze vytisknout. Jeho největší výhodou je otevřenost, neboť umožňuje používat knihovny bezpečnostních prvků od různých výrobců.

Při konstrukci bezpečnostních částí ovládacích systémů stroje vždy pamatujeme na to, že bezpečnostní systém je pouze tak dobrý, jako je jeho nejslabší subsystém a že čím více subsystémů systém obsahuje, tím je jeho pravděpodobnost selhání vyšší.



Otázky

1. K čemu slouží bezpečnostní části ovládacího systému stroje?
2. Jak je realizována bezpečnostní funkce a k čemu slouží?
3. Co je to úroveň vlastností a čím je definována?
4. Na základě čeho posuzujeme konstrukci bezpečnostních částí ovládacích systémů stroje?
5. Jak se určuje požadovaná úroveň funkční způsobilosti?
6. Co je to diagram rizik?
7. Jak se zjišťuje požadovaná úroveň funkční způsobilosti?
8. Jak souvisí počet cyklů bezpečnostního prvku se střední dobou do nebezpečné poruchy?
9. Co je diagnostické pokrytí a jaký má účel?
10. Co nazýváme poruchu se společnou příčinou?
11. Co jsou to kategorie architektury bezpečnostních obvodů a kolik jich existuje?
12. Jak se liší architektura kategorie 2 a 3?
13. Jak se zjišťuje dosažená úroveň funkčních vlastností?
14. Jaký je vztah mezi kategoriemi architektury, střední dobou do poruchy diagnostickým pokrytím a úrovní vlastností?
15. Který programový nástroj implementuje požadavky normy ČSN EN ISO 13849-1.



Použitá literatura a další zdroje

Bezpečnostní prvky pro stroje a strojní zařízení - Aplikační příručka, Moeller Elektrotechnika s.r.o., 2001

ČSN EN ISO 13849-1, Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci

ČSN EN ISO 13849-2, Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 2: Ověřování platnosti

Čermák, J.: Bezpečnost ovládacích systémů strojů podle platných norem, Automa č. 2, 2008

BGIA Report 2/2008e, Functional safety of machine controls – Applications of EN ISO 13849 -, Central Division of the BGIA – Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance

Safety Integrated obecné zásady versus použitelné komponenty, Siemens s.r.o., 2008

Příručka pro bezpečné konstruování, Festo s.r.o., 2008

Bezpečnostní prvky pro strojní zařízení, Eaton Elektrotechnika s.r.o., 2010

Bezpečnostní příručka pro strojní zařízení, Schneider Electric CZ s.r.o., 2010

Bezpečnostní řídicí systémy pro strojní zařízení - Zásady, normy a implementace, Allen-Bradley, 2011

Dudek, J.: Elektrotechnika pro FBI, učební text VŠB TU Ostrava, 2012

Proven Systems – Proven Safe, Euchner electric, 2013

<http://www.dguv.de/ifa/Praxishilfen/Software/SISTEMA/index-2>

12 Úvod do souboru norem IEC 61 508



Čas ke studiu: 8 hodin



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pojem funkční bezpečnosti
- definovat základní rozdělení bezpečnostních systémů
- popsat základní strukturu IEC 61 508
- definovat koncept rizika a ochranných vrstev ve smyslu IEC 61 508/61 511
- popsat princip snižování rizika a prevence nebezpečí.



Výklad

12.1. 1.1 Funkční bezpečnost

S ohledem na to, že příčiny ohrožení zdraví osob, popřípadě poškození majetku nebo životního prostředí, mohou být velmi různorodé, stejně jako technická opatření pro zabránění jejich vzniku nebo zmírnění jejich následků, je nutné odlišovat různé druhy bezpečnosti, např. elektrickou bezpečnost, jedná-li se o ochranu před nebezpečnými účinky elektrického proudu, požární bezpečnost, jedná-li se o ochranu před požárem atd.

V souvislosti s rozvojem průmyslové automatizace také funkční bezpečnost, pokud se jedná o ochranu před nebezpečími, která mohou být vyvolána nekorektní funkcí. Zajištění funkční bezpečnosti je zvláště důležité u tzv. bezpečnostních částí řídicích systémů, tj. u všech částí ovládacích obvodů, které zajišťují vykonávání bezpečnostních funkcí a jejichž funkční selhání by mohlo být příčinou vzniku nebezpečných situací s vysokou úrovní rizika.

Vzhledem ke komplikovanosti bezpečnostních úloh v průmyslu zavedla IEC 61 508 poměrně nový pojem tzv. funkční bezpečnosti, kdy zařízení musí správně reagovat na vstupy systému, včetně pravděpodobných chyb operátora, selhání hardwaru nebo softwaru a změny prostředí. Úspěšný návrh jednotlivých součástí zařízení vyžaduje velmi podrobně analyzovat odpovědi na základní otázky:

- a) Co má konkrétní systém vlastně dělat (jakou roli má představovat v celkovém návrhu bezpečnostních opatření)?
- b) Jak dobře by takovýto systém měl provádět svoji funkci?

Odpověď na první otázku je důležitá zejména, pro návrh konkrétní architektury systému, nebo funkce. Naproti tomu druhá otázka je zaměřena spíše ekonomicky a říká nám, že se snažíme systém již při návrhu zbytečně nepředimenzovat.

Základní rozdělení bezpečnostních systémů je ve své podstatě na aktivní a pasivní. K pasivním mechanismům patří veškeré ochranné dveře, bezpečnostní spínače a další mechanické díly, které brání přístupu obsluhy k nebezpečným oblastem, tzn. např. protipožární dveře, izolace vinutí, apod. Tyto prvky není možné zahrnout do funkční bezpečnosti.

Mezi aktivní bezpečnostní systémy je možné zahrnout veškeré prvky, které se „aktivně“ podílejí na zajištění bezpečnosti, např. se jedná o světelné závory, aktivní zastavení stroje při otevření krytu, systémy pro detekci kouře, jako jsou různá čidla a protipožární panely. Oproti pasivním systémům aktivní systémy patří do skupiny funkční bezpečnosti. Pouze pro připomenutí takovéto systémy nemusí nutně pracovat na elektrickém principu, ale mohou být realizovány hydraulicky, pneumaticky, apod.

12.2. 1.2 Historický vývoj

Vývoj standardů souvisejících s bezpečností odrážel zejména úroveň technické vyspělosti lidské společnosti. Zároveň reagoval na draze vykoupené zkušenosti z reálného života v podobě výsledků vyšetřování závažných havárií. Zjednodušeně se dá říci, že každá velká havárie znamenala posun v konstrukci bezpečnostních systémů směrem k bezpečnějším procesům, které tyto systémy řídí.

Stejně jako například v oblasti soustavy jednotek Si ani v oblasti bezpečnostních standardů nikdy nedošlo ke globálnímu sjednocení těchto standardů. Samozřejmě, že tato nejednotnost nemusí vždy vést k návrhu méně bezpečných systémů. Hlavní problém lze spatřovat spíše v nejednotné terminologii, což může v současné globalizované ekonomice vést k mnohým nedorozuměním a tvořit jakousi pomyslnou bariéru v předávání zkušeností mezi odborníky stejného oboru.

Pomineme-li standardy zavedené, pro potřeby průmyslu za druhé světové války a pro potřeby leteckého průmyslu, je průkopníkem na poli průmyslové bezpečnosti tzv. „Offshore těžba“. Jedná se zejména o ropné plošiny, jejichž hlavní rozmach přichází ve druhé polovině 20. století. Technologický pokrok dosažený v první polovině 20. století, růst ceny ropy a v neposlední řadě její strategický význam vedly k otevření mnoha nových ložisek. Společně s tím jak rostl počet ropných plošin, logicky stoupaly obavy z možné havárie. Proto již v roce 1974 vydala společnost API první standard pro návrh zařízení souvisejících s bezpečností API RP14C1 (1974). Postupem času se v Evropě objevují první standardy ať už německý DIN VDE 19250 (1991), DIN VDE 0801(1989), nebo britský standard HSE PES (1987). Na poli mezinárodních standardů na API RP14C přímo navazuje ISO 10418 a později přímo pracovní verze, pro IEC 61 508 v podobě IEC SC 65. V roce 1995 dochází ke sjednocení většiny těchto standardů vydáním IEC 61 508, který je poté zpětně implementován do standardů konkrétních zemí. Tato implementace vychází přímo z úmluvy členů společenství IEC.

V následujícím textu se zaměříme pouze na soubor norem IEC 61508. Tento soubor norem má za úkol tvořit normativní základ pro vydávání konkrétních sektorových a produktových norem.

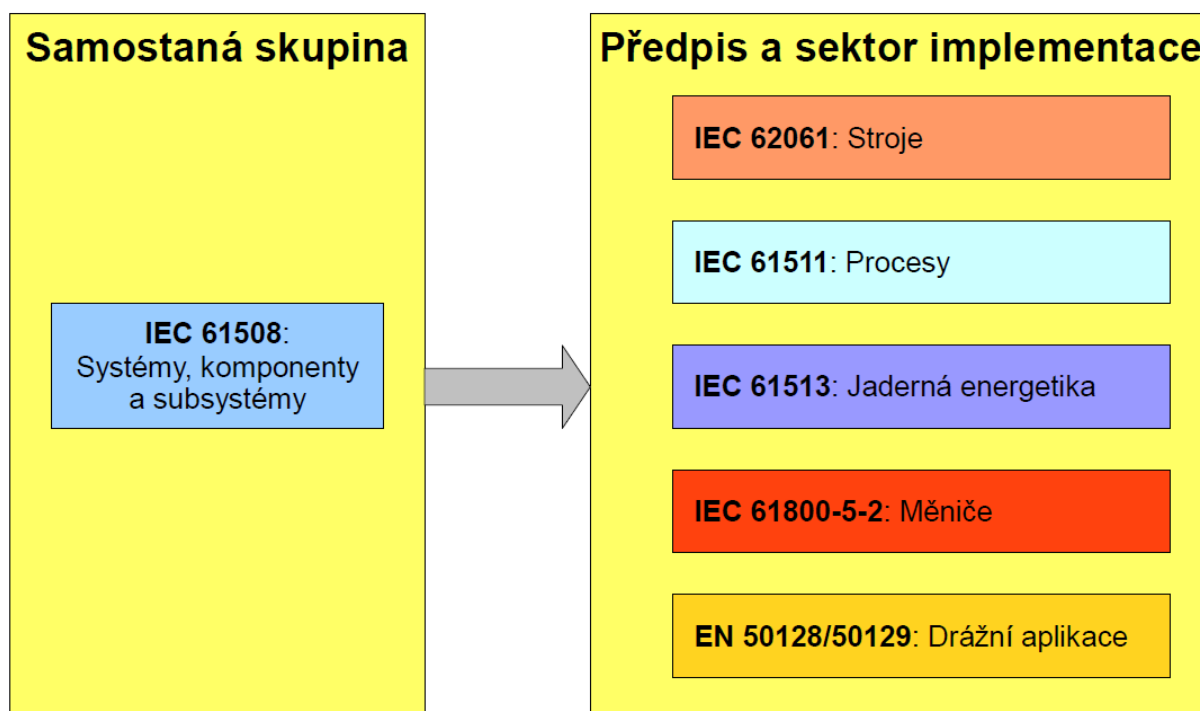
□ Soubor norem IEC 61 508

V současné době je aktuální druhá edice tohoto souboru norem, celý soubor se skládá ze sedmi částí, kdy první tři jsou normativního charakteru a zbývající čtyři informativního. Jednotlivé části obsahují:

- Část 1: Všeobecné požadavky
- Část 2: Požadavky na elektrické/elektronické/programovatelné systémy související s bezpečností
- Část 3: Požadavky na software
- Část 4: Definice a zkratky
- Část 5: Příklady metod určování úrovně integrity bezpečnosti
- Část 6: Metodické pokyny pro použití IEC 61 508-2 a IEC 61 508-3
- Část 7: Přehled technik a opatření.

Celý soubor je nutné chápat jako celek zavádějící bezpečnostní standardy ve spíše obecné rovině. Obecný přístup má podle tvůrců norem přispět ke kvalitě normy, tedy aby technické detaily realizace byly specifikovány až v konkrétní sektorové normě. S ohledem na tuto skutečnost by měly být metodické pokyny IEC 61 508 použitelné pouze s drobnými změnami v dlouhém časovém období.

Příklad některých sektorových norem vycházejících ze souboru IEC 61 508 je uveden na Obr. 1. Zde pouze poznamenejme, že v budoucnu se počítá s tím, že další sektorové normy budou přibývat. Proto tento výčet není rozhodně úplný a je nutné brát v úvahu datum jeho vzniku.



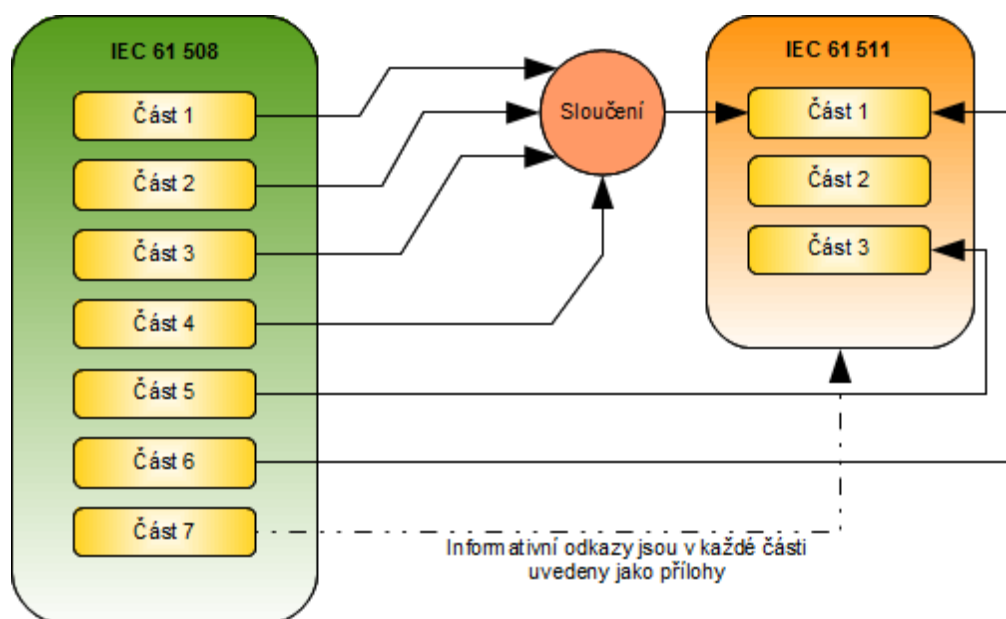
Obr. 1: - Příklady implementace norem navazujících na IEC 61 508

Jak již bylo uvedeno výše, tvoří IEC 61 508 pouze spíše jakousi základnu pro tvorbu konkrétních sektorových norem. Konkrétní technické řešení, na které jsme zvyklí např. ze souboru norem ČSN 332000, zde budeme hledat marně. Celý soubor IEC 61 508 na první pohled působí poněkud obecným dojmem. Nicméně tato skutečnost nemusí být nutně překážkou, spíše naopak dodává celému souboru nadčasovost a robustnost. Problémem je, že nás obrazně řečeno nevede za ruku krok po kroku celým návrhem systémů E/E/PE. K tomuto účelu mají sloužit až konkrétní sektorové normy. Často nastává situace, kdy není jasné, kterou sektorovou normu použít pro konkrétní aplikaci, proto se v následujícím textu pokusíme ve stručnosti popsat hlavní rysy některých důležitých sektorových norem uvedených na Obr. 1.

□ Soubor norem IEC 61 511

Jedná se o aplikaci IEC 61 508 vytvořenou pro potřeby procesní části průmyslu. Pod pojmem procesní zde rozumíme průmysl např. chemický, potravinářský, petrochemický, hutní, apod. Jedná se tedy prakticky o nejpoužívanější oborovou implementaci IEC 61 508. Tyto technologie bývají popsány pomocí procesních diagramů a zpravidla obsahují část řízení samotného procesu a část reagující na mimořádné stavy. Mimořádné stavy představují například nouzové odstavení technologie tzv. ESD (emergency shutdown). Složitě technologie není totiž zpravidla možné odstavit pouhopouhým vypnutím, ale je nutné aktivovat celý nový proces, který hlídá přípustné tlaky, teploty, hladiny, apod. a jehož výsledkem je uvedení technologie do bezpečného stavu.

Souvislost mezi IEC 61 508 a IEC 61 511 je v grafické podobě uvedena na Obr. 2. Části 1 až 4 IEC 61 508 jsou implementovány do části 1 IEC 61 511 a to společně s částí 6 IEC 61 508. Část 5 IEC 61 508 je zapracována do části 3. Společné informativní odkazy jsou zapracovány do příslušných částí IEC 61 511 v podobě příloh.



Obr. 2: Rozdíly v rozvržení částí IEC 61 508 a IEC 61 511

Při použití IEC 61 511 je nutné brát v potaz skutečnost, že vychází z IEC 61 508. Proto pokud si osvojíme aplikaci IEC 61 508, zvládneme vlastně i IEC 61 511. Obě normy se podstatně liší pouze v použité terminologii uvedené v Tab. 1.

IEC 61 508	IEC 61 511	Poznámka
Systém E/E/PE související s bezpečností	SIS	IEC 61 508 se vztahuje na systémy E/E/PE související s bezpečností, zatímco IEC 61 511 se vztahuje jen na bezpečnostní přístrojové systémy
PES	SIS	IEC 61 508 "PES" obsahuje senzory a koncové řídicí členy, zatímco IEC 61 511 užívá pojmu SIS
Systém řízení procesu	Základní systém řízení procesu	základní systém řízení procesu je souhrnný termín pro sektor průmyslových procesů
EUC	Proces	IEC 61 508 se vztahuje na EUC (řízené zařízení), zatímco IEC 61 511 se vztahuje na proces
Bezpečnostní funkce	Bezpečnostní přístrojová funkce (SIF)	IEC 61 508 má bezpečnostní funkci zavedenou E/E/PES, jiným systémem souvisejícím s bezpečností nebo s vnějšími prostředky snížení rizika, zatímco IEC 61 511 má SIF zavedenou jen prostřednictvím SIS

Tab. 1: Rozdíly v terminologii mezi IEC 61 508 a IEC 61 511

Hlavní rozdíly tak lze spatřovat v aplikační rovině a hloubce řešení (k čemuž lze ostatně dojít i dedukcí z Tab. 1). IEC 61 511 je tak pouze určitým zjednodušením metod, postupů a procesu uvedených v IEC 61 508. Samozřejmě, že toto zjednodušení přináší i určitá omezení, které je nutné důkladně zvážit při rozhodování, kterou z těchto dvou norem použít pro konkrétní aplikaci.

□ Soubor norem IEC 62 061

Jedná se o specifickou implementaci IEC 61 508 pro oblast strojů a strojních zařízení. Objasňuje návrh systémové úrovně elektrických/elektronických řídicích systémů. Hlavním předpokladem pro použití je přesné zdokumentování požadavků na bezpečnostní funkce na základě, kterých jsou specifikovány požadavky na bezpečnostní integritu systému.

Základním principem je rozdělení systému na jednotlivé subsystémy. Subsystém je zde chápán jako část, jejíž selhání způsobí selhání bezpečnostní funkce. Jedná se vlastně o tzv. cestu neúspěchu známou z výpočtů spolehlivosti. Platnost tohoto dokumentu je omezena na mechanické a elektronické komponenty. Soubor 62 061 používá základní metody vycházející z ISO 13849-1.

Oproti postupu ve spolehlivostních úlohách neuvádí hodnotu $MTTF_d$ v rocích, ale zavádí míru selhání za jeden rok. Tato hodnota se získá:

- a) přímo, nebo
- b) odvozením od hodnoty B_{10d} .

Tato hodnota se kvantifikuje pro každý subsystém a systém a slouží ke stanovení integrity bezpečnosti. Pro určení integrity bezpečnosti je dále nutné znát parametry uvedené v Tab. 2.

Vstupní data k určení kategorie SIL	Symbol
Pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu	PFH_D
Tolerance poruchy hardwaru	Žádný symbol
Podíl bezpečných poruch (resp. selhání)	SFF
Interval kontrolního testu	T_1
Interval diagnostického testu	T_2
Tendence k selhání se společnou příčinou	β
Diagnostické pokrytí	DC

Tab. 2: - Prvky potřebné pro stanovení úrovně integrity bezpečnosti podle IEC 62 061

Normy ISO 13849 a IEC/EN 62 016 se výrazně liší v metodologii určení PFH_d . Zatímco ISO 13849 pracuje s parametrem PL, který je až v konečné fázi návrhu převeden na SIL, IEC 62 061 je přímo založena na využití parametru PFD včetně nutných procesních omezení.

Pro určení PFD jednotlivých subsystémů je nutné provést důkladnou analýzu až na úroveň jednotlivých komponent. Na základě vstupních dat, pro jednotlivé komponenty a architektury začlenění do systému existují vzorce pro výpočet celkového PFD pro konkrétní případ. Nicméně pokud nejsou tyto vzorce vhodné, je třeba provést analýzu a tím pádem i určení PFD celého systému podle metod jako jsou např. Markovi modely, simulace Monte Carlo apod.

Pokud získáme PFD pro jednotlivé subsystémů je potom celková pravděpodobnost nebezpečné poruchy definována součtem jednotlivých PFD. Pomocí celkového PFD potom hledáme konkrétní úroveň integrity bezpečnosti. Úroveň SIL, kterou můžeme u systému požadovat, však není určena pouze hodnotou PFD, ale je nutné zahrnout i poruchovou toleranci HW společně s podílem bezpečných selhání. Pokud zahrneme tato omezení do konkrétní úrovně SIL, získáme tzv. SIL_{CL} označované jako omezení architektury.

□ Soubor norem IEC 61 800-5-2

Nadřazeným předpisem je pro IEC 61 800-5-2 soubor IEC 61 800. Jedná se o soubor norem pro speciální pohony s nastavitelnou rychlostí při vysoce náročném nebo nepřetržitém provozu. Při méně náročném provozu se postupuje podle IEC 61 508.

Jedná se o tzv. normu výrobku určenou k usnadnění realizace E/E/PE systémů souvisejících s bezpečností zavedených v IEC 61 508. Proto pokud u konkrétního PDS dosáhneme shody s touto normou, splníme i všechny požadavky uvedené v tomto nadřazeném předpisu.

Z pohledu požadavků se zde nespécifikují požadavky na:

- analýzu nebezpečí a rizika konkrétní aplikace,
- identifikaci bezpečnostních funkcí pro konkrétní aplikaci,
- počáteční přidělení SIL k bezpečnostním funkcím,
- poháněné zařízení kromě uspořádání rozhraní,
- sekundární nebezpečí,
- části bezpečnosti, které jsou uvedeny v IEC 61 800-5-1 (elektrické, energetické a tepelné),
- výrobní proces,
- validitu signálů a příkazů.

Proto při konkrétní aplikaci nevystačíme pouze s bezpečnostními hledisky uvedenými v IEC 61 800-5-2, ale je nutné orientovat se v problematice komplexně. Je proto nutné do řešení implementovat i požadavky na neřešené fáze, přičemž tento požadavek vyžaduje začlenění dalších předpisů a požadavků. Pohony, pro které je tato norma určena není možné vyčíst z jejího rozsahu platnosti, ale je nutné vyjít z ostatních norem řady IEC 61 800 (technická specifikace řešených pohonů je uvedena např. v IEC 61 800-5-1).

Z pohledu této publikace je důležité omezení PFH maximálně na úroveň SIL3. Posouzení software se provádí podle metodiky uvedené v IEC 61 508-3. IEC 61 800-5-2 zavádí několik bezpečnostních funkcí použitelných v konkrétních aplikacích, a to dle jejich funkce:

- Funkce zastavení:
 - bezpečné vypnutí točivého momentu (STO)
 - bezpečné zastavení 1 (SS1)
 - bezpečné zastavení 2 (SS2)
- Ostatní funkce:
 - bezpečné provozní zastavení (SOS)
 - bezpečné omezené zrychlení (SLA)
 - bezpečný rozsah zrychlení (SAR)
 - bezpečná omezená rychlost (SLS)
 - bezpečný rozsah rychlosti (SSR)
 - bezpečné omezený moment (SLT)
 - bezpečný rozsah momentu (STR)
 - bezpečně omezená poloha (SLP)
 - bezpečně omezený přírůstek (SLI)
 - bezpečný směr (SDI)
 - bezpečná teplota motoru (SMT)
 - bezpečné ovládání brzdy (SBC)
 - bezpečná vačka (SCA)
 - monitor bezpečné rychlosti (SSM).

Vysvětlení jednotlivých funkcí lze nalézt v IEC 61 800-5-2, část 4.2.2. a 4.2.3. Pomocí těchto funkcí je možné pokrýt nepřeborné množství aplikací. Nicméně prakticky neexistuje aplikace, kde by byly použity všechny zde uvedené funkce.

Takové řešení by totiž bylo krajně neekonomické a mnohdy i technicky nerealizovatelné.

Realizace jednotlivých funkcí je zpravidla přímo součástí pohonu. Nicméně existují i součásti řídicích systémů (PLC, DCS), které jsou vybaveny touto funkcí. V takovýchto případech nám postačuje jeden modul např. pro STO k realizaci této funkce u několika pohonů.

12.3. 1.3 Základy konstrukce podle IEC 61508

Pojem funkční bezpečnost byl vysvětlen v předchozím textu. Nyní se pokusme odpovědět na otázky:

- a) Proč je takové konstruování vlastně důležité?
- b) Jak ohodnotit následky selhání obvodů souvisejících s bezpečností následkem nedodržení postupu návrhu podle IEC 61 508?

Odpovědi na tyto otázky je možné získat analýzou dat o skutečných selháních v historii. Zmíníme pouze několik závažných nehod z posledních let.

□ Rafinerie společnosti BP

Místo: BP Texas City

Datum: březen, 2005

Oběti: 15 mrtvých, více jak 170 zraněných

Ekonomika: škoda na majetku vyčíslena na cca 21 milionů dolarů.

Prvotní příčina: vznícení vodíkových par



Obr. 3: Rafinerie BP, Texas City, 2005, Následky havárie v rafinerii společnosti BP.

Zdroj: <http://www.hazards.org/>

Porušení předpisů: Selhání vyhodnocení alarmu a nástrojů pro návrh spolehlivosti a integrity bezpečnostních systémů, nedodržení postupů pro správné stanovení

úrovně SIL. Následkem nedostatečného testování SIF během normálního provozu zařízení. Jako hlavní příčina byla určena nefunkční kultura bezpečnosti provozovatele.

□ Ropná plošina společnosti BP

Místo: Mexický záliv

Datum: duben, 2010

Oběti: 11 nezvěstných/mrtvých (pravděpodobně přímým následkem exploze a následného požáru)

Ekonomika: potopení plošiny, která stála v době uvedení do provozu cca 560 miliónů dolarů, dále pak likvidace následné ekologické havárie jen do konce května 2010 stála společnost BP cca 960 miliónů dolarů. Nicméně celkové náklady na likvidaci této události se odhadují na cca. 3 až 6 miliard dolarů.

Prvotní příčina: doposud neobjasněna



Obr. 4: Ropná plošina, Mexický záliv, 2010 Následky havárie ropné plošiny DeepWaterHorizon. Zdroj: <http://www.hazards.org/>

Porušení předpisů: Selhání systémů, vyloučena není ani chyba operátorů. Požár se velmi rychle vymknul kontrole a následný pokus o uzavření vrtu selhal. Nicméně při návrhu neexistoval předpoklad selhání F&G systému a tím pádem ani alternativní postup uzavření vrtu. Vzhledem k rozsahu havárie a následnému potopení plošiny nebylo vyšetřování doposud uzavřeno. Dá se předpokládat, že příčiny této události se nepodaří objasnit ani v budoucnu.

□ Terminál pro skladování ropy

Datum: prosinec, 2005

Oběti: zraněno více jak 40 osob

Ekonomika: nutná rozsáhlá evakuace (cca 2.000 osob) a omezení pohybu¹ osob v okolí provozu, nutnost na několik dní uzavřít dálnici A414, omezení leteckého provozu na londýnských letištích.

Prvotní příčina: přeplnění zásobníku, následné vznícení vodíkových par



Obr. 5: Sklad ropných produktů, Buncefield, 2005 Následky výbuchu a vznícení zásobníku č. 912, Zdroj: <http://www.hazards.org/>

Porušení předpisů: došlo k přeplnění zásobníku č. 912. Mrak par, který se utvořil z uniklého paliva, zakrátko explodoval za následného vzniku rozsáhlého požáru, při němž bylo zraněno více než 40 osob. Vyšetřování mj. ukázalo, že instalovaný servomechanický hladinoměr indikoval neměnnou polohu hladiny, ačkoliv zásobník byl v té době plněn benzinem. Na zásobníku byl současně nainstalován mechanický detektor horní mezní polohy hladiny, který ale také selhal a nevydal výstražný signál.

Z předchozích příkladů je možné dojít ke dvěma závěrům, přičemž tyto budou tvořit odpovědi na otázky uvedené v úvodu kapitoly. Motivace k bezpečnému návrhu prakticky všech zařízení pramení v ekonomice jejich provozu. Každá událost selhání bezpečnostních systémů, nemusí nutně vést ke katastrofickému scénáři uvedenému výše. Nicméně určitý ekonomický dopad bude přítomný prakticky vždy a v praxi bývá jeho součástí i poškození zdraví osob v krajním případě smrt.

Příklad 1 Koncept rizika

Základní motivace k zavedení tohoto pojmu je uvedena v předchozím textu a tvoří základ celé metodiky uvedené v IEC 61 508. IEC 61 508 je založena na rovnováze

¹Myšleno doporučení provozovatele, nevzcházet, nevětrat apod.

mezi opatřeními zajišťujícími bezpečnost a riziky spojenými s řízeným systémem (EUC) případně se systémem řídicím EUC. Pozice tohoto kroku v celkovém životním cyklu bezpečnosti je na Obr. 12, jako krok č. 3. Celý koncept rizika je možné ve smyslu IEC 61 508 rozdělit na tři části (respektive kroky, fáze návrhu):

- a) určení nebezpečí,
- b) analýza nebezpečí,
- c) ocenění rizika.

Je jasné, že bod a) vyžaduje znalost konkrétního procesu. Pokud se jedná o provozované zařízení, můžeme vyjít ze záznamů nehod na tomto zařízení, popř. ze záznamů obdobného provozovaného zařízení. Dalším zdrojem mohou být záznamy o haváriích spravované organizací obdobné našemu inspektorátu práce.

V případě nového zařízení je nutné sestavit kvalifikovaný řešitelský tým. Kvalita tohoto týmu je pak určující pro kvalitu provedené analýzy. Je nutné vzít v úvahu jednak nebezpečí, která vznikají přímo procesem EUC, nebo jeho řízením. Tak i nebezpečí, která mohou vzniknout jak důsledek selhání lidského činitele a bývají označována jako předvídatelné nesprávné použití. Řešitelský tým proto musí mít prokazatelné zkušenosti s vyhledáváním a analýzou provozních/neprovozních stavů celého systému a měl by být tvořen nejen inženýry, ale i osobami odpovědnými za provoz zařízení.

Celý krok určení nebezpečí je nutné provést pro všechny životní fáze systému/zařízení, jakožto i pro všechny jeho provozní stavy. Berou se zde v úvahu životní fáze, jako jsou koncept, návrh, ověření, výroba, skladování, transport, apod. Mezi provozní stavy můžeme zařadit provoz, seřizování, údržbu, apod. Rozsah této problematiky je proto opravdu značný a zdaleka přesahuje rozsah této publikace. Zde je dobré připomenout, že ani vynikající teoretická znalost problematiky nestačí k provedení této studie. Je nutné vzít v úvahu i technologickou část konkrétního procesu a další specifika, která není jednotlivec, ač dobře teoreticky vybavený schopen postihnout.

Jakmile jsou určena všechna nebezpečí, je nutné ocenit jejich četnost, závažnost, následky, apod. Tímto krokem se zabývá analýza rizika, která úzce souvisí s následujícím krokem představujícím ocenění tohoto rizika.

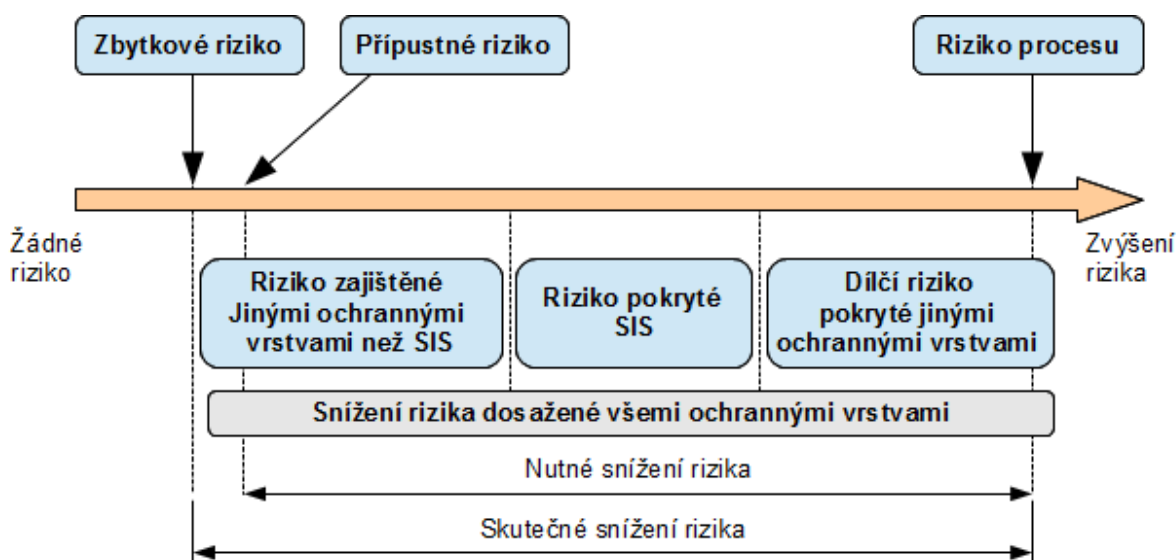
Příklad 2 Analýza a ocenění rizik

Z pohledu požadavků bude tato problematika rozebrána v následujícím textu. Zde pouze uvedeme některé nejdůležitější pojmy. Pro pochopení vlivu jednotlivých postupů k pokrytí rizika může být vhodnou pomůckou jednak Obr. 6, tak i Obr. 7. Nicméně je nutné respektovat skutečnost, že Obr. 6, je vytvořen jako obecné pojetí rizika.

Pro konkrétní aplikaci je nutná jeho modifikace do podoby odpovídající této konkrétní aplikaci. Pro ocenění rizik jsou využívány následující pojmy:

- **Riziko EUC** při určování tohoto rizika se nepočítá s žádnými stanovenými bezpečnostními ochrannými vlastnostmi. Tedy toto riziko je tvořeno přímo vlastností procesu (například nebezpečí exploze tlakové nádoby);
- **Přípustné riziko** je závislé na mnoha činitelích zmíněných v předchozím textu. Při jeho určení je nutné vzít v úvahu několik vstupů, mezi které patří:
 - pokyny příslušného bezpečnostního regulačního orgánu,

- jednání, jakožto i dohody se všemi zainteresovanými stranami,
 - normy a metodické pokyny, platné pro konkrétní aplikaci,
 - nejlepší názory od průmyslových, expertních a vědeckých pracovních skupin, komisí, apod.,
 - právní požadavky platné pro konkrétní aplikaci;
- **Nutné snížení rizika**, je takové snížení rizika, kterého se musí dosáhnout, pro dosažení tzv. přijatelného rizika v konkrétní aplikaci (při dodržení požadavků plynoucích z této aplikace). Jeho velikost závisí na mnoha činitelích (např. vážnost zranění, počtu osob vystavených nebezpečí, doba trvání expozice osob, apod.). Důležité je do této hodnoty zahrnout i subjektivní vnímání a postoje osob, které jsou danému nebezpečí vystaveny;
 - **Zbytkové riziko**, je hodnota rizika po aplikaci bezpečnostních opatření (tedy provedení snížení). Důležité je zde upozornit na skutečnost, že toto riziko není nulové. Nicméně jeho hodnota je již pro další snižování neúměrná vynaloženým nákladům.



Obr. 6: Koncept snížení rizika podle IEC 61508

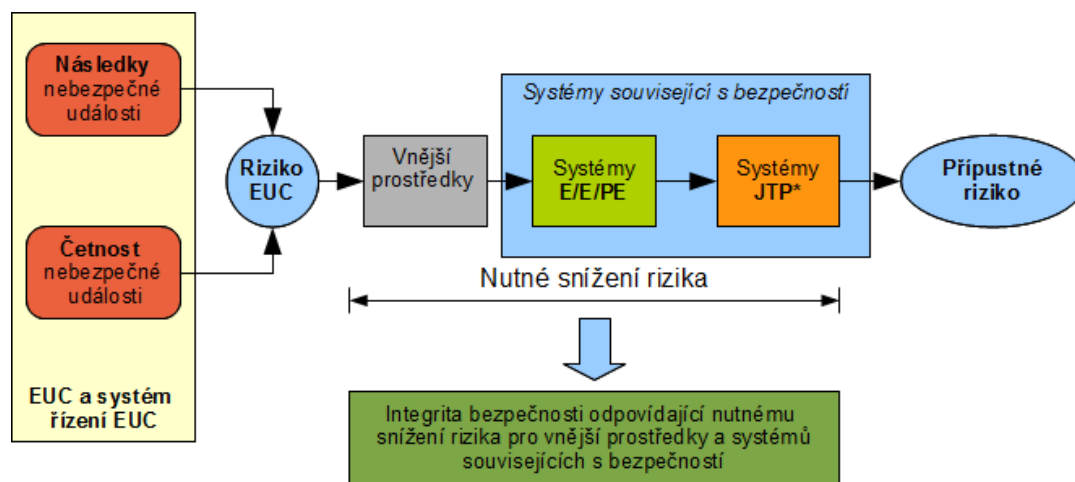
Pro následující text je nutné vymezit rozdíl mezi rizikem a integritou bezpečnosti. Zatímco riziko je míra pravděpodobnosti a následek výskytu nebezpečné události, které lze ohodnotit. Ve své podstatě tvoří vstupní bloky na Obr. 7, kde je vyjádřeno pomocí následků a četnosti jeho výskytu.

Integrita bezpečnosti se používá pouze u systémů souvisejících s bezpečností (souhrnně označeny na Obr. 7) a vnějších prostředků ke snížení rizika (opět označeno na Obr. 7). Integrita bezpečnosti je definována jako pravděpodobnost těchto systémů uspokojivě plnit svoji funkci, jež spočívá v zajištění nutného snížení rizika. Na Obr. 7 je zřejmé, že tak může být dosaženo libovolnou kombinací těchto systémů, jakožto i rozdílnou měrou příspěvku jednotlivých systémů k celkovému nutnému snížení rizika. Samozřejmě celkový koncept této redukce musí být v souladu s požadavky IEC 61 508. Celková integrita bezpečnosti je tvořena dvěmi hlavními prvky:

- První částí CIB je tvořena náhodnými poruchami HW. Jedná se vlastně o problematiku řešenou v IEC 61 508-2 a je důležité si uvědomit význam slova

náhodné. Ve své podstatě je pravděpodobnost náhodné poruchy HW poměrně dobře zmapována. Existují dostatečně robustní nástroje a metody k její predikci a praxe ověřila, že predikované hodnoty se blíží hodnotám skutečným.

- Druhou částí CIB jsou systematické poruchy týkající se HW. Systematické poruchy je obtížnější predikovat a jsou zatíženy velkou nejistotou (tato nejistota je tvořena hlavně těžko předvídatelným rozložením poruch této funkce). Vzhledem k tomu, že poruchy SW patří mezi systematické je tato část CIB řešena hlavně v IEC 61508-3.



*Systémy založené na jiných technických principech než je E/E/PE

Obr. 7: Pojetí rizika v kontextu integrity bezpečnosti

Příklad 3 Přiřazení úrovně integrity bezpečnosti

Hlavním cílem analýzy nebezpečí a rizik je přiřazení úrovně integrity bezpečnosti k jednotlivým bezpečnostním funkcím. Toto přiřazení se provádí na základě požadavku na nutné snížení rizika (viz Obr. 7). Způsobů jak toto přiřazení provést je mnoho, ale ve své podstatě lze rozdělit na kvalitativní a kvantitativní. Vhodnost pro konkrétní aplikaci závisí zejména na vstupních údajích (respektive zda je snížení rizika stanoveno explicitně v číselné hodnotě, nebo kvalitativně).

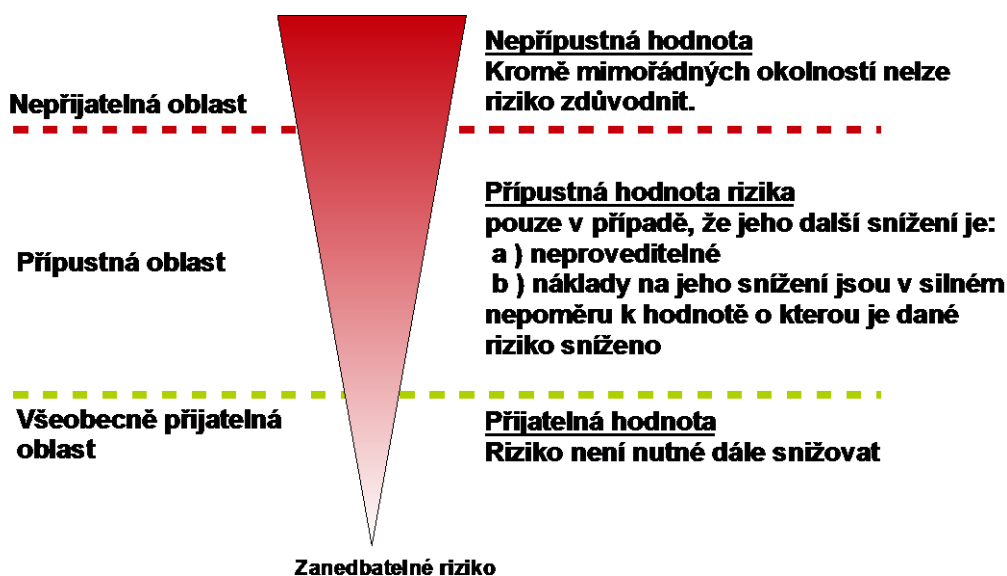
V následujícím textu uvedeme obě metody postupu, tedy jak kvalitativní tak kvantitativní. Obě metody spojuje potřeba stanovit tzv. přípustné riziko. Možností jak toho dosáhnout je celá řada, ale IEC 61 508 přibližuje pouze jednu z nich a to ALARP. Celý koncept ALARP pochází z Velké Británie, kde byl navržen pro hodnocení nejzávažnějších průmyslových havárií. První oblastí jeho nasazení byla jaderná energetika, další oblasti následovali hlavně se zavedením IEC 61 508. Princip této metody není nikterak vyčerpávající spíše naopak.

V IEC 61 508-5, Příloha A jsou uvedeny hlavní zkoušky používané při řízení průmyslových rizik. Mezi základní činnosti používané při tomto řízení patří stanovení zda:

- dané riziko je tak velké, že není možné jeho odůvodnění (přijetí)
- dané riziko je tak malé, že jeho hodnota je bezvýznamná

c) riziko je někde mezi body a) a b).

Tyto tři body pak tvoří základ konceptu ALARP, který je uvedený na Obr. 8. Z tohoto obrázku je patrné, že nad určitou hodnotou se považuje riziko za nepřijatelné (nepřijatelná oblast). Pokud takovéto riziko existuje, je nutné jeho snížení na hodnotu přípustnou, nebo všeobecně přijatelnou. Primárním cílem by měla zůstat snaha odstranit nebezpečí, které toto riziko způsobuje.



Obr. 8: Koncept ALARP a přípustné riziko

Pod nepřijatelnou oblastí se nachází oblast přijatelného rizika. V této oblasti je požadováno snížení rizika pouze v případě, kdy je to rozumně proveditelné. Pod pojmem rozumně proveditelné je zde myšleno snížení hodnoty rizika s ohledem na vynaložené náklady. Cílem tohoto snížení je dosažení úrovně označované v literatuře jako „nejnižší rozumně možná“. Poslední úroveň na Obr. 8 je oblast všeobecně přijatelného rizika. Pokud se analyzované riziko nachází v této oblasti, není nutné jeho další snížení. Nicméně je nutné přijmout opatření s cílem udržení rizika v této oblasti.

Obecnou metodou² dosažení cíle přípustného rizika, je stanovení určitého počtu následků, jimž se přiřadí akceptovatelné četnosti jejich výskytu. Toto přiřazení by mělo mít podobu diskuze a dohod mezi zainteresovanými stranami. IEC 61508-5 navrhuje jeden z možných postupů založený na tzv. třídách rizika podle Tab. 3. Nicméně obsahem normy je přímý požadavek na sestavení individuální tabulky pro každou aplikační oblast, proto je nutné tento případ chápat pouze jako inspiraci nikoliv návod na konkrétní postup. Popis jednotlivých tříd použitých v Tab. 3, je pak uveden v Tab. 4.

² jedná se pouze o jednu z možných

Četnost	Následek			
	Katastrofální	Kritický	Nepodstatný	Zanedbatelný
Častá	1	1	1	2
Pravděpodobná	1	1	2	3
Příležitostná	1	2	3	3
Málo častá	2	3	3	4
Nepravděpodobná	3	3	4	4
Neuvěřitelná	4	4	4	4

Tab. 3: Příklad klasifikace rizika nebezpečí

Třída rizika	Popis rizika
1	Nepřípustné riziko
2	Nežádoucí riziko, přípustné pouze v případě, že snížení rizika je neproveditelné nebo v případě, že náklady jsou výrazně neúměrné dosaženému zlepšení
3	Přípustné riziko v případě, že náklady na snížení rizika by přesáhly dosažené zlepšení
4	Zanedbatelné riziko

Tab. 4: Modelový výklad tříd rizika použitých v Tab. 3

Příklad 4 Diagram rizika pro stanovení úrovně integrity bezpečnosti

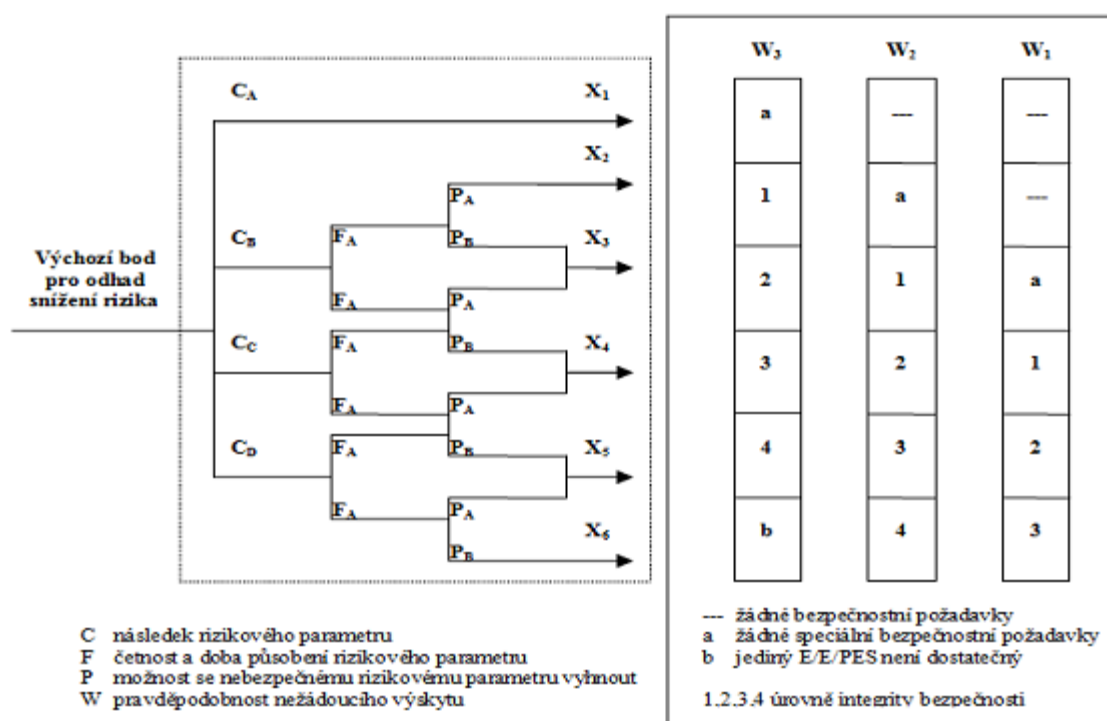
V případě diagramu rizik se jedná o kvalitativní metodu hodnocení závažnosti selhání, nebo nedostupnosti systémů souvisejících s bezpečností. Jedná se o plně grafickou metodu založenou na vytvoření charakteristických parametrů každé nebezpečné události. Pro sestavení diagramu rizik je proto nutné vytvořit tabulku obsahující klíčové parametry. Mezi tyto parametry mohou patřit například: následek, četnost a doba vystavení, možnost vyvarovat se nebezpečné události, pravděpodobnost nežádoucího výskytu, apod. Následně se sestaví diagram obdobný diagramu na Obr. 9.

Parametr rizika	Klasifikace	
Následek	C ₁	Menší zranění
	C ₂	Zranění jedné nebo více osob s trvalými následky, smrt jedné osoby
	C ₃	Smrt několika osob
	C ₄	Smrt velkého počtu osob
Četnost a doba vystavení v nebezpečné oblasti	F ₁	Vzácné až častější vystavení v nebezpečné oblasti
	F ₂	Časté až trvalé vystavení v nebezpečné oblasti
Možnost vyhnutí se nebezpečné události	P ₁	Možné za určitých podmínek
	P ₂	Téměř nemožné
Pravděpodobnost nežádoucího výskytu	W ₁	Velmi malá pravděpodobnost
	W ₂	Malá pravděpodobnost
	W ₃	Poměrně vysoká pravděpodobnost

Tab. 5: Ukázka možné klasifikace parametrů pro diagram rizika

Pro Obr. 9 opět platí, že se jedná pouze o ilustrační příklad toho, jak by takový diagram mohl vypadat. Konkrétní podoba musí odpovídat požadavkům aplikace jakožto i požadavkům respektujícím oblast nasazení analyzovaného systému.

Použití parametrů podle Tab. 5 vede v Obr. 9 na několik výstupů označených $x_1 \dots x_n$. Každý z těchto výstupů je pak namapován do oblastí W_1 , W_2 , nebo W_3 . Každý stupeň těchto úrovní pak vyjadřuje požadovanou integritu bezpečnosti, kterou musí navrhovaný systém splnit. Tento přístup je použitý proto, aby ke snížení rizika bylo možné použít i jiná opatření než jsou systémy E/E/PE. Stupnice W_3 pak udává minimální přínos ke snížení rizika zajišťované jinými opatřeními než E/E/PE. Stupnice W_2 představuje střední přínos a W_1 maximální přínos těchto opatření. Výstupem tohoto diagramu je tedy nutný požadavek na snížení rizika v podobě úrovně integrity bezpečnosti, ale i závazek požadavku snížení rizika jinými opatřeními než jsou systémy související s bezpečností.



Obr. 9: Diagram rizika v obecné podobě (převzato z IEC 61 508-5)

Příklad 5 Kvantitativní metoda určení úrovně integrity bezpečnosti

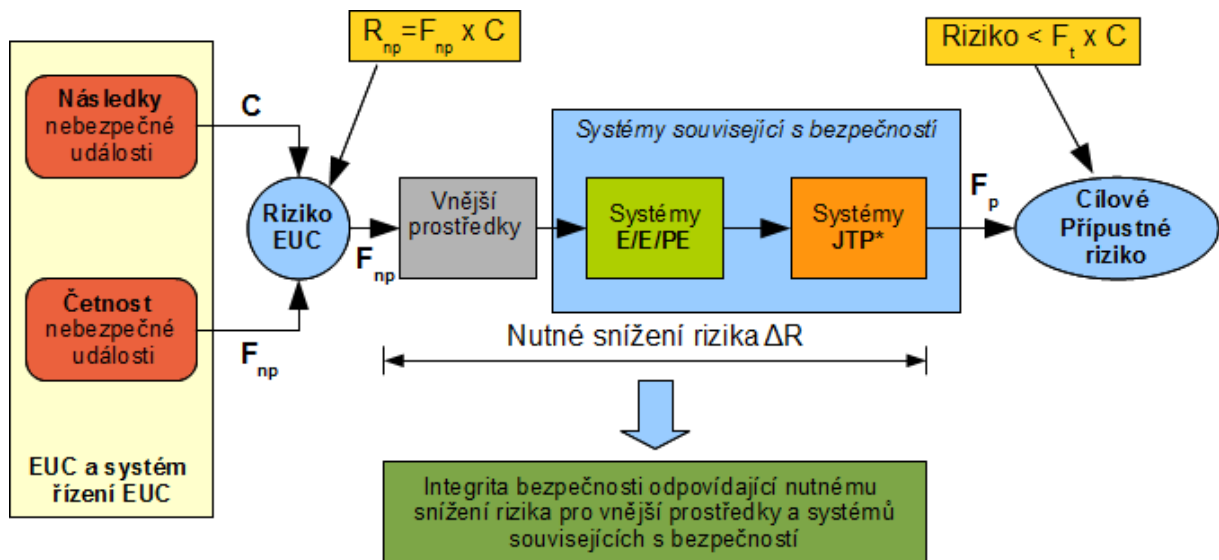
Jak bylo uvedeno v předchozím textu, jedná se o metodu založenou na konkrétních číselných parametrech. Nutným předpokladem použití tedy je, že jsou tato data k dispozici. Obecně platí, že kvantitativní metoda dává konkrétní hodnotu v případě když:

- chceme stanovit přípustné riziko v číselném vyjádření,
- již byly stanoveny číselné cíle úrovně integrity.

Následující metoda je založena na modifikaci modelu z Obr. 7 do podoby modelu schematicky zachyceného na Obr. 10.

Celá metoda je založena na postupu v následujících krocích:

- určení přípustného rizika z tabulky (podobné např. Tab. 3),
- určení rizika EUC,
- určení nutného snížení rizika pro dosažení cílového rizika,
- přiřazení příslušného podílu na snížení rizika systémům E/E/PE, systémům založených na jiných technických principech a vnějším prostředkům ke snížení rizika.



*Systémy založené na jiných technických principech než je E/E/PE

Obr. 10: Princip kvantitativního přiřazení úrovně integrity bezpečnosti systémům

Princip celé metody lze nejlépe demonstrovat na jednoduchém příkladu. Uvažme, že pro přípustné riziko jsme sestavili tabulku obdobnou Tab. 3. Na Obr. 10 jsou označeny následující údaje:

- C je následek nebezpečné události;
- F_{np} je četnost vyžádání ochranného systému (tedy četnost nebezpečné události);
- F_t je četnost přípustného rizika;
- F_p je četnost rizika po realizaci ochranných opatření,
- $R_{np} = F_{np} \times C$, je riziko procesu
- $R_t = F_t \times C$ je riziko po aplikaci ochranných opatření.

Nyní uvážíme situaci, že následek nebezpečné události C zůstane konstantní a ochranné opatření budeme realizovat pomocí jediného systému (E/E/PE, nebo systému založeného na jiném technickém principu, nebo vnějšími prostředky). V takovémto případě mohou nastat tři situace podle vztahu (1.1). V prvním případě je riziko EUC nepřijatelné a je nutné jeho snížení o ΔR (podle Obr. 10). Ve druhém případě je riziko vytvořené EUC menší než přijatelné a proto jej není třeba dále snižovat. Ve třetím případě jsme na hranici mezi přijatelností a nepřijatelností a bylo by vhodné provést důkladnější analýzu.

$$\begin{aligned}
 F_{np} \times C > F_t \times C &\Leftrightarrow F_{np} > F_t \\
 F_{np} \times C < F_t \times C &\Leftrightarrow F_{np} < F_t \\
 F_{np} \times C = F_t \times C &\Leftrightarrow F_{np} = F_t
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

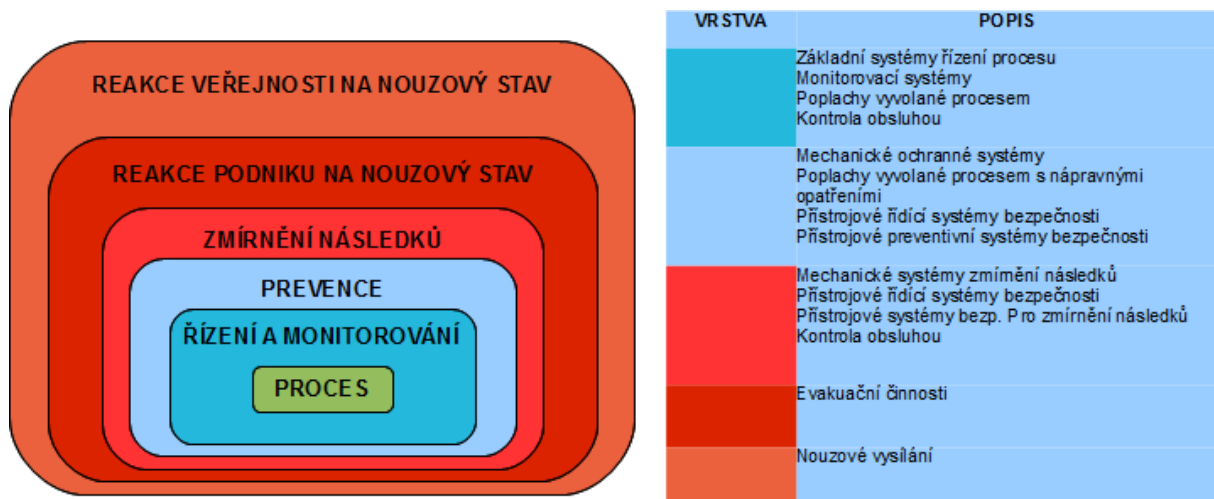
Pokud zanedbáme stavy dva a tři (jedná se o stavy popsané nerovnostmi) stačí vyřešit první stav. Pokud si uvědomíme, že F_p a F_{np} jsou četnosti a připomeneme si definici pravděpodobnosti selhání na vyžádání PFD je možné upravit vztah (1.1) na vztah (1.2)

$$PFD_{avg} = \frac{F_t}{F_{np}} = \Delta R
 \tag{1.2}$$

Pokud získáme konkrétní hodnotu PFD_{avg} můžeme pak pomocí Tabulky 2 v [1] určit konkrétní požadavek na SIL. Jediným nutným předpokladem je určení režimu provozu (nepřetržitý znamená v [1], tabulku 3 a nízký tabulku 2).

Příklad 6 Princip ochranných vrstev

Ochranné vrstvy tvoří jakousi nadstavbu použití E/E/PE systémů a systémů založených na jiných technických principech. V praxi existují závažné havárie, u kterých by bylo neekonomické a zároveň nevěrohodné dosahovat požadovaného snížení rizika pouze technickými systémy. V takovýchto případech je pak nutné použít metodu ochranných vrstev. Jedná se o přístup, který není zaveden přímo v IEC 61508, ale v oborové implementaci IEC 61 511. V následujícím textu budeme tento princip snížení rizika nazývat tzv. vnějšími prostředky ke snížení rizika. Princip metody je dobře vidět na imaginárním modelu uvedeném na Obr. 11. Zde jsou také uvedeny příklady některých vnějších prostředků ke snížení rizika v konkrétní vrstvě. Podrobnější popis této metody je uveden v IEC 61 511 a může být omezen platnou legislativou, případně souvisejícími závaznými dokumenty.



Obr. 11: Princip ochranných vrstev podle IEC 61 511.



Shrnutí pojmů

- ✓ bezpečnostní funkce,
- ✓ pasivní bezpečnostní systémy,
- ✓ aktivní bezpečnostní systémy,
- ✓ riziko EUC,
- ✓ přípustné riziko,
- ✓ nutné snížení rizika,
- ✓ zbytkové riziko



Otázky

- 1) Uveďte alespoň jedno opatření, které patří a jedno, které nepatří do tzv. funkční bezpečnosti.
- 2) Vyjmenujte alespoň tři oborové implementace IEC 61 508. Kterých oblastí se týkají?
- 3) Uveďte alespoň jednu závažnou průmyslovou havárii z posledních let. Pokuste se analyticky popsat, jak ní došlo a zda by bylo možné se jí vyhnout.
- 4) Pokuste se na imaginárních příkladech objasnit volbu konkrétní oborové implementace IEC 61 508.
- 5) Jaký je rozdíl mezi rizikem a nebezpečím?
- 6) Uveďte hlavní kroky analýzy rizik a nebezpečí.
- 7) Vysvětlete metodu hodnocení přijatelnosti rizika ALARP. Její použití demonstруйте na libovolném příkladu.
- 8) Vysvětlete kvantitativní a kvalitativní metody hodnocení rizika. Jaké jsou jejich omezení?
- 9) Jaké je základní rozdělení metod používaných k hodnocení rizik?



Další zdroje

Sobory norem:

- IEC 61 508,
- IEC 61 511,
- IEC 61 800,
- IEC 62 061.

13 Životní cyklus bezpečnosti a jeho fáze



Čas ke studiu: 6 hodin



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- Definovat jednotlivé fáze životního cyklu celkové bezpečnosti
- Definovat požadavky na hardware a software v rámci celkového cyklu bezpečnosti
- Popsat jednotlivé systémy související s bezpečností
- Popsat cíle jednotlivých fází celkového životního cyklu bezpečnosti



Výklad

13.1. 2.1 Životní cyklus bezpečnosti

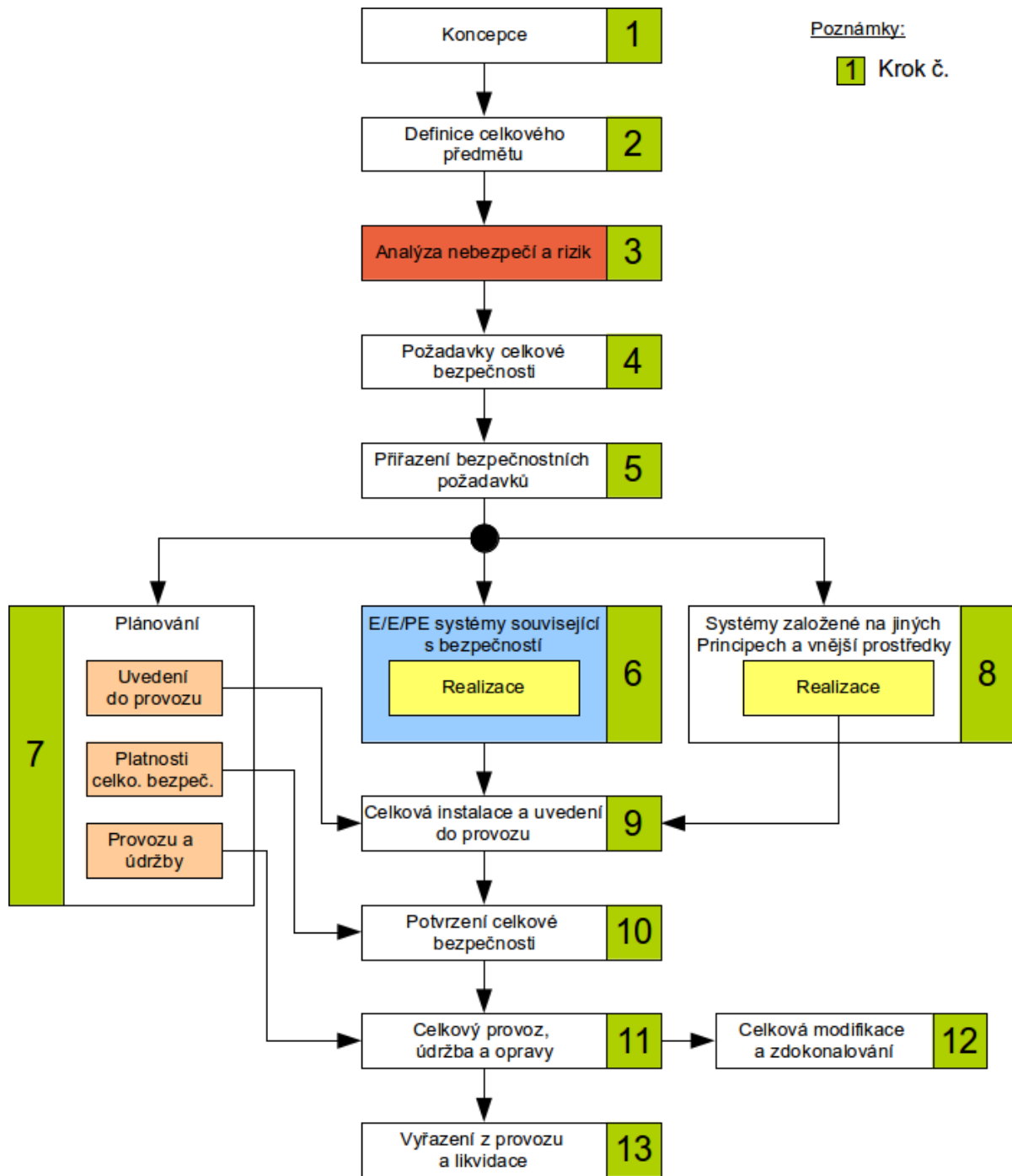
Motivace k zavedení pojmu životní cyklus celkové bezpečnosti do souboru IEC 61 508 vyplývá z komplexního přístupu, který tento standard zavádí. Tvoří určitou analogii s mnoha podobnými obory, příkladem může být řízení kvality na základě souboru ISO. Hlavním cílem tohoto komplexního přístupu je nedat prostor k chybám jak už lidským, tak technickým. Obecně je známo, že pro to, aby mohl být jakýkoliv problém efektivně řešen, je nutné mít informace o tom:

- co je cílem a jak ho dosáhneme
- jak zjistíme, resp. ověříme dosažení těchto cílů.

Jako doplňující otázky si pak lze klást otázky typu:

- kdy bude dosaženo jednotlivých cílů
- kdo bude nést zodpovědnost a rozhodovat v jednotlivých bodech realizace, apod.

Pokud řešíme, tak sofistikovaný problém, kterým bezpečnostní systémy bezesporu jsou, nevystačíme s takovouto obecnou definicí a bude nutné definovat daleko komplexnější přístup založený na současné úrovni poznání, zkušenostech a požadavcích. Proto se budeme v následující části věnovat stanovení, resp. návrhu tzv. životního cyklu celkové bezpečnosti systémů. V IEC 61 508 jsou stanoveny jak cíle, tak i požadavky na takový cyklus. Zároveň norma připouští provedení odlišné od uvedeného příkladu, v takovém případě je ale nutné obhájit jeho vhodnost, pro konkrétní aplikaci. Přičemž je nutné bezvýhradně dodržet veškeré požadavky jednotlivých bodů.



Obr. 12: Životní cyklus celkové bezpečnosti dle IEC 61 508

Základní životní cyklus uvedený v IEC 61 508 je ve zjednodušené formě na Obr. 12. Tento životní cyklus se zavádí jako určitý technický rámec pro systematické zajišťování všech činností, jejichž provedení je nezbytně nutné k dosažení požadované úrovně integrity. Celý cyklus v sobě zahrnuje opatření ke snížení rizika v podobě:

- a) E/E/PES systémů souvisejících s bezpečností,
- b) systémy založené na jiných technických principech,
- c) vnější prostředky (v předchozím textu definované jako součást ochranných vrstev).

Životní cyklus bezpečnosti E/E/PES, tvoří určitý technický rámec pro IEC 61 508-2. Oproti tomu životní cyklus bezpečnosti software¹ je technickým rámcem IEC 61 508-3.

Na Obr. 12 jsou vynechány činnosti týkající se managementu funkční bezpečnosti, ověřování a odhadu, důvodem je snížení složitosti schématu, avšak tyto činnosti je třeba použít tam, kde jsou vyžadovány. Tyto části musí být řešeny paralelně s jednotlivými fázemi. Fáze uvedené v předchozím textu jako bod b) je možné dále rozdělit na technické a vnější prostředky ke snížení rizika. Nicméně v následujícím textu je budeme označovat souhrnně jako systémy založené na jiných technických principech. Tyto části nejsou přímo předmětem IEC 61 508, ale mohou být řešeny konkrétní oborovou implementací této normy, případně mohou být určeny legislativními požadavky konkrétní aplikace. Jedná se vlastně o ochranné vrstvy definované v předchozí kapitole.

Vhodnou pomůckou při návrhu životního cyklu konkrétní aplikace je tabulkové zpracování nejdůležitějších činností spadajících pod konkrétní krok na Obr. 12. Toto tabulkové zpracování musí pro každý krok životního cyklu celkové bezpečnosti obsahovat:

- informace o cíli konkrétní činnosti (resp. kroku),
- informace o tom, co je předmětem daného kroku (co bude v tomto kroku řešeno,
- odkaz na články IEC 61 508, které obsahují konkrétní požadavky na konkrétní činnost³,
- vstupy potřebné k provedení příslušné činnosti,
- výstupy konkrétní činnosti.

V následujícím textu budou popsány cíle a požadavky na jednotlivé činnosti (fáze životního cyklu) uvedené na Obr. 12. Jednotlivé fáze budeme označovat zkratkou LCx, kde x bude představovat číslo konkrétní fáze.

13.2. 2.2 Fáze životního cyklu funkční bezpečnosti

□ Koncept (LC1 - krok č. 1 na Obr. 12)

Cílem tohoto kroku je zvýšení úrovně pochopení EUC a prostředí jeho aplikace, tak aby byla možná správná realizace navazujících kroků. K realizaci tohoto bodu je nutné:

- získat důkladné znalosti o EUC a jeho požadovaných řídicích funkcích, jakožto i znalosti o fyzickém prostředí, kterými se realizuje EUC;
- stanovit potencionální zdroje nebezpečí a získat informace o jejich povaze (toxicita, nebezpečí výbuchu, apod.);
- získat informace o legislativním rámci, souvisejícím s celým systémem E/E/PES;
- vzít v úvahu nebezpečí, která mohou vzniknout interakcí mezi řešeným EUC a ostatními EUC (instalovanými, nebo plánovanými);
- vést u všech uvedených činností dokumentací v rozsahu a smyslu podle konkrétní aplikace. Příkladem může být příloha A, IEC 61 508-1.

³Zde je patrná analogie, uvedená v předchozím textu, že pokud navrhujeme vlastní cyklus celkové bezpečnosti, musíme splnit všechny body životního cyklu uvedené v IEC 61508. Tento bod tedy vede na snadné ověřování i individuálně navržených životních cyklů celkové bezpečnosti.

□ Definice celkového předmětu (LC2 - krok č. 2 na Obr. 12)

Cílem tohoto kroku je zejména vymezení hranic EUC a stanovení předmětu analýzy nebezpečí a rizik. Požadavky zahrnují zejména:

- stanovení vnějších událostí, se kterými je třeba počítat v analýze nebezpečí a rizik (tedy v následujícím bodě);
- určení dílčích systémů, které mohou mít souvislost s nebezpečími zjištěnými v předchozím bodě;
- určení typů událostí, se kterými je třeba počítat (poruchy součástí, vady procedur, lidské chyby, mechanismus závislých poruch, apod.).

□ Analýza nebezpečí a rizik (LC3 - krok č. 3 na Obr. 12)

Hlavní náplní tohoto kroku je určení nebezpečí a nebezpečných událostí, jejichž zdrojem je EUC. Toto určení je nutné provést ve všech režimech provozu za všech rozumně předvídatelných poruchových podmínek, včetně předvídatelných podmínek nesprávného použití. Při tomto určení se musí vzít v úvahu sled událostí vedoucí k nebezpečným událostem z předchozího textu. Zároveň je nutné určit rizika EUC, které mohou být spojeny s těmito nebezpečnými událostmi. Mezi nezbytné činnosti v rámci tohoto kroku patří:

- a) provedení analýzy nebezpečí a rizik na základě informací získaných v části definice celkového předmětu;
- b) zvážení možnosti odstranění každého nebezpečí;
- c) určení nejen nebezpečné události, ale i sledů událostí vedoucích k tomuto stavu (zejména není-li možné některé s těchto událostí odstranit změnou návrhu procesu, případně použitého zařízení);
- d) vyhodnotit pro každou událost stanovenou v předcházejících bodech pravděpodobnost jejího vzniku. Pro splnění těchto požadavků je možné použít kvalitativních, nebo kvantitativních technik uvedených v ČSN EN 61508-5, případně v části ČSN EN 61508-7.

Pokud dojde ve výše uvedených krocích b) až d) k rozhodnutím, která mohou mít vliv na výsledek této analýzy, je nutné provést novou analýzu při zohlednění těchto skutečností.

□ Požadavky celkové bezpečnosti (LC4 - krok č. 4 na Obr. 12)

V rámci této fáze dochází ke specifikaci celkové bezpečnosti z pohledu požadavků na E/E/PE systémů souvisejících s bezpečností a systémů založených na jiných technických principech. Postup této specifikace je následující:

- určíme pro každé nebezpečí definované v předchozích krocích bezpečnostní funkci/e (jsou-li vyžadovány),
- stanovíme pro definované nebezpečné události nutné snížení rizika,
- použijeme přednostně oborové normy, a to v případech, kdy existují oborové implementace IEC 61 508 obsahující vhodné postupy pro přímé určení požadovaného nutného snížení rizika.

Pokud poruchy systému řízení EUC vyžadují, zásah jednoho, nebo několika systémů E/E/PES jakožto i jednoho, nebo několika systémů založených na jiných technických principech, je nutné zahrnout následující doplňující požadavky:

- intenzita nebezpečných poruch systému EUC musí být podložena daty získanými na základě skutečných provozních zkušeností s tímto systémem, nebo analýzou bezporuchovosti, případně jako data z průmyslové databáze bezporuchovosti;
- intenzita nebezpečných poruch, pro systém EUC nesmí být nižší než 10-5 poruch za hodinu;
- určit všechny rozumně předvídatelné režimy, při kterých může dojít k nebezpečné poruše EUC a tyto režimy zapracovat do požadavků na celkovou bezpečnost;
- systém EUC musí být, nezávislí na všech systémech realizovaných za účelem snížení celkového rizika procesu (myšleno systémy E/E/PES a systémy založené na jiných technických principech);
- v odůvodněných případech kdy není možné splnit výše uvedené požadavky na EUC je nutné tento systém řešit jako související s bezpečností (tedy jako E/E/PES);
- pro každou bezpečnostní funkci definovanou v souladu s předcházejícími body musí být specifikován požadavek na nutné snížení rizika.

□ **Přiřazení bezpečnostních požadavků (LC5 - krok č. 5 na Obr. 12)**

Tato fáze úzce navazuje na informace definované v předchozích krocích. Tvoří, tak základní rámec návrhu systémů souvisejících s bezpečností a to jak systému E/E/PES, tak i systémů založených na jiných technických principech. Hlavním cílem tohoto kroku je přiřazení úrovně integrity ke každé bezpečnostní funkci. Z pohledu požadavků je nutné v této fázi definovat systémy potřebné pro dosažení požadované úrovně funkční bezpečnosti. Nutného snížení rizika je pak možné dosáhnout:

- pomocí vnějších prostředků pro snížení rizika;
- pomocí systémů E/E/PE souvisejících s bezpečností;
- pomocí systémů založených na jiných technických principech.

Při přiřazování bezpečnostní funkce systémům E/E/PES, jakožto i systémů založených na jiných technických principech je nutno vzít v úvahu prostředky a kvalifikace, dostupné během fáze celkového cyklu bezpečnosti. Ke každé bezpečnostní funkci přiřadit navrhovaným systémům jednotlivé parametry a to tak, aby bylo dosaženo nutného snížení rizika. V případech, kdy dojde ke změnám vstupních parametrů je nutné opětovné provedení přiřazení s informacemi, které toto přiřazení vyvolaly.

Požadavky integrity bezpečnosti se musí posoudit, tak aby se stanovily klíčové parametry cílové integrity bezpečnosti. Tyto parametry musí být:

- střední pravděpodobnost poruchy plnit svoji funkci na vyžádání, označovaná jako PFD (tedy bezpečnostní funkce je v režimu s nízkým vyžádáním),
- pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu, označována jako PFH (bezpečnostní funkce je v režimu s vysokým, nebo nepřetržitým vyžádáním).

Je nutné zvážit možnosti společných poruch, pokud je ke snížení rizika uvažováno s kombinací E/E/PES a systémů založených na jiných technických principech, je nutné pro splnění požadavků:

- dosáhnout funkční odlišnosti těchto systémů,
- systémy musí být založeny na odlišných technikách,
- nesmí sdílet společné části (jak příklad můžeme uvést napájecí zdroje, apod.),
- nesmí mít společné provozní, údržbové, nebo zkušební postupy,
- musí být fyzicky oddělené.

Úroveň integrity bezpečnosti	Režim provozu s nízkým vyžádáním Střední pravděpodobnost poruchy plnit svou navrženou funkci na vyžádání
4	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4} < 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3} < 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2} < 10^{-1}$

Tab. 6: Střední pravděpodobnost poruchy na vyžádání, pro úroveň integrity bezpečnosti (režim s nízkým vyžádáním).

Pokud nelze splnit všechny požadavky předcházejícího bodu, není možné takovéto systémy považovat za nezávislé. Pouze v případě, že existuje dostatečně věrohodná analýza, která prokáže nezávislost těchto systémů, je možné je za nezávislé považovat. Na základě přiřazení klíčových parametrů je možné provést přiřazení cílové integrity bezpečnosti pomocí Tab. 6, pro režim s nízkým vyžádáním, nebo použitím Tab. 7, pro režim s vysokým respektive nepřetržitým vyžádáním.

Pokud nelze u systémů E/E/PES souvisejících s bezpečností a systémů založených na jiných technických principech prokázat dostatečně nezávislé provedení je nutné pro přiřazení použít nejnepříznivější stanovenou hodnotu integrity bezpečnosti. V případě použití úroveň integrity 4, je nutné přijmout doplňující požadavky (viz [1], 7.6.2.11).

Žádnému systému souvisejícímu s bezpečností (tedy jak E/E/PE, tak i systémů založených na jiných technických principech) nesmí být přiřazena cílová úroveň integrity nižší než hodnota uvedená v Tab. 6, nebo Tab. 7 (opět podle režimu vyžádání, viz předchozí body).

Úroveň integrity bezpečnosti	Režim provozu s vysokým, nebo nepřetržitým vyžádáním Střední pravděpodobnost poruchy plnit svou navrženou funkci na vyžádání
4	$\geq 10^{-9} < 10^{-8}$
3	$\geq 10^{-8} < 10^{-7}$
2	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
1	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$

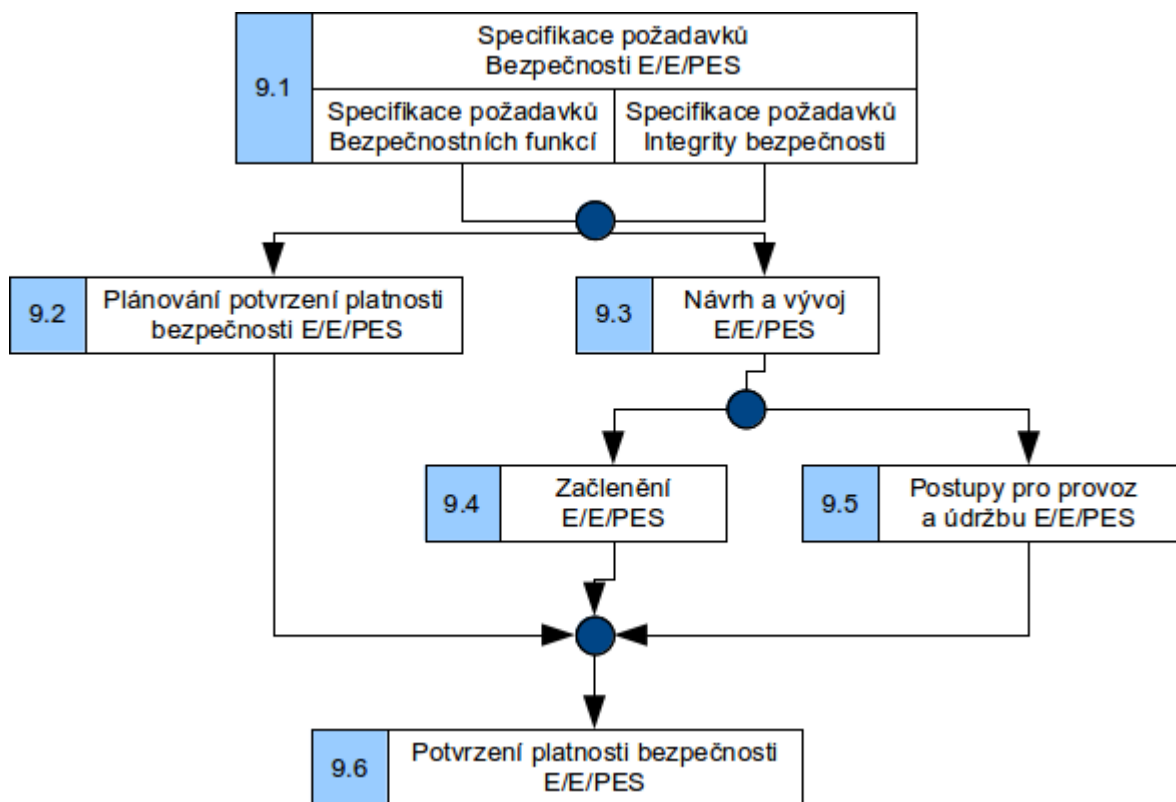
Tab. 7: Střední pravděpodobnost poruchy na vyžádání, pro úroveň integrity bezpečnosti (režim s vysokým/nepřetržitým vyžádáním).

□ Realizace systémů E/E/PES (LC6 – krok č. 6 na Obr. 12)

Detailní požadavky této fáze jsou specifikovány v IEC 61 508-2 (hardware) a IEC 61 508-3 (software). Souvislost respektive návaznost cyklu celkové bezpečnosti (krok 6/realizace, na Obr. 12) na životním cyklu E/E/PE systémů souvisejících s

bezpečností je uvedena na Obr. 13, ze kterého je rovněž zřejmá úzká interakce mezi životním cyklem hardware systémů E/E/PE a životním cyklem software těchto systémů. Zapracováním této interakce do celkové struktury normy se opět projevuje její robustnost a nadčasové zpracování.

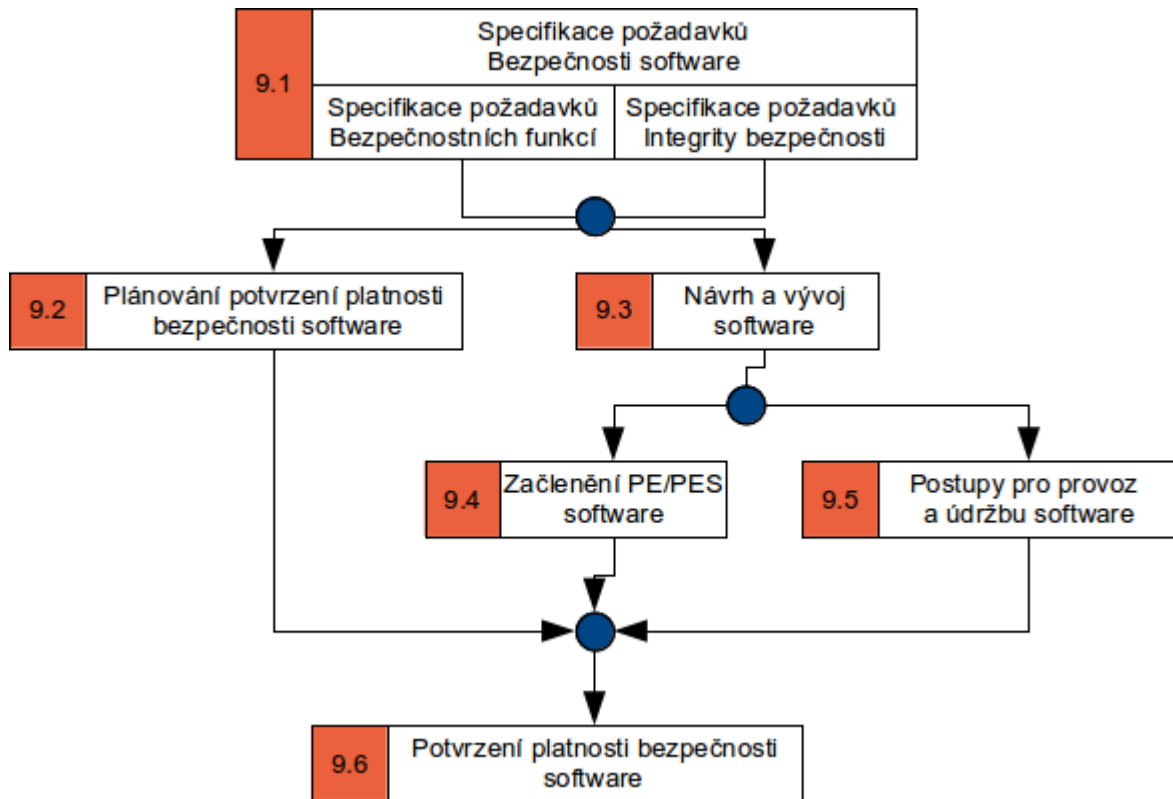
Hardware se dá poměrně snadno testovat a hlavně je z tohoto testování možné získat jednoznačné parametry charakterizující jeho spolehlivost. Oproti tomu software byl odjakživa Achillovou patou bezpečnostních systémů. Těžko se stanovovala jeho spolehlivost a chování v případě poruchy. Proto se autoři jeho použití v bezpečnostních aplikacích až donedávna snažili vyvarovat. Východiskem se staly až programovací jazyky s tzv. omezenou variabilitou, kde tyto problémy odpadají. Nicméně pokud uvážíme, že IEC 61 508 vzniká už začátkem 90. let minulého století jeví se zařazení nástrojů, pro kvantifikační a kvalitativní analýzy software, jako nadmíru prozíravé a nadčasové.



Obr. 13: Životní cyklus bezpečnosti E/E/PES systému souvisejícího s bezpečností – hardware

V případě životního cyklu realizace E/E/PES systému, se jedná o určitý subsystém celkového životního cyklu. Takovýto životní cyklus by měl mít podobu zobrazenou na Obr. 13 (pro hardware) případně na Obr. 14 (pro software). Pokud se rozhodneme použít strukturu odlišnou od struktury uvedené na těchto obrázcích je nutné toto rozhodnutí zdůvodnit a bez výjimek dodržet všechny požadavky uvedené v příslušných normách. Tyto požadavky jsou, stejně jako v předchozím případě (životního cyklu celkové bezpečnosti) definovány, pro jednotlivé fáze odděleně.

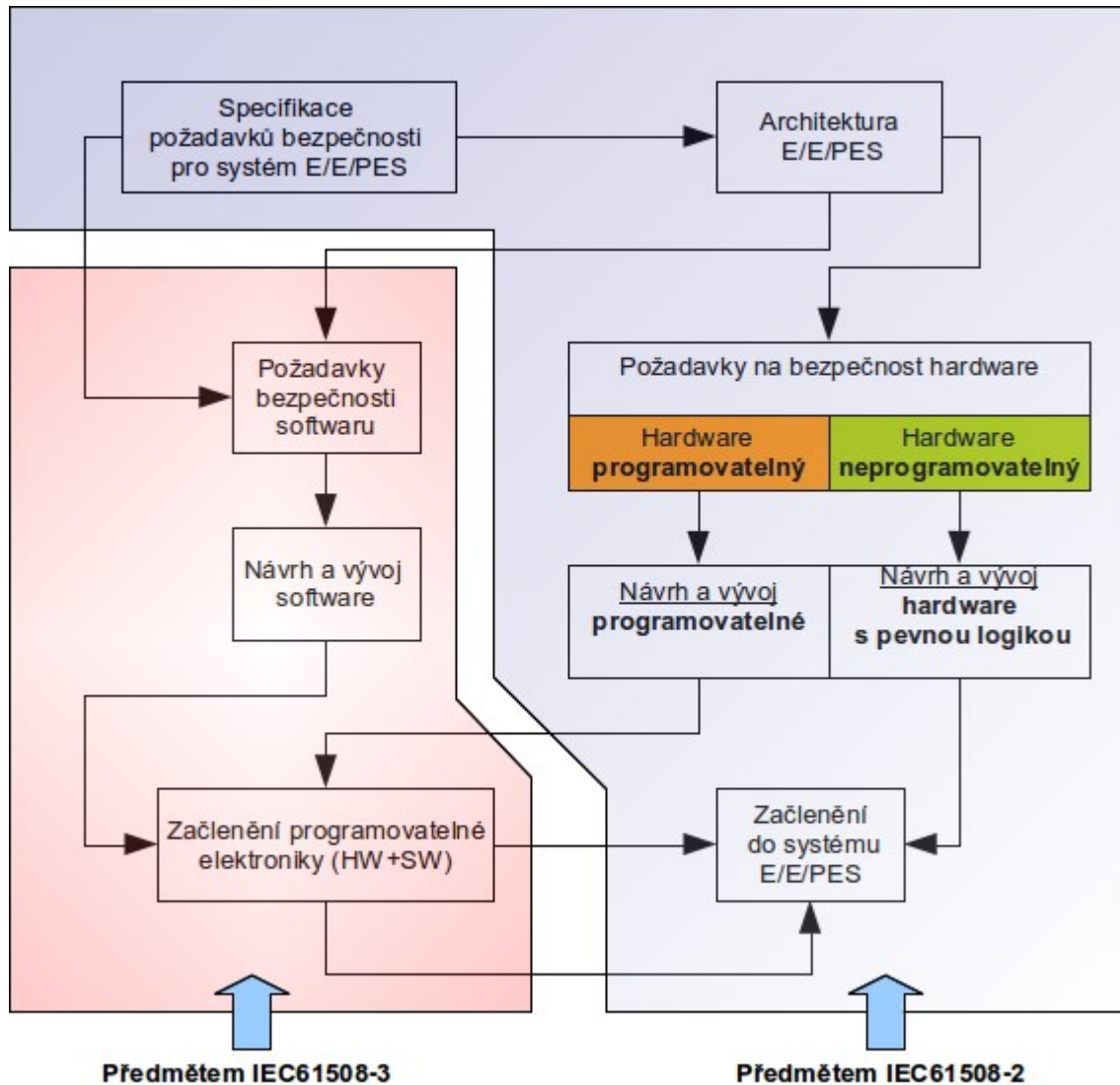
Vhodnou pomůckou je opět tabulkové zpracování, které bylo zmíněno v úvodní části celkového životního cyklu.



Obr. 14: Životní cyklus bezpečnosti software pro systém E/E/PES související s bezpečností – software

Rozsah použití IEC 61 508-2 a IEC 61 508-3 je znázorněn na Obr. 15, je zde v poměrně jednoduché formě vidět přímá provázanost mezi hardware a software.

V současné době je patrná tendence k náhradě systémů s pevnou logikou systémy s programovatelnou logikou. Systémy s pevnou logikou se využívají hlavně v systémech, jejichž aplikace se prakticky beze změn opakují (např. dvojruční ovládání, světelné závory, nouzové zastavení, bezpečnostní moduly pro zabezpečovací systémy na železničních přejezdech, zabezpečovací technika drážní/letecká apod.). Oproti tomu programovatelné systémy jsou vhodné tam, kde se uvažuje o určitém stupni variability. Příčinou těchto požadavků na variabilitu může být například budoucí plánované rozšíření technologie, nebo zapojení do řízení procesu, apod.



Obr. 15: Vztah aplikačních oblastí IEC 61 508-2 a IEC 61 508-3

□ **Plánování (LC7 - krok č. 7 na Obr. 12)**

Na základě Obr. 12, můžeme pozorovat úzkou interakci mezi instalací a uvedením do provozu, potvrzením celkové bezpečnosti a plánováním celkového provozu, údržby a oprav. Proto je zřejmé, že tato fáze bude mít přímý vliv na celkový návrh systémů souvisejících s bezpečností. Zároveň je, na tomto obrázku dobře vidět, že plánování těchto činností je zcela oddělené od realizace systémů souvisejících s bezpečností a to jak od systémů E/E/PES tak od systémů založených na jiných technických principech. Toto oddělení je důležitým předpokladem, pro eliminaci systematických chyb a zvyšuje robustnost celého plánování životního cyklu (myšleno v kontextu zanechání určité volnosti pro oborové aplikace IEC 61 508). Požadavky na tuto fázi rozdělíme podle částí na Obr. 12 na:

- požadavky na uvedení do provozu,
- požadavky na platnost celkové bezpečnosti
- požadavky na provoz a údržbu.

Příklad 7

Příklad 8 Instalace a uvedení do provozu:

Cílem této fáze je sestavení plánu instalace a uvedení do provozu systému souvisejícího s bezpečností.

Plán Instalace musí stanovit:

- a) časový rozvrh instalace,
- b) osoby odpovědné za instalaci jednotlivých součástí,
- c) postupy instalace,
- d) sledy činností při začleňování jednotlivých prvků,
- e) kritéria pro hodnocení připravenosti k instalaci,
- f) postupy řešení případných poruch.

Plán uvedení do provozu stanovuje:

- a) časový rozvrh uvedení do provozu,
- b) osoby odpovědné za uvedení do provozu,
- c) postupy uvedení do provozu,

Příklad 9 Platnost celkové bezpečnosti:

Cílem tohoto bodu je sestavení plánu usnadňujícího potvrzení platnosti celkové bezpečnosti. Tento plán musí obsahovat zejména:

- a) termín uskutečnění potvrzení platnosti,
- b) informace o osobách realizujících a odpovídajících za tento plán,
- c) specifikaci všech režimů provozu EUC, včetně vazeb těchto režimů na systémy související s celkovou bezpečností,
- d) technickou strategii, která se použije pro ověření tohoto plánu,
- e) konkrétní odkaz na každý prvek definovaný ve fázích: LC4 a LC5,
- f) požadavky na prostředí a prostředky použité k potvrzování platnosti (např. kalibrační nástroje, teplota, apod.),
- g) kritéria splnění / nesplnění požadavků jakožto i metody a postupy používané pro hodnocení těchto kritérií.

Příklad 10 Provoz a údržba:

Cílem tohoto bodu je sestavení plánu provozu a údržby systémů E/E/PES a systémů založených na jiných technických principech a to tak, aby bylo zajištěno udržení požadované úrovně integrity bezpečnosti. Mezi požadavky na tuto fázi patří zejména: připravit plán obsahující a určující:

- a) preventivní činnosti pro udržení funkční bezpečnosti systému;
- b) nezbytná omezení, pro jednotlivé činnosti během spouštění, normálního provozu, testování a zastavení provozu systémů E/E/PES;
- c) pomocí systematické analýzy stanovit činnosti preventivní údržby za účelem detekce neodhalených vad;
- d) zapojení osob odpovědných za budoucí provoz a údržbu systémů souvisejících s bezpečností do tvorby plánu údržby.

□ Celková instalace a uvedení do provozu (LC9 - krok č. 9 na Obr. 12)

Hlavní cíle tohoto bodu je možné označit jako:

- samotnou instalaci E/E/PE,
- uvedení těchto systémů do provozu.

Pro zajištění prvního cíle je nutné provádět instalační činnosti podle plánu instalace E/E/PE systémů. Během instalace se jednotlivé činnosti dokumentují a musí zde dojít i k vyřešení případných poruch a nekompatibilit.

Dosažení druhého cíl se zajišťuje pomocí plánu pro uvádění E/E/PE do provozu. Informace dokumentované během uvádění do provozu musí obsahovat:

- a) dokumentaci činností pro uvedení do provozu,
- b) odkazy na hlášení o poruchách,
- c) vyřešení poruch a nekompatibilit.

□ **Potvrzení platnosti a celkové bezpečnosti (LC10 - krok č. 10 na Obr. 12)**

Jak již vyplývá z názvu je v tomto bodě nutné potvrdit splnění požadavků na E/E/PE systémů a to zejména s ohledem na požadavky konkrétní bezpečnostní funkce a požadavků na integritu bezpečnosti. Toto ověření se provádí podle plánu potvrzení celkové bezpečnosti. Součástí mohou být i měření, kdy je nutné k tomuto účelu používat pouze kalibrované měřicí přístroje v návaznosti na národní normu, nebo specifikaci prodejce.

Informace získané během této fáze se dokumentují a musí obsahovat:

- činnosti potvrzování platnosti v chronologické formě,
- verzi použité specifikace požadavků celkové bezpečnosti,
- použité nástroje a zařízení,
- výsledky jednotlivých činností,
- konfiguraci zkoušeného objektu, postupy a podmínky prostředí,
- odchylky získaných údajů od očekávaných hodnot.

Pokud dojde k neshodám mezi získanými a očekávanými hodnotami je nutné provést analýzu, na jejímž základě se rozhodne, zda bude pokračováno v potvrzování celkové platnosti bezpečnosti, nebo bude požádáno o změnu a přejde se zpět k předchozí fázi životního cyklu.

□ **Celkový provoz, údržba a opravy (LC11 - krok č. 11 na Obr. 12)**

Cílem této fáze je zajištění provozu, údržby a oprav tak, aby byla udržena požadovaná úroveň integrity bezpečnosti. Nutnými požadavky pro tuto fázi jsou zejména:

a) zpracování:

- plánu údržby,
- postupů pro provoz, údržbu a opravy,
- postupů pro provoz a údržbu software;

b) vedení chronologické dokumentace pro provoz, údržbu a opravy obsahující:

- výsledky zkoušek a prověrek systémů E/E/PE souvisejících s bezpečností;
- dokumentaci o jednotlivých vyžádáních bezpečnostní funkce související s E/E/PE systémy (čas, příčiny) včetně důkladné analýzy průběhu funkce těchto systémů.
- dokumentaci případných modifikací všech systémů zapojených do celkové bezpečnosti (EUC, řízení EUC, E/E/PE, apod.). Požadavky na dokumentaci závisí na konkrétní aplikaci, a proto je nutné přihlídnout i ke konkrétním oborovým implementacím IEC 61 508.

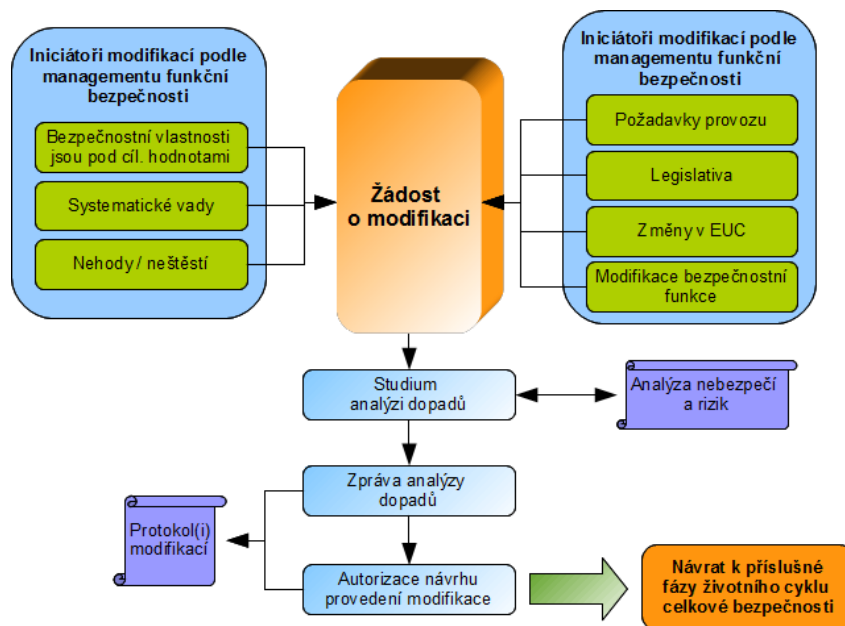
□ **Celková modifikace a zdokonalování (LC12 - krok č. 12 na Obr. 12)**

Cílem této fáze je zaručit přijatelnou hodnotu funkční bezpečnosti systémů E/E/PE během realizace modifikací jakožto i po ukončení těchto modifikací.

Hlavní požadavky na tuto fázi životního cyklu jsou následující:

- Před provedením jakékoliv modifikace je nutné naplánovat všechny nutné činnosti (viz LC7).
Zahájení této fáze je možné teprve po vydání oprávněné žádosti splňující požadavky managementu funkční bezpečnosti. Tato žádost musí obsahovat:
 - zjištěná nebezpečí, kterých se změna může týkat;
 - navrženou změnu jak s pohledu hardware tak software;
 - důvody provedené změny (viz iniciátoři modifikací na Obr. 16);
- Před zahájením jakýchkoliv činností je nutné provést analýzu dopadů na E/E/PE systém. Přičemž je nutné vzít v úvahu i možnosti ovlivnění jiných E/E/PE systémů, které nejsou přímo modifikovány / zdokonalovány. Zároveň je nutné vzít v úvahu i dopad souběžných modifikačních nebo zdokonalovacích opatření na celkovou bezpečnost systému.
- Každá modifikace musí iniciovat návrat k příslušné fázi životního cyklu celkové bezpečnosti.
- Všechny modifikace ovlivňující funkční bezpečnost E/E/PE, musí být podrobně zdokumentovány.

Obecný model použitelný pro ilustraci postupů v této fázi je uveden na Obr. 16. Výše uvedené požadavky jsou na tomto obrázku dobře patrné. Nicméně představují pouze jakési minimum, které doporučuje přímo IEC 61 508. V praxi je proto vždy nutné přihlídnout ke specifikům konkrétní aplikace a případně toto schéma modifikovat do podoby odpovídající těmto specifikům.



Obr. 16: Obecný model postupu modifikací

□ Vyřazení z provozu a likvidace (LC13 - krok č. 13 na Obr. 12)

Cílem této fáze je dosáhnout přijatelné hodnoty funkční bezpečnosti pro E/E/PE systémy. Kroky v rámci této fáze jsou obdobné jako v případě provozu, údržby a oprav (LC11). Patří mezi ně zejména provedení analýzy dopadů jakékoliv činnosti

spojené s vyřazením z provozu. Zahájení jednotlivých činností uvedených v postupu vyřazení z provozu je možné až po vydání oprávněné žádosti v souladu s managementem funkční bezpečnosti. V případě že jakákoliv činnost spojená s tímto krokem životního cyklu celkové bezpečnosti má vliv na funkční bezpečnost systému E/E/PE je nutné iniciovat návrat k příslušné fázi životního cyklu.



Shrnutí pojmů

- ✓ životní cyklus celkové bezpečnosti,
- ✓ fáze životního cyklu,
- ✓ definice celkového předmětu,
- ✓ analýza nebezpečí a rizik,
- ✓ požadavky celkové bezpečnosti,
- ✓ přiřazení bezpečnostních požadavků bezpečnostním funkcím,
- ✓ realizace E/E/PE systémů,
- ✓ realizace systémů založených na jiných technických principech, realizace,
- ✓ vnějších opatření ke snížení rizika,
- ✓ plánování instalace a uvedení do provozu,
- ✓ plánování platnosti celkové bezpečnosti,
- ✓ plánování provozu a údržby,
- ✓ celková instalace a uvedení do provozu,
- ✓ potvrzení platnosti celkové bezpečnosti,
- ✓ celkový provoz údržba a opravy,
- ✓ celková modifikace a zdokonalování,
- ✓ vyřazení z provozu a likvidace.



Otázky

- 1) Vyjmenujte jednotlivé fáze životního cyklu celkové bezpečnosti.
- 2) Nakreslete blokový diagram celkového cyklu bezpečnosti a pokuste se ke každé fázi ve stručnosti popsat hlavní cíle a požadavky.
- 3) Je možné použít odlišný model životního cyklu celkové bezpečnosti od modelu uvedeného v IEC 61 508? Pokud ano jaké požadavky tento model musí splňovat?
- 4) Jsou tzv. vnější prostředky ke snížení rizika součástí IEC 61 508?
- 5) Uveďte oborovou implementaci IEC 61 508, která řeší tzv. ochranné vrstvy.
- 6) Popište obecný postup modifikací v rámci životního cyklu celkové bezpečnosti.



Další zdroje

Sobory norem:

- IEC 61 508,
- IEC 61 511,
- IEC 61 800,
- IEC 62 061.

14 Management funkční bezpečnosti



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět:

- definovat požadavky na management funkční bezpečnosti,
- definovat kvalifikaci osob v rámci managementu funkční bezpečnosti,
- popsat rozsah potřebné kvalifikace pro jednotlivé kompetentní osoby v rámci projektu funkční bezpečnosti,
- popsat způsoby implementace managementu funkční bezpečnosti v rámci organizace.



Výklad

Managementem funkční bezpečnosti rozumíme soubor opatření, zkušeností, postupů, názorů a metod použitých k účinné realizaci systémů souvisejících s bezpečností. Metodický pokyn IEC 61 508 definuje pouze základní požadavky z pohledu managementu, bližší upřesnění je nutné hledat v konkrétních oborových normách. Vzhledem k tomu, že nejčastěji používanou oborovou implementací IEC 61 508 je IEC 61 511 pokusíme se uvést základy uvedené v IEC 61 508 rozšířené o požadavky této oborové implementace.

14.1. 3.1 Cíle a požadavky

Souhrnně lze cíle IEC 61 508 rozdělit na oblast technického řešení a odpovědnosti. První oblast má za cíl stanovit činnosti managementu a technické činnosti prováděné během fází životního cyklu celkové bezpečnosti. Pouze připomeňme, že tyto činnosti provádíme za účelem udržení, nebo dosažení požadavků na integritu bezpečnosti. Druhou oblastí je stanovení odpovědných osob, oddělení a organizací zodpovědných za jednotlivé fáze životního cyklu celkové bezpečnosti.

Pro organizace nebo jednotlivce, kteří mají celkovou zodpovědnost za jednu nebo více fází životního cyklu celkové bezpečnosti tyto osoby nebo organizace stanovují všechny řídicí a technické činnosti nutné k dosažení nebo udržení požadované funkční bezpečnosti. Přitom je nutné vzít v úvahu následující body:

- způsoby a strategii dosažení funkční bezpečnosti včetně prostředků pro hodnocení jejího dosažení;
- identifikaci osob, oddělení a organizací odpovědných za provádění a kontrolování fází životního cyklu celkové bezpečnosti, bezpečnosti E/E/PES nebo bezpečnosti softwaru (v případě, že to okolnosti vyžadují, je vhodné do tohoto bodu zahrnout i příslušné regulační orgány z oblasti bezpečnosti);

- použité fáze životního cyklu celkové bezpečnosti;
- způsob členění informací a rozsah dokumentovaných informací;
- činnosti týkající se odhadu funkční bezpečnosti;
- postupy zajišťující nepřetržité sledování podnětů vycházející z:
 - a) analýzy nebezpečí a rizik;
 - b) odhadu funkční bezpečnosti;
 - c) ověřovacích činností;
 - d) činností potvrzování platnosti;
 - e) managementu konfigurace;
- postupy zajišťující kvalifikaci odpovědných účastníků (jednotlivci, organizace).
Pro potřeby tohoto hodnocení se doporučuje stanovit:
 - a) výcvik personálu se zaměřením na diagnostiku a odstraňování poruch a zkoušení systému,
 - b) výcvik provozního personálu,
 - c) opakování výcviku všech složek⁴ v pravidelných intervalech;
- postupy analýzy a minimalizaci pravděpodobnosti opakování nebezpečných událostí;
- postupy analyzující výkonost provozu a údržby;
- požadavky na periodické kontroly funkční bezpečnosti;
- postupy pro zahájení modifikací systémů souvisejících s bezpečností;
- požadované postupy a orgány odpovědné za schvalování modifikací;
- postupy o udržování informací o potenciálních nebezpečích.

Požadavky vyplývající z předchozího textu se musí úředně prověřit příslušnými kompetentními organizacemi. Každá osoba musí být informována o své roli v managementu celkové bezpečnosti. Dodavatelé poskytující výrobky, technické řešení, nebo služby osobám nebo organizacím odpovědným za jednu či více fází životního cyklu bezpečnosti musí disponovat odpovídajícím systémem řízení jakosti.

14.2. 3.2 Implementace managementu funkční bezpečnosti do organizační struktury podniku

V tomto bodě je nutné implementovat požadavky a strukturu managementu funkční bezpečnosti do stávající organizační struktury organizace. Způsob této implementace musí odpovídat použité organizační struktuře organizace. V úvahu připadají tři základní organizační struktury:

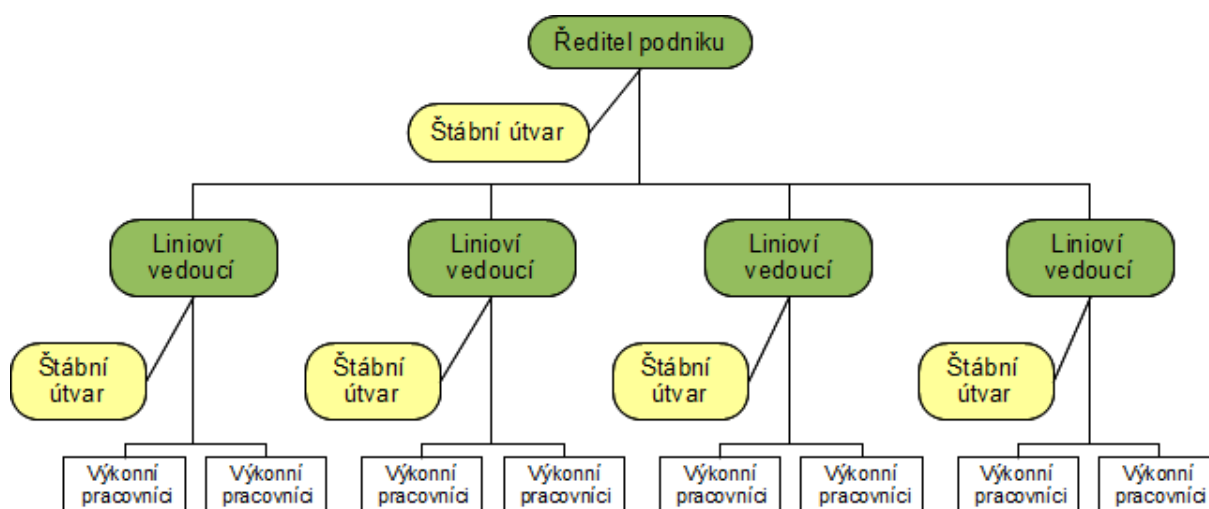
- liniově-štabní,
- funkcionální,
- divizionální.

V případě organizační struktury odlišné od výše uvedených je nutné postupovat v souladu s IEC 61 508-1, kapitola 6. Nyní přistoupíme k vysvětlení jednotlivých organizačních struktur.

⁴ V příloze B jsou uvedeny metodické pokyny týkající se kvalifikačních požadavků pracovníků účastnících se jakýchkoliv činností v rámci životních cyklů celkové bezpečnosti.

▣ Liniově-štabní organizační struktura

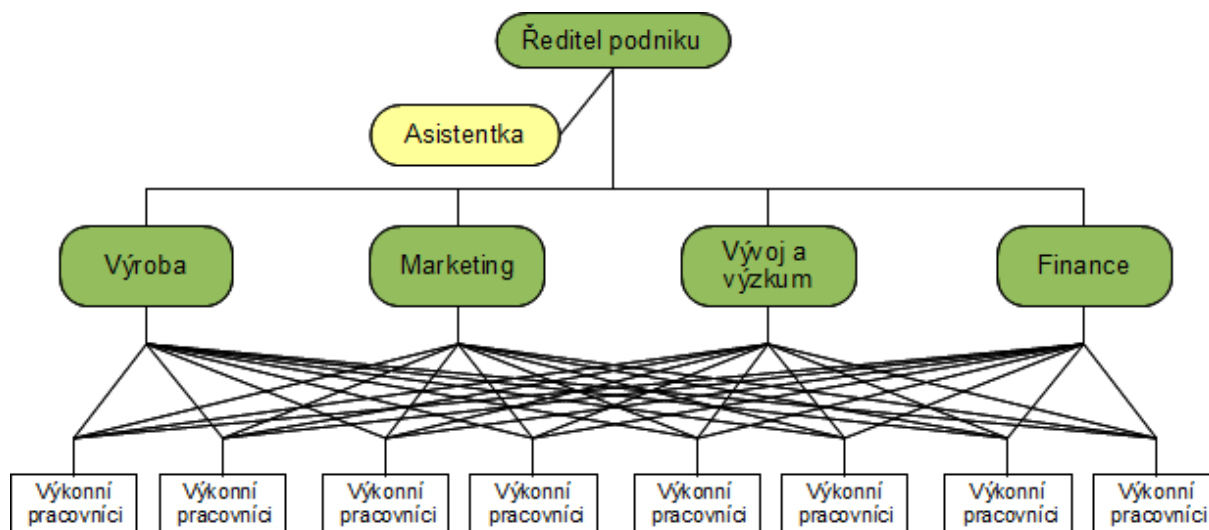
Ukázka této struktury je uvedena v obecné formě na Obr. 17. Osoby odpovědné za funkční bezpečnost jsou zde označeny zelenou barvou. Každá odpovědná osoba má k dispozici štabní útvar poskytující podporu pro její činnost (připravují podklady pro kvalifikovaná rozhodnutí línových vedoucích). Rozsah těchto útvarů může být libovolný, avšak členové tohoto útvaru přímo za funkční bezpečnost nezodpovídají, za tu odpovídají línioví vedoucí (označení zelenou barvou na Obr. 17).



Obr. 17: Organizační struktura Liniově-štabní (obecný příklad takovéto struktury).

▣ Funkcionální organizační struktura

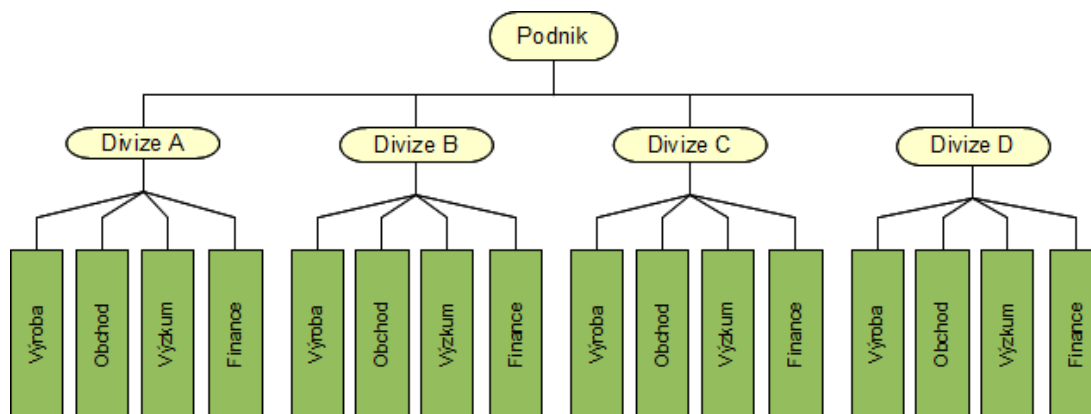
V případě Funkcionální organizační struktury uvedené na Obr. 18 se jedná o strukturu často používanou v menších podnicích. Zejména v případech kdy v nich existují velmi specializované odborné útvary v čele s řídicími pracovníky. Odpovědné osoby za funkční bezpečnost jsou na Obr. 18 označeny zelenou barvou. V tomto případě není uvažováno s projektovou podporou v podobě štabních útvarů. Nicméně jak je ukázáno je možné takovéto útvary zřídit.



Obr. 18: Organizační struktura Funkcionální (obecný příklad takovéto struktury).

□ Divizní organizační struktura

V případě divizní organizační struktury se jedná o uspořádání uvedené na Obr. 19. Základem této struktury jsou specializované útvary, podle jednotlivých objektů. Pod pojmem objekt je zde myšleno výrobek, území, nebo odběratel. Aktivita potřebná k vytvoření objektu jsou pak sloučeny do jedné organizační jednotky označované jako divize. Tato jednotka má pak v rámci organizace silnou autonomii.



Obr. 19: Organizační struktura Divizionální (obecný příklad takovéto struktury).

14.3. 3.3 Kvalifikace osob v rámci funkční bezpečnosti

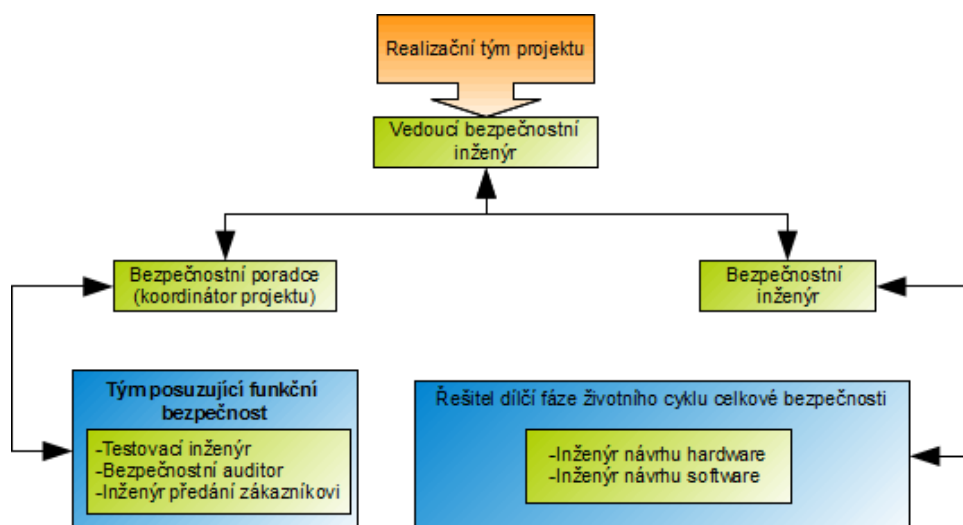
Požadavky na kvalifikaci osob zapojených do jakékoliv fáze životního cyklu celkové bezpečnosti musí splňovat požadavky IEC 61508-1, Přílohy B. Mezi nedůležitější požadavky z pohledu kvalifikace odpovědných osob lze zahrnout:

- a) inženýrské znalosti příslušné aplikační oblasti,
- b) inženýrské znalosti příslušné technické oblasti (elektro, pneumatika, hydraulika, apod.),
- c) znalosti právního a regulačního rámce platného pro konkrétní sektorovou implementaci,
- d) znalost následků selhání systémů souvisejících s bezpečností, pro konkrétní oblast nasazení (měla by platit úměra čím závažnější následky, tím přísnější požadavky na kvalifikaci v oblasti následků),
- e) úměra mezi integritou bezpečnosti a přísností požadavků na specifikaci a kvalifikaci osob (čím vyšší integrita bezpečnosti tím přísnější požadavky na specifikaci a kvalifikaci osob),
- f) předchozí zkušenosti s obdobnými systémy, které mohou být pro realizaci vyšších úrovní integrity bezpečnosti nutnost,
- g) význam odborné kvalifikace osob při plnění konkrétních úkolů souvisejících s bezpečností,
- h) ohled na originalitu řešení čím originálnější je použité řešení tím podrobněji musí být prokázána kvalifikace odpovědných osob a tím důkladněji musí být při návrhu postupováno,
- i) výcvik, zkušenosti a kvalifikace všech osob zapojených do jakékoliv fáze životního cyklu celkové bezpečnosti by měl být dokumentován.

14.4. 3.4 Řídící a technické činnosti funkční bezpečnosti

Před začátkem projektu funkční bezpečnosti je nutné stanovit odpovědnost jednotlivých osob z pohledu managementu a jednotlivých technických činností. Toto stanovení je nutné provádět pro všechny fáze životního cyklu celkové bezpečnosti (příkladem takového cyklu je cyklus na Obr. 12). Samozřejmý je i požadavek na aktualizaci těchto informací v průběhu projektu. Tyto činnosti a rol managementu je nutné promítnout nejen do organizační struktury ale i do:

- oddílu plánování kvality, označovaného jako "plán bezpečnosti", nebo
- samostatného dokumentu označovaného jako "plán bezpečnosti", nebo
- několika dokumentů obsahující postupy organizace a pracovní pokyny.



Obr. 20: Možná varianta uspořádání realizačního týmu projektu funkční bezpečnosti

Jedna z možností řešení organizační struktury osob odpovědných za projekt funkční bezpečnosti je uvedena na Obr. 20. Odpovědnost jakožto i působnost jednotlivých členů je následující:

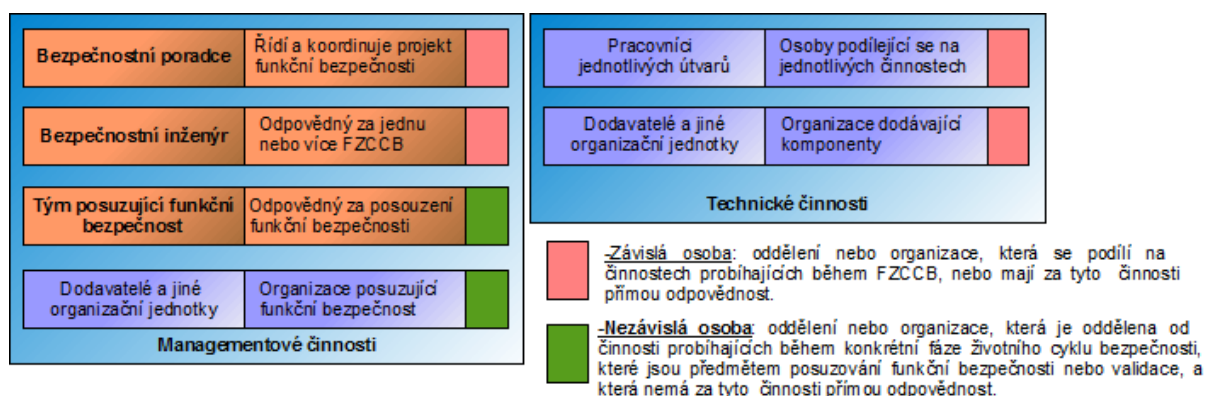
- **Vedoucí bezpečnostní inženýr⁵** – tato osoba má celkovou odpovědnost za fáze životního cyklu celkové bezpečnosti. Pro realizaci a monitorování cílů funkční bezpečnosti stanovuje a zavádí řídicí a technické činnosti, postupy, osoby, oddělení nebo organizační jednotky tvořící tým projektu funkční bezpečnosti. Zodpovídá za modifikaci systémů souvisejících s bezpečností. Dále zodpovídá, za to že se nebezpečné události budou analyzovat a budou přijata příslušná doporučení a opatření pro minimalizaci pravděpodobnosti jejich opakovaného výskytu.
- **Bezpečnostní poradce** – koordinuje řídicí a technické činnosti v rámci projektového týmu posuzujícího funkční bezpečnost pracovníků projektu funkční bezpečnosti v jednotlivých fázích životního cyklu celkové bezpečnosti.
- **V týmu posuzujícím funkční bezpečnost:** jsou osoby a jednotlivci posuzující celkovou bezpečnost. Všechny tyto osoby a jednotlivci (nebo organizace) musí

⁵v zahraniční literatuře (anglicky) označován jako SafetyLeadEngineer

být nezávislými osobami⁶. Nezávislost znamená, že tyto osoby se nepodílejí na projektu funkční bezpečnosti. Posuzují zejména:

- stanovené požadavky a postupy celkové bezpečnosti v jednotlivých fázích životního cyklu celkové bezpečnosti,
- provádí audity a revize funkční bezpečnosti, posuzuje, zda určené osoby, oddělení nebo organizační jednotky odpovídají za:
 - analýzy nebezpečí a posouzení rizik,
 - verifikace činností,
 - validace činností,
 - činností po poruchách a haváriích,
- **Bezpečnostní inženýr** – je osoba mající celkovou odpovědnost za jednu nebo více fází životního cyklu celkové bezpečnosti. Zodpovídá za řídicí a technické činnosti, kontroluje postupy činností a nezávislost pracovníků týmu.
- **Řešitel** - dílčí části (jednotlivé fáze životního cyklu celkové bezpečnosti) – je osoba provádějící řídicí a technické činnosti v projektu funkční bezpečnosti.

Posouzení závislosti/nezávislosti osob je uvedeno na Obr. 21. Zde vidíme dvě skupiny činností a to řídicí činnosti a technické. Nezávislé činnosti jsou zde označeny obdélníkem zelené barvy napravo od popsané činnosti. Technické činnosti jsou označeny identicky pouze je použita barva lososová.



Obr. 21: Ukázka role závislých a nezávislých subjektů v rámci managementu funkční bezpečnosti

⁶ Závislost / nezávislost osob je vysvětlena na Obr. Obr. 21 a v následujícím textu



Shrnutí pojmů

- ✓ vedoucí bezpečnostní inženýr,
- ✓ bezpečnostní poradce,
- ✓ bezpečnostní inženýr,
- ✓ tým posuzující funkční bezpečnost,
- ✓ řešitel projektu,
- ✓ liniově-štabní organizační struktura,
- ✓ funkcionální organizační struktura,
- ✓ divizní organizační struktura.



Otázky

1. Vyjmenujte možné organizační struktury podniku.
2. Vyjmenujte nejdůležitější osoby odpovědné za management bezpečnosti.
3. Jakým způsobem posuzujeme závislost / nezávislost osob odpovědných za jednotlivé fáze životního cyklu celkové bezpečnosti?
4. Vyjmenujte základní požadavky na kvalifikaci osob podílejících se na projektu funkční bezpečnosti.



Další zdroje

- příslušné oborové normy
- IEC 61 508-1

15 Ověřování systémů E/E/PE



Čas ke studiu: 6 hodin



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat postup hodnocení pravděpodobnosti poruchy hardware
- definovat základní subsystém, včetně nutných podmínek řešení
- popsat architektury systémů používaných v IEC 61508
- odlišit jednotlivé režimy vyžádání bezpečnostní funkce
- určit diagnostické pokrytí pro bezpečnostní systém
- stanovit vliv systematické poruchy na spolehlivost systému.



Výklad

15.1. 4.1 Hodnocení pravděpodobnosti poruchy hardware

Pro analýzu integrity bezpečnosti E/E/PE systémů souvisejících s bezpečností je k dispozici celá řada metod. Nejpoužívanějšími jsou metoda spolehlivostních schémat bezporuchovosti a Markovské modely. Společně s novou verzí IEC 61 508 se tyto metody rozšířily o doporučení v podobě použití simulační metody Monte Carlo. Nicméně v praxi se tato varianta doposud neujala. Všechny tyto metody dávají při správném použití obdobné výsledky. Nicméně v případě složitých programovatelných elektronických subsystémů s tzv. křížovým monitorováním se mohou získané výsledky drobně lišit. V případě spolehlivostních schémat je to způsobeno zejména nutností výsledné schémata zjednodušit, proto aby byla tyto schémata prakticky řešitelná.

Na základě zvážení přesnosti vstupních dat je nutné dosáhnout toho, aby tato odchylka nebyla významná. Tedy aby neměla negativní vliv na parametry cílového systému. Bohužel neexistuje konkrétní metoda jak určit přípustnou hodnotu, kdy je tato odchylka tzv. "v normě". Proto je nutné v těchto případech důkladně posoudit celou strukturu systému s cílem určit přípustnou ztrátu přesnosti. V situacích kde porucha řízení EUC vyžaduje zásah E/E/PE, závisí pravděpodobnost výskytu nebezpečné události také na pravděpodobnosti poruch tohoto systému.

Následující výpočty jsou založené na těchto předpokladech:

- výsledná střední pravděpodobnost poruchy při vyžádání je u subsystému menší než 10^{-1} nebo je výsledná pravděpodobnost poruchy za hodinu u subsystému menší než 10^{-5} ;
- intenzity poruch součástí jsou během života systému konstantní;

- subsystém senzorů (vstup) obsahuje, vlastní sensor(y) a všechny další součásti a kabeláž až k prvkům, ale bez nich, v nichž se signály poprvé kombinují prostřednictvím rozhodovacího prvku nebo jiným zpracováním;
- subsystém logiky obsahuje součást(i), kde se signály poprvé kombinují, a všechny další součásti až po součásti, kde se konečný signál nebo signály přivádí do subsystému koncových prvků;
- subsystém koncových prvků (vystup) obsahuje všechny součásti a kabeláž zajišťující zpracování konečného signálu nebo signálů od subsystému logiky včetně koncového akčního prvku(ů);
- intenzity poruch hardwaru používané jako vstupy při výpočtech a vstupy pro použití tabulek jsou pro jednokanálový subsystém (např. jsou-li použity senzory 2oo3, je intenzita poruch pro jediný senzor a účinek 2oo3 je vypočten samostatně),
- všechny kanály ve skupině kanálů mají stejnou intenzitu poruch i stejné diagnostické pokrytí;
- celková intenzita poruch hardwaru kanálu subsystému je součet intenzity nebezpečných poruch a intenzity bezpečných poruch daného kanálu, u kterých se předpokládá, že jsou stejné;
- interval kontrolní zkoušky je alespoň o řad vyšší než interval diagnostické zkoušky;
- pro každý subsystém je jediný interval kontrolní periodické zkoušky a střední doba do zotavení;
- pro práce na všech zjištěných poruchách je k dispozici více opravářských týmů;
- očekávaný interval mezi jednotlivými vyžádáními je alespoň o řad vyšší než střední doba do zotavení;
- u všech subsystémů pracujících v režimu provozu s nízkým vyžádáním a u skupin s rozhodováním 1oo2, 1oo2D a 2oo3 pracujících v režimu provozu s vysokým nebo nepřetržitým vyžádáním se podíl poruch určených diagnostickým pokrytím, jak zjištěných, tak opravených v rámci střední doby do zotavení, používá pro určení požadavků integrity bezpečnosti hardwaru;
- v případě, že porucha napájení znamená přechod od nebuzeného k odpojenému E/E/PE systému souvisejícího s bezpečností a zahájení přechodu systému do bezpečného stavu, neovlivní napájení průměrnou pravděpodobnost poruchy při vyžádání E/E/PE systému souvisejícího s bezpečností; je-li systém pro tento přechod buzen nebo má napájení takové poruchové režimy, které mohou vyvolat nebezpečný provoz E/E/PE systému souvisejícího s bezpečností, potom se do hodnocení doporučuje zařadit i napájení;
- při použití termínu kanál se jeho rozsah omezuje pouze na diskutovanou část systému, což je obvykle buď subsystém senzorů, subsystém logiky nebo koncových prvků.

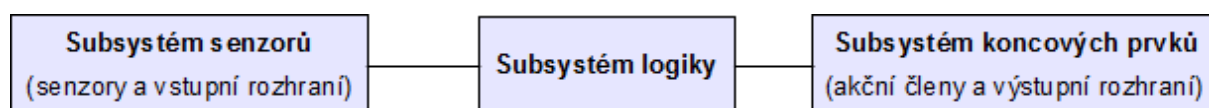
Tyto body jsou samozřejmě platné pro všechny ostatní části této kapitoly. Vyskytují se zde pojmy jako architektura, subsystém senzorů, subsystém logiky, subsystém koncových prvků, diagnostické pokrytí, podíly bezpečných a nebezpečných poruch, apod. Jedná se o pojmy pro kohokoliv se zkušeností s bezpečnostní technikou ne zcela neznámé. Nicméně před tím než postoupíme dál, pokusíme se je objasnit v kontextu IEC 61 508.

□ Postup výpočtu pravděpodobnosti selhání na vyžádání

Průměrná pravděpodobnost selhání (PFD_{avg}) při vyžádání bezpečnostní funkce se podle [2], Příloha B určuje pomocí vztahu (4.1). Jedná se o součet pravděpodobností poruchy při vyžádání jednotlivých částí každého subsystému (podle Obr. 22) tedy subsystémů senzorů, logiky a koncových prvků.

$$PFD_{SYS} = PFD_S + PFD_L + PFD_{FE} \quad (4.1)$$

Každý subsystém podle vztahu (4.1) se řeší samostatně a může být tvořen libovolným počtem komponent v několika variantách uspořádání. Tyto varianty uspořádání neodpovídají elektrickému uspořádání ale bezporuchovostnímu modelu konkrétního zapojení.



Obr. 22: Základní struktura subsystému

Při určení PFD_{avg} každého subsystému se postupuje podle následujícího schématu:

1. Nakreslit blokové schéma znázorňující jednotlivé součásti subsystému logiky, senzorů a koncových prvků. Do těchto subsystémů je možné zahrnout i přizpůsobovací obvody v podobě převodníků, oddělovačů, budičů, apod.
2. Určit režim provozu systému a jeho jednotlivých prvků. Zde přicházejí v úvahu dva režimy vyžádání:
 - a. režim s nízkým vyžádáním;
 - b. režim s vysokým (nepřetržitým) vyžádáním.
3. Pro každou rozhodovací skupinu subsystémů definovat:
 - a. architekturu
 - b. diagnostické pokrytí každého kanálu
 - c. intenzitu poruch
 - d. činitele společných poruch
4. V případech kdy bezpečnostní funkce závisí na více než jedné skupině senzorů, logiky, nebo akčních prvků určí se výsledná hodnota PFD_S konkrétní skupiny podle vzorce (4.2):

$$PFD_S = \sum_i PFD_{Gi} \quad (4.2)$$

□ Režimy vyžádání bezpečnostní funkce

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, existují dva režimy vyžádání nízký a vysoký. Tyto režimy odpovídají přímo provozu bezpečnostní funkce. Uvažujme například zařízení hlídající maximální (respektive havarijní) hladinu v libovolné nádobě. Dá se předpokládat, že k dosažení této úrovně a tedy k aktivaci havarijní funkce dojde pouze při poruše řízení normálního provozu. Četnost takovéto události bude tedy

několikrát za rok případně i za delší časový interval. V takovémto případě se jedná o režim provozu s nízkým vyžádáním.

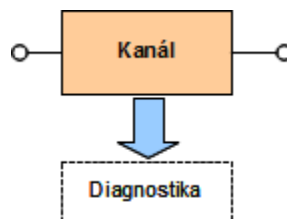
Nyní uvažme případ například vlakového zabezpečovače. Jedná se o zařízení, jehož jedna část je umístěna v lokomotivě a druhá na příslušném velícím dispečinku. Jako médium se používá kolejnice a signál o přesně definované frekvenci a hodnotě. Vzhledem k tomu, že informace se přenáší mezi body prakticky kontinuálně, jedná se v tomto případě o bezpečnostní funkci s nepřetržitým vyžádáním.

□ Architektury používané v IEC 61 508

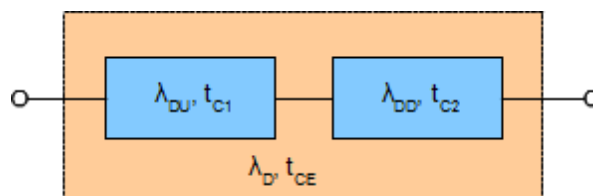
Mezi nepoužívanější architektury (jakožto i jediné uvedené v [2]) patří:

Příklad 11 Architektura 1oo1

Ukázka blokového uspořádání takovéto architektury je uvedena na Obr. 23. Tato architektura je tvořena jediným kanálem, kdy porucha v tomto kanále znamená při vyžádání bezpečnostní funkce ztrátu její funkce. Odpovídající spolehlivostní model je pak uveden na Obr. 24. Tento spolehlivostní model je sériové spojení dvou bloků kdy první blok reprezentuje nebezpečné nedetekované poruchy a druhý blok poruchy nebezpečné a detekované. Důležité parametry včetně příslušných vztahů jsou uvedeny v následujících tabulkách: Tab. 8, Tab. 9, Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12 a Tab. 13.



Obr. 23: Blokové schéma architektury 1oo1



Obr. 24: Spolehlivostní schéma pro architekturu 1oo1

Příklad 12 Architektura 1oo2

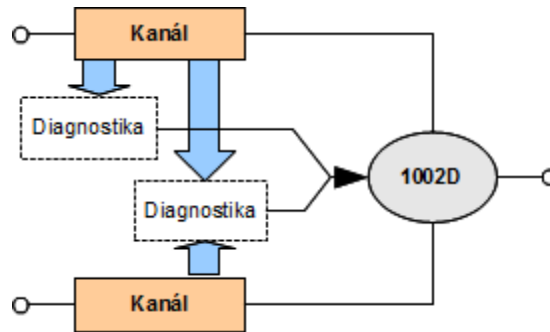
Tuto architekturu tvoří dva paralelně spojené kanály tak, že danou bezpečnostní funkci může zpracovat každý z těchto dvou kanálů. To znamená, že před selháním při vyžádání bezpečnostní funkce by musela nastat nebezpečná porucha v obou kanálech. Předpokládá se, že jakékoliv diagnostické testování zaznamená pouze zjištěné vady a nezmění žádné výstupní stavy nebo rozhodování výstupů.

Blokové schéma a spolehlivostní model pro tuto architekturu jsou stejné jako pro architekturu 1oo1 (tedy na Obr. 23 a Obr. 24).

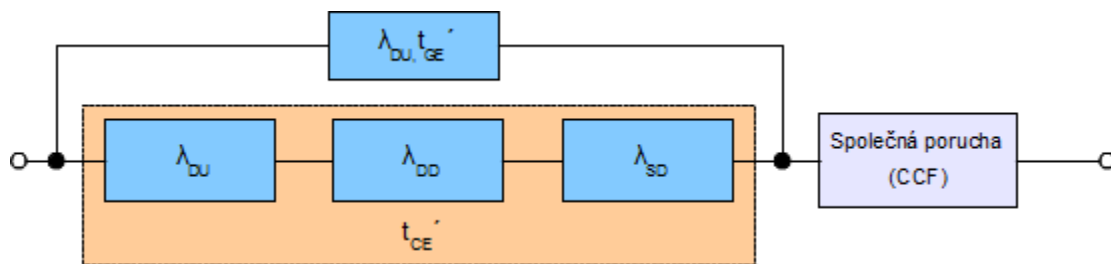
Příklad 13 Architektura 1oo2D

Tuto architekturu tvoří dva paralelně spojené kanály. Během normálního provozu potřebují před provedením bezpečnostní funkce její vyžádání oba kanály. Kromě toho, jestliže se diagnostickými testy zjistí vady v jednom z obou kanálů, potom se

rozhodování výstupů přizpůsobí tak, aby celkový stav výstupu následoval stav určený druhým kanálem. V případě, že diagnostické testy zjistí vady v obou kanálech nebo rozpor (nesouhlas), který nelze přiřadit žádnému z obou kanálů, potom přechází výstup do bezpečného stavu. Pro zjištění rozporu mezi kanály může každý z kanálů určit stav druhého kanálu pomocí prostředků na druhém kanálu nezávislých. Odpovídající blokové schéma je pak na Obr. 25 a spolehlivostní model na Obr. 26.



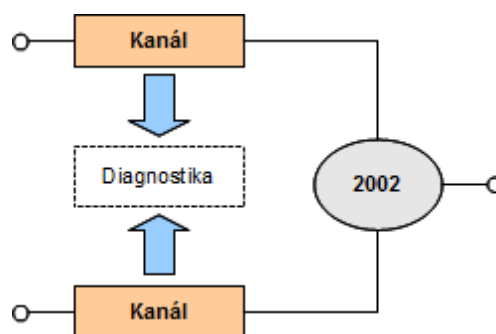
Obr. 25: Blokové schéma architektury 1oo2D



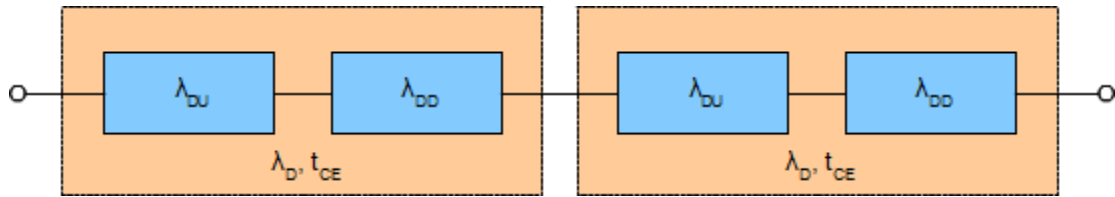
Obr. 26: Spolehlivostní schéma pro architekturu 1oo2D

Příklad 14 Architektura 2oo2

Tato architektura je tvořena dvěma paralelně spojenými kanály tak, že před provedením bezpečnostní funkce potřebují vyžádání oba kanály. Předpokládá se, že jakékoliv diagnostické testování znamená jediné zjištění vady a nezmění žádné výstupní stavy nebo rozhodování výstupů. Blokové schéma takovéto architektury je uvedeno na Obr. 27 a odpovídající spolehlivostní schéma na Obr. 28.



Obr. 27: Blokové schéma architektury 2oo2

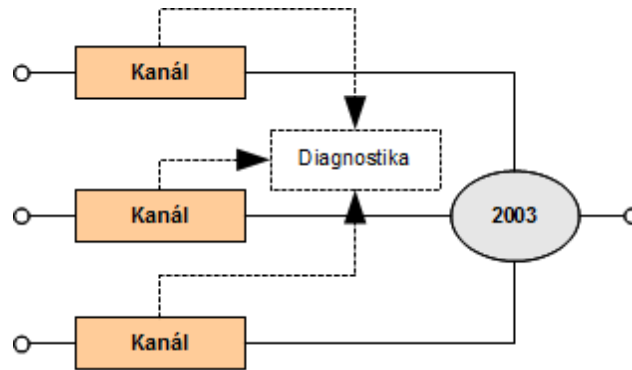


Obr. 28: Spolehlivostní schéma pro architekturu 2oo2

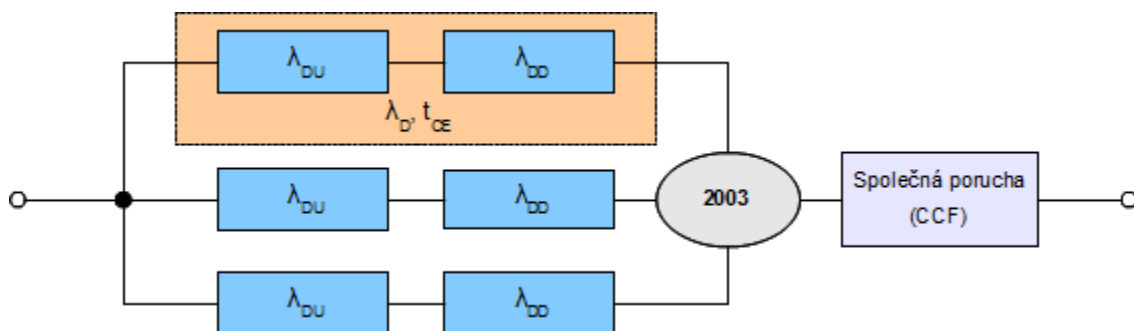
Příklad 15 Architektura 2oo3

Tuto architekturu tvoří tři paralelně spojené kanály s majoritním (většinovým) rozhodováním výstupních signálů tak, že výstupní stav se nezmění v případě, že pouze jeden kanál dává jiný výsledek, který se neshoduje s ostatními dvěma kanály. Předpokládá se, že jakékoliv diagnostické testování zaznamená jediné zjištění vady a nezmění žádné výstupní stavy nebo rozhodování výstupů.

Odpovídající blokové schéma je na Obr. 29, tomuto schématu odpovídající spolehlivostní model je na Obr. 30.



Obr. 29: Blokové schéma architektury 2oo3



Obr. 30: Spolehlivostní schéma pro architekturu 2oo3

□ Vztahy pro režim provozu s nízkým vyžádáním

Arch.	t_{CE}
1001	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
1002	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
1002D	$\frac{\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + (\lambda_{DD} + \lambda_{SD}) \cdot MTTR}{\lambda_{DU} + \lambda_{DD} + \lambda_{SD}}$
2002	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
2003	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$

Tab. 8: Vztahy pro ekvivalentní střední dobu prostoje kanálu t_{CE} (režim provozu s nízkým vyžádáním)

Arch.	t_{GE}
1001	Neuvažuje se
1002	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
1002D	$\frac{\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) + (\lambda_{DD} + \lambda_{SD}) \cdot MTTR}{\lambda_{DU} + \lambda_{DD} + \lambda_{SD}}$
2002	
2003	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$

Tab. 9: Vztahy pro ekvivalentní střední dobu prostoje systému t_{GE} (režim provozu s nízkým vyžádáním)

Arch.	PFD
1001	$(\lambda_{DU} + \lambda_{DD}) \cdot t_{CE}$
1002	$2 \cdot \left[(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \right]^2 \cdot t_{CE} \cdot t_{GE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$
1002D	$2 \cdot (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \cdot \left[(1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + \lambda_{SD} \right] \cdot t_{CE} \cdot t_{GE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$
2002	$2 \cdot \lambda_D \cdot t_{CE}$
2003	$6 \cdot \left[(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \right]^2 \cdot t_{CE} \cdot t_{GE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR + \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right)$

Tab. 10: Pravděpodobnost selhání na vyžádání PFD pro jednotlivý kanál (režim provozu s nízkým vyžádáním)

□ **Vztahy pro režim provozu s vysokým (nepřetržitým) vyžádáním**

Arch.	t_{CE}
1001	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
1002	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$
1002D	$\frac{\lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + (\lambda_{DD} + \lambda_{SD}) \cdot MTTR}{\lambda_{DU} + \lambda_{DD} + \lambda_{SD}}$
2002	Neuvažuje se
2003	$\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$

Tab. 11: Vztahy pro ekvivalentní střední dobu prostoje kanálu t_{CE} (režim provozu s vysokým vyžádáním)

Arch.	t_{GE}
1001	Neuvažuje se
1002	Neuvažuje se
1002D	Neuvažuje se
2002	Neuvažuje se
2003	Neuvažuje se

Tab. 12: Vztahy pro ekvivalentní střední dobu prostoje systému t_{GE} (režim provozu s vysokým vyžádáním)

Arch.	PFH
1001	$2 \cdot \lambda_{DU}$
1002	$2 \cdot \left[(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \right]^2 \cdot t_{CE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} + \beta \cdot \lambda_{DU}$
1002D	$2 \cdot (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \cdot \left[(1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} + (1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + \lambda_{SD} \right] \cdot t_{CE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} + \beta \cdot \lambda_{DU}$
2002	$2 \cdot \lambda_D$
2003	$6 \cdot \left[(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \right]^2 \cdot t_{CE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} + \beta \cdot \lambda_{DU}$

Tab. 13: Pravděpodobnost selhání na vyžádání PFD pro jednotlivý kanál (režim provozu s vysokým vyžádáním)

15.2.4.2 Výpočet diagnostického pokrytí a podílu bezpečných poruch

Postup výpočtu jakožto i požadavky jednotlivých kroků jsou uvedeny v [3], Příloha C. Diagnostické pokrytí (DC) a podíl bezpečných poruch (SFF) pro každý subsystém se vyčíslí podle následujícího schématu:

1. provede se analýza režimů poruch a jejich následků založená na informacích:

- a) podrobné blokové schéma E/E/PE systému souvisejícího s bezpečností popisující daný subsystém spolu s propojeními té části E/E/PE systému souvisejícího s bezpečností, která ovlivňuje uvažovanou(é) bezpečnostní funkci(e);
 - b) schéma propojení hardware popisující každou část systému v kontextu celkové funkce systému
 - c) režimy poruch a intenzity poruch pro každou součást
2. provede se přiřazení každého poruchového režimu podle cílového stavu komponenty k:
 - a) bezpečné poruše
 - b) nebezpečné poruše
 3. na základě bodů 1. a 2. se provede výpočet celkové intenzity bezpečné poruchy λ_S , dále pak celková pravděpodobnost nebezpečných poruch zjištěných diagnostickými testy λ_{DD} a celková pravděpodobnost nebezpečné poruchy λ_D .
 4. s využitím vzorce (4.3) se vypočte diagnostické pokrytí subsystému jako:

$$DC = \frac{\sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_D} \quad (4.3)$$

5. následně se dle vzorce (4.4) vypočte podíl bezpečných poruch subsystému jako:

$$SFF = \frac{\sum \lambda_S + \sum \lambda_{DD}}{\sum \lambda_S + \sum \lambda_D} \quad (4.4)$$

15.3. 4.3 Účinky systematických poruch souvisejících s hardware E/E/PE

Poruchy systému můžeme s pohledu příčin jejich vzniku rozdělit na dvě skupiny:

- a) náhodné poruchy hardware,
- b) systematické poruchy.

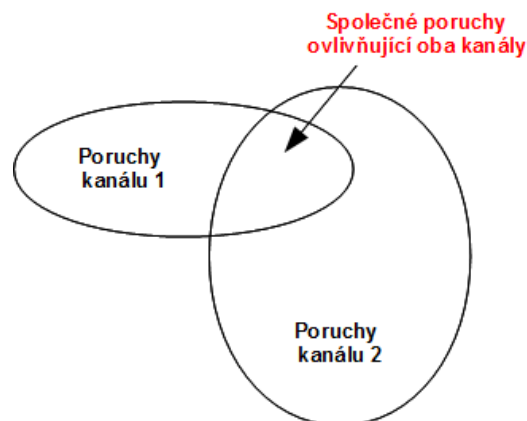
První skupina je tvořena poruchami, které se vyskytují zcela nahodile a souvisejí se stavem konkrétní komponenty. Zjednodušeně řečeno se jedná o poruchy, jejichž výskyt jsme schopni s určitou pravděpodobností odhadnout. Z pohledu spolehlivosti se jedná o tzv. bezporuchovost. Jednou možností jak snížit pravděpodobnost výskytu těchto poruch je výměna komponent za "kvalitnější"⁷, případně modifikací⁸ zapojení. Touto skupinou poruch jsme se zabývali v předchozí kapitole a je poměrně logické, že v případě vícekanálových systémů nebudou tyto poruchy hrát významnou roli.

⁷ Pojem kvalitnější je nutné chápat jako s lepšími parametry bezporuchovosti.

⁸ Pod pojem modifikace si můžeme představit změny v zapojení zaměřené např. na snížení provozní teploty. Neboť životnost komponent (zejména polovodičových) je silně závislá na provozní teplotě.

Jedná se totiž o náhodný jev a pravděpodobnost, že k tomuto náhodnému jevu dojde v několika kanálech současně je poměrně nízká.

Druhou skupinu poruch tvoří poruchy, které jsou výsledkem jediné příčiny. Proto je označujeme jako společné poruchy. Společnou příčinou může být například porucha chlazení, která má za následek vzrůst provozní teploty a tím zkrácení životnosti jednotlivých komponent. V tomto případě je pravděpodobné, že takováto porucha může ovlivnit více jak jeden kanál. Nicméně je pravděpodobné, že se tato porucha ač je pro oba kanály společná neprojeví ve stejný okamžik. Dá se totiž předpokládat, že jednotlivé komponenty v příslušném kanálu budou na vzrůst teploty reagovat autonomně a proto okamžik jejich selhání bude různý. Tedy nejprve dojde k poruše v jednom kanálu a až po uplynutí určitého časového intervalu k poruše kanálu druhého. Souvislost mezi poruchami zasahujícími jeden kanál a mezi poruchami projevujícími se v obou kanálech je dobře patrná z Obr. 31.



Obr. 31: Vztah mezi společnými poruchami a poruchami projevujícími se pouze v jednom kanálu

Cílem hodnocení, opatření a metodologie uvedené v IEC 61 508 je odstavit⁹ systém před uplynutím časového intervalu, mezi poruchou prvního kanálu a poruchou druhého kanálu (tedy ztrátou funkce). Proto lze dojít k závěru, že jedinou možností jak takovou poruch odhalit je monitorování funkce příslušného kanálu (těžko totiž můžeme reagovat na poruchu, o které nevíme)

V dnešní době je tato autodiagnostika (respektive diagnostické testy) poměrně dobře zvládnutou inženýrskou disciplínou. Zejména pak v případě komponent (kanálů), které disponují SW prostředky pro provádění těchto diagnostických testů.

V následujícím textu se zaměříme pouze na jeden z možných přístupů jak ohodnotit vliv těchto společných poruch na pravděpodobnost selhání na vyžádání. Tento možný přístup bude založen na tzv. β činiteli.

□ Použití β činitele pro výpočet pravděpodobnosti poruchy E/E/PE

Použití β činitele je založeno na několika skutečnostech:

⁹ Správnějším pojmem je uvést do bezpečného stavu ač význam je identický pojmu odstavit.

- a) Lze předpokládat, že tří a více kanálový systém bude mít menší tendenci ke společným poruchám než dvoukanálový systém. Nicméně tato skutečnost není v tomto případě brána v potaz;
- b) Předpokládá se, že každá část subsystému (vstupní, logika, výstupní) je řešena samostatně;
- c) Předpokládá se rovněž, že jednotlivé subsystémy pracují při odlišných podmínkách. Přičemž tyto podmínky jsou dány místem instalace například logika (uvnitř rozvaděče) a vstupní a výstupní komponenty přímo v technologii konkrétního projektu (v této technologii se pak dají očekávat zhoršené podmínky prostředí).

Všechny poruchy uvažovaného systému můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupina leží mimo oblast diagnostických testů. Tyto poruchy nebudeme schopni odhalit ani sebelepšími diagnostickými testy. Druhou skupinu budou tvořit poruchy, které jsme schopni odhalit pomocí diagnostických testů (samozřejmě za předpokladu, že systém těmito testy disponuje). Celková pravděpodobnost poruchy v důsledku nebezpečných společných poruch pak bude:

$$\lambda_{DU} \cdot \beta + \lambda_{DD} \cdot \beta_D \quad (4.5)$$

Přičemž:

λ_{DU} je pravděpodobnost nezjištěné poruchy jednotlivého kanálu, tj. pravděpodobnost poruch, které jsou mimo pokrytí diagnostických testů; jakékoliv snížení činitele β -činitele plynoucí z opakovacího kmitočtu diagnostických testů nemůže podíl těchto poruch ovlivnit;

β je činitel společných poruch pro nezjistitelné nebezpečné vady, který se rovná celkovému β -činiteli, který by se použil bez diagnostických testů;

λ_{DD} -je pravděpodobnost zjištěné poruchy jednotlivého kanálu, tj. pravděpodobnost poruch jednotlivého kanálu, které jsou v rámci pokrytí diagnostických testů; tady, je-li opakovací kmitočet diagnostických testů vysoký, vede podíl zjištěných poruch ke snížení hodnoty β , tj. β_D ;

β_D je činitel společných poruch pro zjistitelné nebezpečné vady. Se zvyšováním opakovacího kmitočtu diagnostických testů se stále více snižuje hodnota β_D pod β .

První člen rovnice (4.5) jsou poruchy patřící do první skupiny (tedy neodhalitelné) a druhý člen respektuje poruchy zjistitelné diagnostickými testy. Vzhledem k tomu, že v současné době nejsou k dispozici vhodné údaje pro hodnocení společné poruchy, používá se k výpočtu hodnot založených na kvalifikovaném odhadu. Pro účely tohoto odhadu jsou IEC 61 508 vypracovány obdobné tabulkám: Tab. 14 a Tab. 15. Na základě těchto tabulek se pak provede zhodnocení celého systému. Pro tento výpočet se používá bodová analýza, kdy každému systému podle splnění uvedených tabulek přiřadíme konkrétní body.

Z těchto bodů určíme obecnou hodnotu β danou vztahem:

$$S = X + Y \quad (4.6)$$

Pro získání β_D pak bude platit vztah:

$$S_D = X \cdot (Z + 1) \quad (4.7)$$

Položka	Subsystém logiky		Senzory a koncové prvky	
	X_{LS}	Y_{LS}	X_{SF}	Y_{SF}
Oddělení/odloučení				
Jsou všechny signálové kabely kanálů vedeny ve všech místech odděleně?	1,5	1,5	1,0	2,0
Jsou kanály subsystému logiky na samostatných deskách tištěných spojů?	3,0	1,0		
Jsou kanály subsystému logiky v samostatných skříních?	2,5	0,5		
V případě, že senzory/koncové prvky mají vlastní řídicí elektroniku, je tato elektronika pro každý kanál na samostatných deskách tištěných spojů?			2,5	1,5
V případě, že senzory/koncové prvky mají vlastní řídicí elektroniku, je tato elektronika pro každý kanál uvnitř a v samostatných skříních?			2,5	0,5
Rozmanitost(diverzita)/redundance				
Používají kanály různé elektrické techniky, např. jeden elektronickou nebo programovatelnou elektronickou a druhý reléovou?	7,0			
Používají kanály různé elektrické techniky, např. jeden elektronickou, druhý programovatelnou elektronickou?	5,0			
Používají zařízení u snímacích prvků různých fyzikálních principů, např. tlaku a teploty, lopatkového větrometru (anemometru) a Dopplerova měřicího snímače atd.?			7,5	
Používají zařízení různých elektrických principů/konstrukcí, např. digitální a analogové, jiný výrobce (ne jen nové označení) nebo jiná technologie?			5,5	
Používají kanály zvýšenou redundancí s architekturou MooN, kde $N > M + 2$	2,0	0,5	2,0	0,5
Používají kanály zvýšenou redundancí s architekturou MooN, kde $N = M + 2$	1,0	0,5	1,0	0,5
Je použita rozmanitost (diverzita) nízká, např. diagnostické testy hardwaru používají stejnou techniku?	2,0	1,0		
Je použita rozmanitost střední, např. diagnostické testy hardwaru používají různou techniku?	3,0	1,5		
Navrhovali kanály různí návrháři bez jejich vzájemné komunikace během návrhu?	1,0	1,0		
Jsou oddělené zkušební metody a lidé použiti u každého kanálu během uvádění do provozu?	1,0	0,5	1,0	1,0
Provádí údržbu každého kanálu různí lidé v různou dobu?	2,5		2,5	
Složitost/návrh (konstrukce)/použití/vyzrállost/zkušenost				
Znemožňují křížová propojení mezi kanály výměnu všech informací jiných než jsou informace používané pro diagnostické testování nebo rozhodovací účely?	0,5	0,5	0,5	0,5
Je návrh založen na technikách použitých v zařízeních, které se už úspěšně používají v dané oblasti po dobu > 5 let?	0,5	1,0	1,0	1,0
Jsou více než pětileté provozní zkušenosti se stejným hardwarem používaným v obdobných prostředích?	1,0	1,5	1,5	1,5
Je daný systém jednoduchý, např. ne víc než 10 vstupů nebo výstupů na jeden kanál?		1,0		
Jsou všechny vstupy a výstupy chráněny proti potenciálním úrovním přepětí nebo nadproudu?	1,5	0,5	1,5	0,5
Jsou všechna zařízení/součásti zatěžována umírněným způsobem (např. s činitelem 2 nebo vyšším)	2,0		2,0	
Odhad/analýza a návratná data (umožňující zpětnou vazbu)				
Byly prověřeny výsledky analýzy režimů a účinků poruch nebo analýzy stromu vad pro zjištění příčin společné poruchy a byly v návrhu odstraněny předem předpokládané zdroje společné poruchy?		3,0		3,0
Byly společné poruchy zohledněny při revizích návrhu s výsledky dodanými zpět do návrhu? (Požaduje se písemný doklad o činnostech revize návrhu.)		3,0		3,0
Provádí se analýza všech provozních poruch se zpětnou vazbou z hlediska návrhu (konstrukce)? (Požaduje se písemný doklad použitého postupu.)	0,5	3,5	0,5	3,5

Tab. 14: Výpočet výsledků programovatelné elektroniky, nebo senzorů a koncových prvků, ČÁST 1, zdroj [2], Příloha D

Položka	Subsystém logiky		Senzory a koncové prvky	
	X _{LS}	Y _{LS}	X _{SF}	Y _{SF}
Postupy/lidské rozhraní (rozhraní člověk-stroj)				
Existuje písemný systém pracovních postupů zajišťujících zjišťování všech poruch (nebo zhoršení vlastností) součástí, zjišťují se hlavní příčiny a prověřují se další podobné položky z hlediska podobných potenciálních příčin nebo poruch?		1,5	0,5	1,5
Zajišťují všechny v praxi používané postupy, že: údržba (včetně nastavování nebo kalibrace) jakékoliv části nezávislých kanálů je časově rozvržena a kromě manuálních kontrol prováděných následnou údržbou mohou diagnostické testy probíhat uspokojivě mezi dokončením údržby na jednom kanálu a zahájením údržby na jiném kanálu?	1,5	0,5	2,0	1,0
Stanovují popsané údržbové postupy, že všechny části redundantních systémů (např. kabely atd.), u kterých se předpokládá jejich vzájemná nezávislost, se nemají přemísťovat?	0,5	0,5	0,5	0,5
Provádí se veškerá údržba desek tištěných spojů atd. mimo dané místo v uznaném opravárenském středisku a prochází všechny opravené části úplnou předinstalační zkouškou?	0,5	1,0	0,5	1,5
Má daný systém malé diagnostické pokrytí (60 % až 90 %) a informuje o poruchách až do úrovně v provozu vyměnitelného modulu?	0,5			
Má daný systém střední diagnostické pokrytí (90 % až 99 %) a informuje o poruchách až do úrovně v provozu vyměnitelného modulu?	1,5	1,0		
Má daný systém vysoké diagnostické pokrytí (>99 %) a informuje o poruchách až do úrovně v provozu vyměnitelného modulu?	2,5	1,5		
Poskytují diagnostické testy systému informace o poruchách až do úrovně v provozu vyměnitelného modulu?			1,0	1,0
Kvalifikace/zácvik a školení/přístup k otázkám bezpečnosti				
Byly návrháři (konstruktéři) školeni (pomocí výukové dokumentace) tak, aby rozuměli příčinám a následkům společných poruch?	2,0	3,0	2,0	3,0
Byly pracovníci údržby školeni (pomocí výukové dokumentace) tak, aby rozuměli příčinám a následkům společných poruch?	0,5	4,5	0,5	4,5
Řízení prostředí				
Je omezený přístup personálu (např. uzamčené skříně, nepřístupné umístění)?	0,5	2,5	0,5	2,5
Je pravděpodobné, že systém bude vždy provozován v rozsahu teploty, vlhkosti, koroze, prachu, vibrací atd., v jakém byl zkoušen a to bez použití vnějšího řízení prostředí?	3,0	1,0	3,0	1,0
Jsou všechny signálové a napájecí kabely na všech místech oddělené?	2,0	1,0	2,0	1,0
Zkoušení prostředí				
Byl systém zkoušen z hlediska odolnosti proti všem důležitým vlivům prostředí (např. EMC, teplota, vibrace, vlhkost) na vhodnou úroveň podle specifikace v uznaných normách?	10,0	10,0	10,0	10,0

Tab. 15: Výpočet výsledků programovatelné elektroniky, nebo senzorů a koncových prvků, ČÁST 2, zdroj [2], Příloha D

Diagnostické pokrytí	Interval diagnostických testů		
	Kratší než 1 minuta	Mezi 1 a 5 minutami	Delší než 5 minut
≥99 %	2,0	1,0	0
≥90 %	1,5	0,5	0
≥60 %	1,0	0	0

Tab. 16: Určení parametru Z pro výpočet β - činitele (programovatelná elektronika), zdroj [2], Příloha D

Diagnostické pokrytí	Interval diagnostických testů			
	Kratší než 2 hodiny	Mezi 2 hodinami a dvěma dny	Mezi 2 dny a jedním týdnem	Delší než jeden týden
≥99 %	2,0	1,5	1,0	0
≥90 %	1,5	1,0	0,5	0
≥60 %	1,0	0,5	0	0

Tab. 17: Určení parametru Z pro výpočet β - činitele (senzory a koncové prvky), zdroj [2], Příloha D

V následujícím kroku podle dosažené hodnoty S zvolíme příslušnou hodnotu β a β_D pomocí Tab. 18. Pomocí těchto hodnot pak můžeme pomocí určit konkrétní hodnotu β - činitele.

Výsledek (S nebo S_D)	Odpovídající hodnota β nebo β_D	
	Subsystém logiky	Senzory nebo koncové prvky
120 nebo vyšší	0,5 %	1 %
70 až 120	1 %	2 %
45 až 70	2 %	5 %
Méně než 45	5 %	10 %

Tab. 18: Přřazení hodnoty β a β_D .



Shrnutí pojmů

- ✓ pravděpodobnost poruchy hardware,
- ✓ subsystém senzorů,
- ✓ subsystém logiky,
- ✓ subsystém výstupů,
- ✓ architektura,
- ✓ náhodná porucha,
- ✓ systematická porucha,
- ✓ činitel beta, diagnostické pokrytí,
- ✓ diagnostikované poruchy,
- ✓ nediodagnostikované poruchy,
- ✓ nezjištěné poruchy,
- ✓ bezpečné poruchy,
- ✓ nebezpečné poruchy



Otázky

5. Popište postup hodnocení pravděpodobnosti poruchy hardware.
6. Definujte pojmy systematická porucha a náhodná porucha pro hardware.
7. Uveďte vztahy pro výpočet diagnostického pokrytí (DC) a podílu bezpečných poruch (SFF).
8. Uveďte alespoň jeden z možných postupů hodnocení poruchy se společnou příčinou.



Další zdroje

IEC 61 508-1 až IEC 61 508-7

16 Praktické příklady



Čas ke studiu: 4 hodiny



Cíl:

Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- provést praktický výpočet jednoduchého modelového příkladu ověření úrovně SIL pro E/E/PE systém,
- provést zjednodušené kvantitativní ohodnocení úrovně integrity software,
- definovat jednotlivé kroky výpočtu včetně případného zjednodušení používaných vztahů,
- ze základních vstupních dat v praktickém příkladu vyjádřit riziko,
- ohodnotit vliv kontrolní periodické zkoušky při praktickém výpočtu.



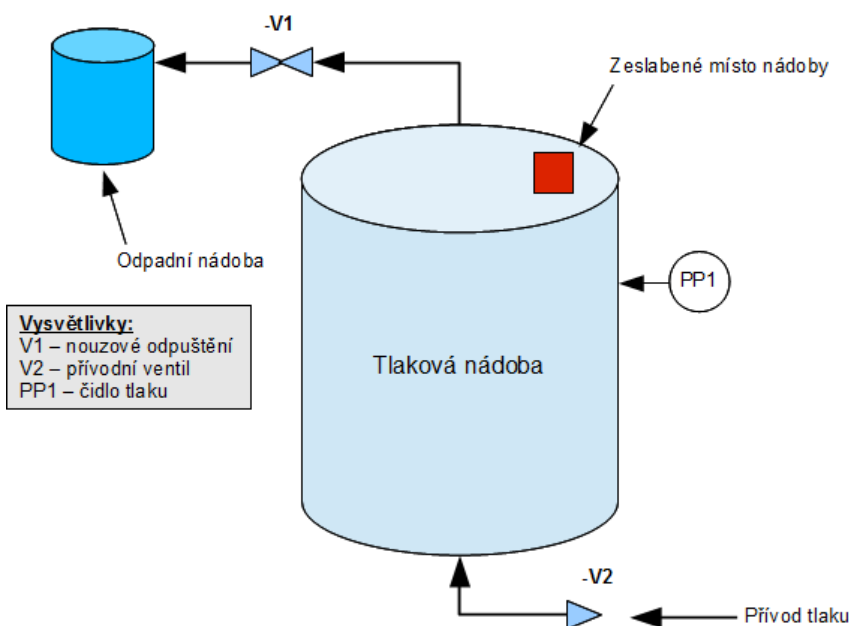
Výklad

16.1.

16.2. 5.1 Technologie tlakového zásobníku

Uvažovaná technologie je uvedena na Obr. 31. Jedná se o jednoduché řízení napouštění vypouštění plynného média do tlakové nádoby. Celý proces napouštění, respektive vypouštění, je řízen obecným řídicím systémem. Riziko celého systému spočívá v překročení provozního tlaku nádoby. Následně by mohlo dojít k explozi tlakové nádoby a úniku média do okolí. Vzhledem k tomu, že situace nekontrolovaného protržení není pro náš příklad akceptovatelná, technologii doplníme o zeslabené místo nádoby podle Obr. 31 (označeno červeně).

Pouze připomenou, že jsme tím pádem aplikovali snížení rizika pomocí jiné vrstvy než E/E/PE. Navržením této zeslabené vrstvy se nebudeme dále zabývat, pouze přijmeme to, že toto opatření je spolehlivé na 100%. Nyní tedy nemůže dojít k roztržení nádoby, ale pouze k řízenému protržení zeslabeného místa, tato situace nastane ve chvíli, kdy tlak v nádobě překročí jeho horní hranici.



Obr. 31: Technologické schéma pro příklad tlakového zásobníku

□ Analýza rizika, určení úrovně integrity

Následky protržení jsou tedy kompletní destrukce nádoby a únik média do okolí. Destrukce nádoby znamená ekonomickou ztrátu, jednak nutnou odstávkou technologie, tak i cenou nové nádoby. Tato rizika nejsme schopni pro náš imaginární příklad určit, bylo by totiž potřeba získat reálná data z provozu. Na základě těchto dat by bylo možné následně provést ocenění jednotlivých složek ekonomického rizika. Vzhledem k tomu, že tato data nemáme k dispozici, nebudeme se jimi dále zabývat. V reálném případě by však tato složka hrála významnou roli.

Únik média do okolí je další složka rizika, v tomto případě uvažme, že nedojde k ohrožení osob. Únik je nežádoucí vzhledem k vlivu na životní prostředí a ztrátě určité společenské prestiže společnosti. Uvažujme, že přijatelnou mírou tohoto rizika je 10% pravděpodobnost úniku média do okolí, jednou za dobu životnosti zařízení. Plánovanou životnost zařízení stanovme na 10 let, pak četnost výskytu poruchy bude 1 porucha vedoucí k úniku média za 100 let (viz metoda ALARP v [2], Příloha B). Tuto hodnotu rizika můžeme ve smyslu IEC 61 508, označit jako přijatelnou.

Podrobnou analýzou řídicího systému a jeho souvisejících obvodů (EUC), jsme došli k závěru, že můžeme předpokládat selhání jednou za rok. Přijatelné riziko je zřejmě větší než riziko selhání systému, budeme tedy muset provést jeho snížení. Hodnotu, o kterou bude nutné snížit riziko EUC, určíme pomocí vztahu (5.1) (viz [4], Příloha C).

$$PFD_{avg} = \frac{F_t}{F_{np}} = \frac{8760 \cdot 10^{-5}}{8760 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^{-2} \quad (5.1)$$

Pouze pro pořádek připomínáme, že jsme v tomto případě použili kvantitativní metodu určení požadované úrovně bezpečnosti. Proces určení nutného snížení rizika bývá v praxi často komplikovanější a často nejsme schopni získat číselnou hodnotu tak jednoduchou úvahou jakou jsme použili v tomto případě.

Nyní podle [4] Tabulka 2, 7.6.2.9 určíme požadovanou hodnotu úrovně integrity bezpečnosti na hranici¹⁰ SIL1 a SIL2.

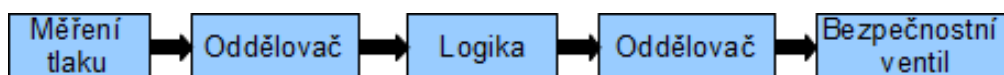
□ Struktura systému

Z předchozí části jsme získali požadavek na EUC realizovat v kategorii SIL2 nebo vyšší. Pro realizaci takového systému bude nutné splnit jednak technické požadavky, tak i požadavky na management celého procesu. Požadavky na management budou zahrnovat dokumentování celého postupu návrhu včetně návrhu způsobu a postupu ověření splnění požadavků na systém. Vzhledem k tomu, že hlavním cílem této práce je technické provedení systému, nebudeme se požadavky na management dále zabývat.

Nyní navrhne základní HW strukturu celého bezpečnostního systému. Předně provedeme oddělení funkce bezpečnostního systému od “normálního” řízení procesu. Důvodem tohoto oddělení je, že celý systém bude jednodušší z pohledu bezpečnosti posoudit. Tato úvaha je základem pro správný návrh bezpečnostního systému, proto v praxi striktně dodržujeme tento postup. Navíc takový systém bude snadné testovat bez nutnosti odstavení technologie, apod.

□ Popis systému

Navržený systém je ve zjednodušené formě blokového diagramu uveden na Obr. 23. Jako snímací prvek je použit snímač tlaku s převodníkem na unifikovaný signál 4-20 mA (v technologickém schématu označen jako -PP1). Signál z převodníku je připojen na oddělovací člen -A1.



Obr. 23: Jednoduché blokové schéma navrženého systému E/E/PE

Logiku systému bude tvořit analogový komparátor, který bude mít nastavené horní a dolní meze. Výstupní signál z tohoto komparátoru bude v pomoci reléového kontaktu přes oddělovací člen -A5 ovládat bezpečnostní ventil (v technologickém schématu označen jako -V1). V následujícím textu se budeme věnovat jednotlivým prvkům systému.

Příklad 16 Snímač tlaku -PP1

Na trhu jsou běžně dostupné převodníky tlaku na výstupní signál proudové smyčky 4-20mA. Volíme snímač KS EEZ B01D MV, jehož parametry jsou uvedeny v Tab. 19. Můžeme si všimnout, že λ převodníku odpovídá úrovni SIL3. Nicméně požadavek na HW odolnost proti poruše omezuje použití převodníku na max. SIL2. Tato informace je uvedena i v materiálu výrobce jako maximální SIL_{CL} (tedy omezení architektury).

¹⁰V bezpečnostních aplikacích platí pravidlo, že v případě kdy je z analýzy rizik požadavek na rozhraní kategorií, volíme vždy kategorii vyšší. Sice je v těchto případech bezpečnostní systém většinou předimenzován, ale je tomu tak ve prospěch bezpečnosti což je akceptovatelné. Pouze v případech, kdy máme vážné pochybnosti, můžeme provést znovu podrobnější analýzu rizik. V našem případě to není nutné, ale pokud bychom se rozhodovali např. mezi SIL3 a SIL4, podrobnější analýza rizik by byla určitě na místě.

KS EEZ B01D MV					
Snímač tlaku					
λ_{sd} (FIT)	λ_{su} (FIT)	λ_{dd} (FIT)	λ_{du} (FIT)	SFF (%)	DC (%)
				NA	NA
λ_{sd} (p/rok)	λ_{su} (p/rok)	λ_{dd} (p/rok)	λ_{du} (p/rok)		
0,0E+00	6,0E-07	1,6E-08	6,5E-08	90,4378	19,283
<u>Poznámka:</u> FIT je počet poruch za 10 ⁹ hodin. - λ_{sd} bezpečné detekované poruchy; - λ_{su} bezpečné nedetekované poruchy; - λ_{dd} nebezpečné detekované poruchy; - λ_{du} nebezpečné nedetekované poruchy;					

Tab. 19: Vstupní parametry pro snímač tlaku.

Příklad 17 Oddělovací člen -A1

Použití tohoto členu je vynuceno předpokladem požadavku plynoucího z prostředí tlakové nádoby. Navíc je nutné s ohledem na ochranné oddělení obvodů. V praxi se tyto přístroje označují jako tzv. bariéry. Výrobce udává, že námi zvolená bariéra má certifikaci až do úrovně SIL3 (je certifikována v souladu a podle IEC 61 508). U těchto zařízení budeme mluvit o nebezpečné chybě v případě, že se měřená veličina odchýlí od skutečné o více jak 2 %. Parametry zvolené bariéry jsou uvedeny opět v Tab. 20.

MTL4541, MTL5541					
Analogový vstupní modul					
λ_{sd} (FIT)	λ_{su} (FIT)	λ_{dd} (FIT)	λ_{du} (FIT)	SFF (%)	DC (%)
	116	210	17	95,0437	92,511
λ_{sd} (p/rok)	λ_{su} (p/rok)	λ_{dd} (p/rok)	λ_{du} (p/rok)		
0,0E+00	1,0E-04	1,8E-04	1,5E-05	95,0437	92,511
<u>Poznámka:</u> FIT je počet poruch za 10 ⁹ hodin. - λ_{sd} bezpečné detekované poruchy; - λ_{su} bezpečné nedetekované poruchy; - λ_{dd} nebezpečné detekované poruchy; - λ_{du} nebezpečné nedetekované poruchy;					

Tab. 20: Vstupní data pro vstupní bariéru.

Příklad 18 Komparátor -A3,

Tato součástka není certifikována podle IEC 61 508. Avšak výrobce má k dispozici materiál, ve kterém specifikuje parametry λ_{SD} , λ_{SU} , λ_{DD} , λ_{DU} . Tyto vstupní parametry jsou uvedeny v Tab. 21. Problém bude představovat skutečnost, že tento komparátor postrádá certifikát pro SIL2. O tom jak tuto situaci řešit, bude pojednáno v následujícím textu.

MTL5314					
Analogový komparátor					
λ_{sd} (FIT)	λ_{su} (FIT)	λ_{dd} (FIT)	λ_{du} (FIT)	SFF (%)	DC (%)
151	165	0	56	84,9462	0
λ_{sd} (p/rok)	λ_{su} (p/rok)	λ_{dd} (p/rok)	λ_{du} (p/rok)		
1,3E-04	1,4E-04	0,0E+00	4,9E-05	84,9462	0
<u>Poznámka:</u> FIT je počet poruch za 10^9 hodin. - λ_{sd} bezpečné detekované poruchy; - λ_{su} bezpečné nedetekované poruchy; - λ_{dd} nebezpečné detekované poruchy; - λ_{du} nebezpečné nedetekované poruchy;					

Tab. 21: Vstupní data pro analogový komparátor.

Příklad 19**Příklad 20 Výstupní oddělovací člen -A5**

Tento oddělovací člen odděluje Ex-ové bezpečné prostředí od nebezpečného. Výstupním kontaktem přímo ovládá ventil -V1. Podle údajů výrobce jsou u tohoto převodníku vyloučeny nebezpečné chyby za předpokladu, že "nulový" výstupní stav je bezpečný.

MTL4521, MTL5521					
Ovladač ventilu / alarmu					
λ_{sd} (FIT)	λ_{su} (FIT)	λ_{dd} (FIT)	λ_{du} (FIT)	SFF (%)	DC (%)
	355	0	44	88,9724	0
λ_{sd} (p/rok)	λ_{su} (p/rok)	λ_{dd} (p/rok)	λ_{du} (p/rok)		
0,0E+00	3,1E-04	0,0E+00	3,9E-05	88,9724	0
<u>Poznámka:</u> FIT je počet poruch za 10^9 hodin. - λ_{sd} bezpečné detekované poruchy; - λ_{su} bezpečné nedetekované poruchy; - λ_{dd} nebezpečné detekované poruchy; - λ_{du} nebezpečné nedetekované poruchy;					

Tab. 22: Vstupní data pro výstupní bariéru.

Příklad 21**Příklad 22 Systém ovládání ventilu -V1**

Pneumatické ventily pro bezpečnostní aplikace jsou na trhu již mnoho let. Jejich spolehlivost je relativně vysoká a definuje se zpravidla jako minimální počet cyklů přestavení, které ventil vydrží, pro běžné ventily se tato hodnota pohybuje mezi $1 \cdot 10^5$ až $1 \cdot 10^7$ (ve zvláštních případech ještě o řád výše). Četnost výskytu chyby je u ventilů určených pro aplikace až do úrovně SIL4 minimálně $1 \cdot 10^{-3}$ chyb za rok. Jelikož jsme nenalezli podrobnější informace, použijeme tuto hodnotu.

□ Určení architektury subsystémů

Při plánování architektury systému budeme postupovat následovně. Architekturu, pro komponenty, které jsou certifikovány podle IEC 61508 budeme navrhovat v souladu s pokyny výrobce. V materiálech výrobce bývá přímo definována informace o HW toleranci proti poruchám, případně je zde definován tzv. typ komponenty (typ A nebo typ B). Pomocí této informace ověříme HW odolnost komponenty, pro typ A podle Tab. 23, pro typ B podle Tab. 24.

Poměr bezpečných poruch SFF	Odolnost proti vadám hardware		
	0	1	2
< 60%	SIL1	SIL2	SIL3
60% < 90%	SIL2	SIL3	SIL4
90% < 99%	SIL3	SIL4	SIL4
≥99 %	SIL3	SIL4	SIL4

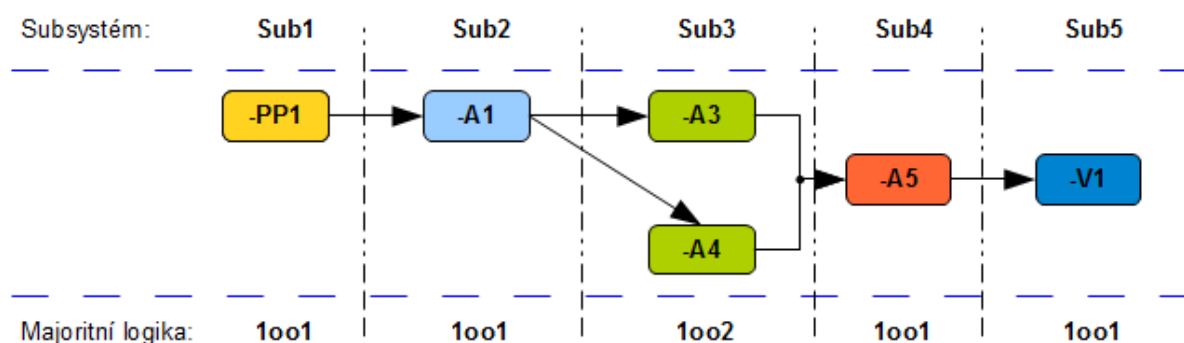
Tab. 23: Odolnost proti vadám hardware pro komponentu typu A

Poměr bezpečných poruch SFF	Odolnost proti vadám hardware		
	0	1	2
< 60%	Nedovolena	SIL1	SIL2
60% < 90%	SIL1	SIL2	SIL3
90% < 99%	SIL2	SIL3	SIL4
≥99 %	SIL3	SIL4	SIL4

Tab. 24: Odolnost proti vadám hardware pro komponentu typu B

Všechny komponenty kromě komparátoru jsou SIL certifikovány a to minimálně na SIL2. Tato informace nám v kontextu výše uvedených tabulek říká, že i když nemusíme znát přesné hodnoty SFF, stačí nám informace o SIL-certified. V případě komparátoru se jedná o komponentu typu B (nemá definovány všechny módy poruchy). Tab. 24 snadno zjistíme, že maximální úroveň realizovatelná touto komponentou je SIL1. Nicméně my vyžadujeme SIL2, pokud nahradíme nevyhovující zapojení 1oo1 zapojením 1oo2, hodnotu SFF sice nezměníme, ale změní se HW tolerance podle Tab. 24. Nyní máme HW toleranci 1, což při stejném SFF vede na SIL2.

□ Výpočet pravděpodobnosti selhání na vyžádání PFDSYS



Obr. 33: Blokové schéma bezpečnostního systému tlakového zásobníku

Na základě předchozí kapitoly, jsme získali systém uvedený na Obr. 33. Celý systém si rozdělíme ve smyslu literatury [2], Příloha B2 na pět samostatných subsystémů. Princip dělení je zřejmý jednak z Obr. 33, tak z postupu uvedeného v [2], Příloha B 2.1. V námi navrženém systému máme použité dva typy architektury 1oo1 a 1oo2.

Pro architekturu 1oo1 je uveden v [2], Příloha B 2.2.1 vztah (5.2). Pravděpodobnost selhání na vyžádání (PFD_{1oo1}), pro spolehlivé systémy kde platí $\lambda Dt_{CE} \ll 1$ je určena vztahem (5.2).

$$\begin{aligned} PFD_{1oo1} &= 1 - \exp(-\lambda_D \cdot t_{CE}) \\ PFD_{1oo1} &\approx \lambda_D \cdot t_{CE} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ekvivalentní doba prostoje kanálu je pak definována vztahem (5.3). Kde T_1 je definováno jako tzv. Interval kontrolní periodické zkoušky, $MTTR$ jako střední doba do zotavení, λ_{DU} jsou nedetekované nebezpečné poruchy, λ_{DD} detekované nebezpečné poruchy a $\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU}$.

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR \quad (5.3)$$

Pokud dosadíme vztah (5.3) do vztahu (5.2) úpravou získáme vztah (5.4).

$$PFD_{1oo1} = \lambda_D \cdot \left[\frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR \right] = \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \lambda_{DD} \cdot MTTR \quad (5.4)$$

V našem případě je technologie součástí běžné šaržové výroby, kdy každý rok dochází k odstávce celé technologie. Při této příležitosti bude vždy provedena kompletní periodická zkouška systému, viz následující text. Proto bude $T_1 = 8760$ hod. Jelikož se nejedná o důležitou část technologie, budeme dále uvažovat, že v případě, kdy se v systému objeví detekovaná nebezpečná porucha, můžeme okamžitě zahájit její odstranění. Dobu potřebnou k odstranění této poruchy odhadneme na $MTTR = 8$ hod. V této době je zahrnuta jak mobilizace personálu, nalezení závady, tak i provedení opravy. Ze zadaných parametrů je nyní zřejmé, že pro vztah (5.4) bude platit podmínka (5.5).

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_{DU} \cdot T_1}{2} &\gg \lambda_{DU} \cdot MTTR \\ \frac{\lambda_{DU} \cdot T_1}{2} &\gg \lambda_{DD} \cdot MTTR \end{aligned} \quad (5.5)$$

Proto můžeme s určitou ztrátou přesnosti vztah upravit zanedbáním členů v podmínce (5.5) na tvar (5.6). Výsledky pro komponenty realizované v architektuře 1oo1 jsou uvedeny v Tab. 25.

$$PFD_{1001} = \frac{\lambda_{DU} \cdot T_1}{2} \quad (5.6)$$

V případě architektury 1002, označme pravděpodobnost selhání na vyžádání indexem 1002 (tedy PFD_{1002}). V tomto případě se bude jednat o dvoukanálovou architekturu. Zdroj [2] udává pro výpočet PFD vztah (5.7). Vzhledem k tomu, že se jedná o dvoukanálovou architekturu je nutné námi navrhovaný systém posoudit z pohledu vlivu poruchy se společnou příčinou. Pod pojmem porucha se společnou příčinou rozumíme příčinu, která může mít vliv na oba kanály. Jelikož pro náš demonstrační příklad nejsou jasně definovaná data, na základě kterých by bylo možné takovéto posouzení vypracovat, pokusíme se je odhadnout. Odhad provedeme jako nejhorší možný, ve smyslu Tabulky D.4 uvedené v [2]. Nejhorší možnou variantou je $\beta = 5\%$, přičemž pro β_D budeme uvažovat, že platí vztah (5.7).

$$\beta_{\%} = 2 \cdot \beta_{D\%} \Rightarrow \beta_{D\%} = \frac{\beta_{\%}}{2} = \frac{5}{2} = \underline{\underline{2,5}} \text{ (}\% \text{)}$$

$$PFD_{1002} = 2 \cdot \left[(1 - \beta_D) \cdot \lambda_{DD} + (1 - \beta) \cdot \lambda_{DU} \right]^2 \cdot t_{CE} \cdot t_{GE} + \beta_D \cdot \lambda_{DD} \cdot MTTR +$$

$$+ \beta \cdot \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) \quad (5.7)$$

$$t_{CE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{2} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$$

$$t_{GE} = \frac{\lambda_{DU}}{\lambda_D} \cdot \left(\frac{T_1}{3} + MTTR \right) + \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_D} \cdot MTTR$$

Pokud máme k dispozici všechna data pro jednotlivé subsystémy, můžeme celkové PFD_{SYS} určit pomocí vztahu (5.8). Výsledky jednotlivých výpočtů jsou uvedeny v přehledné formě v Tab. 25.

$$PFD = PFD_{sub1} + PFD_{sub2} + PFD_{sub3} + PFD_{sub4} + PFD_{sub5} \quad (5.8)$$

□ Kontrolní zkouška

V předchozí části jsme definovali pojmy periodická kontrolní zkouška T_1 a střední dobu do zotavení pro jednotlivé kanály MTTR. Jak tyto dva parametry ovlivňují celkovou pravděpodobnost selhání na vyžádání je patrné ze vztahů: (5.7) a (5.8).

Nutným předpokladem, na kterém stojí celý předcházející výpočet je, že všechny nedetekované poruchy objevíme touto zkouškou. Proto je nutné v rámci této zkoušky provést jak kontrolu funkce jednotlivých přístrojů, tak i kontrolu jejich propojení (kabeláže), apod. Informace ohledně tzv. nedokonalé kontrolní zkoušky v [2], Příloha B.2.5. Pro tlaková čidla by bylo vhodné, pro připojení k tlakové nádobě použít vhodnou tlakovou soupravu, která nám umožní jejich ověření bez demontáže. Pro pojistný ventil -V1 bude vhodné vybavit ho koncovými spínači, které budou signalizovat dosažení koncových poloh. Komparátor bude ověřován pomocí externího zdroje signálu 4-20mA, pro zjištění chyby měření. Navíc by bylo vhodné provést kontrolu izolačního stavu přírodních kabelů a důkladnou vizuální prohlídku. Oddělovací členy budeme testovat pomocí proudového generátoru 4-20mA (budeme měřit diferenci dvou vstupních hodnot).

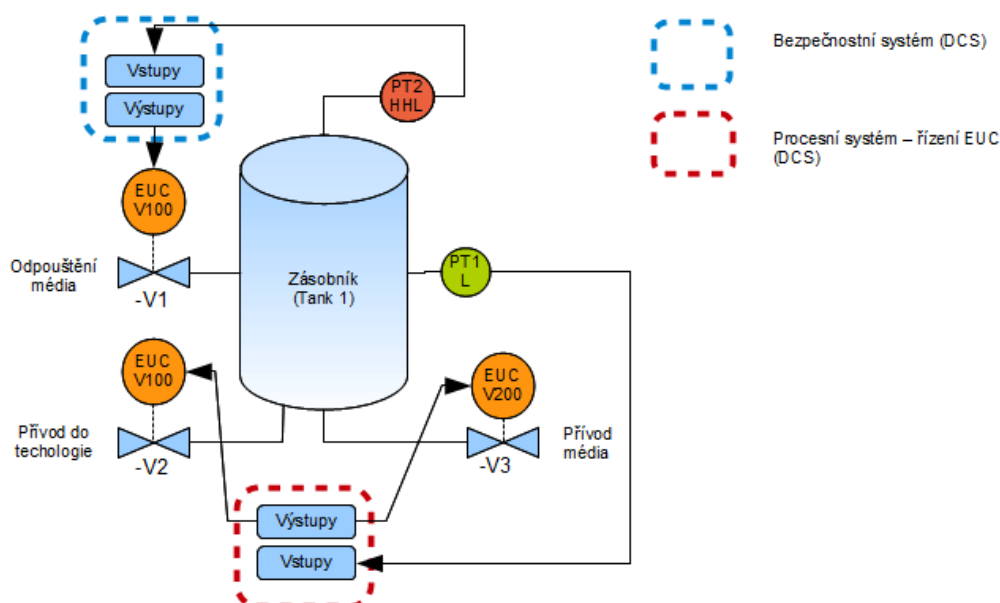
□ Výsledné hodnoty

Parametr/komponenta	Čidlo tlaku	Bariéra	Analogový komparátor	Bariéra	Ventil
Architektura	1001	1001	1002	1001	1001
HW tolerance	0	0	1	0	0
λ_{du} (p/rok)	6,53E-08	1,70E-09	5,60E-09	4,40E-09	1,00E-07
λ_{dd} (p/rok)	1,56E-08	2,10E-08	0,00E+00	0,00E+00	
MTTR (hod.)	8	8	8	8	8
T_1 (hod.)	8760	8760	8760	8760	8760
β (%)	0	0	0,1	0	0
t_{CE} (hod.)	3,54E+03	3,36E+02	4,39E+03	4,39E+03	4,39E+03
t_{GE} (hod.)	0,00E+00	0,00E+00	2,93E+03	0,00E+00	0,00E+00
PFD_i	2,86E-04	7,45E-06	2,46E-06	1,93E-05	4,38E-04
PFD_{sys}	7,53E-04				

Tab. 25: Výsledné hodnoty pro příklad tlakového zásobníku

16.3. 5.2 Technologie tlakového zásobníku s řídicím systémem

Nyní uvažme příklad obdobný předchozímu příkladu tlakového zásobníku. Pouze se pokusíme řešení rozšířit o hledisko bezpečnosti software. Technologické schéma uvažované technologie je uvedeno na Obr. 34. Nicméně zahrnutí hlediska software dokáže výpočet podstatně zkomplikovat.



Obr. 34: Technologie tlakového zásobníku se software částí.

□ Analýza rizik

Vzhledem k tomu, že se jedná o technologii obdobnou předchozímu příkladu, použijeme hodnoty vypočtené pro předchozí příklad. Požadované snížení rizika tedy bude o hodnotu:

$$PFD_{avg} = \frac{F_t}{F_{np}} = \frac{8760 \cdot 10^{-5}}{8760 \cdot 10^{-3}} = 1 \cdot 10^{-2} \quad (5.9)$$

Tato hodnota stejně jako v předchozím případě tedy odpovídá požadavku na SIL2.

□ Popis funkce

Nyní se pokusme popsat funkci systému uvedeného na Obr. 34. Jedná se o technologii napouštění tlakového média do nádoby a jeho přepouštění podle potřeb technologie. Napouštění je ovládáno pomocí ventilu V_3 , hlídání vnitřního tlaku zásobníku je pomocí snímače PT_1 . Vypouštění média do technologie se ovládá ventilem V_2 na základě informace o tlaku nádoby (tedy zda bylo dosaženo požadovaného tlaku). Snímač PT_2 slouží jako tzv. high-high-level, tedy tlak v nádobě je velmi-velmi-vysoký. V praxi to znamená, že tlak je tak velký, že je nutné aktivovat bezpečnostní funkci, která ho sníží. Neboť další růst tlaku už by měl katastrofické následky (explozi nádoby).

□ Popis hardware struktury systému.

Jako ventily pro napouštění / vypouštění média použijeme proporcionální ventily ovládané signálem 4-20 mA. Snímače tlaku budou mít stejně jako v předchozím případě unifikovaný výstup 4-20 mA. Jako řídicí systém použijeme univerzální DCS od firmy ABB. Jak je patrné z technologického schématu bude nutné toto DCS vybavit jednou kartou analogových vstupů a jednou kartou analogových výstupů. Přesná konfigurace není až tak rozhodující, neboť se jedná pouze o modelový příklad. V praxi je řešení těchto příkladů nutné podmínit vstupním údajům o řídicím systému.

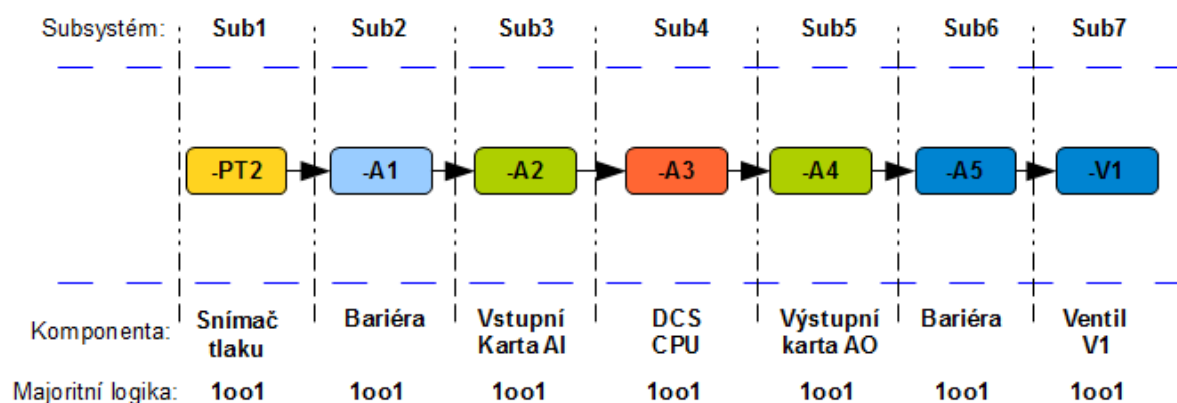
□ Definování bezpečnostní funkce

Uvažovaná bezpečnostní funkce bude mít dvě zcela oddělené části. První část budeme nazývat procesní a bude ji představovat běžné napouštění a vypouštění média, bude tedy realizována ventily V_2 a V_3 společně se snímačem tlaku PT_1 . Tato funkce bude realizována pomocí samostatného DCS systému dle potřeb technologie. Druhá část bude tvořena ventilem V_1 , snímačem tlaku PT_2 a v následujícím textu ji budeme označovat jako ESD systém (tedy samostatným SIS). Systém ESD bude zcela nezávislý na procesní části (samostatný kontrolér, kabeláž, apod.).

□ Výpočet pravděpodobnosti selhání pro hardware

Postup bude obdobný jako v předchozím případě pouze se nám celý systém „rozroste“ o řídicí systém. Do výsledného modelu tak bude nutné zapracovat i jednotlivé karty řídicího systému. Jak bylo uvedeno v předchozím textu, bezpečnostní funkce bude realizována pomocí tlakového snímače PT_2 , bariéry, vstupní karty, DCS (CPU), výstupní karty, bariéry a ventilu V_1 . Pořadí komponent

bude přesně odpovídat pořadí v tomto výčtu. Ostatní komponenty nebudou přímo součástí bezpečnostní funkce, ale budou tvořit samotné řízení procesu. Výsledné blokové schéma pro bezpečnostní funkci je na Obr. 35.



Obr. 35: Spolehlivostní model pro SIS tlakového zásobníku.

□ Popis jednotlivých komponent:

V následujícím textu vynecháme popis pro komponenty, které jsou převzaty z předchozího příkladu. Tedy jmenovitě vynecháme: PT_2 , A_1 , A_5 a V_1 . Oproti tomu se zaměříme více na řídicí systém.

Příklad 23 Vstupní AI karta:

Jak jsme avizovali v úvodu, bude se jednat o analogové vstupy 4-20mA. Vzhledem k použitému systému se bude jednat o modulární koncept. Pod pojmem modulární si je možné představit systém, který je stavebnicového konceptu, kdy je jedna tzv. patice použitelná pro určité množství vstupních karet. Z pohledu řešeného příkladu budou tedy prvky A_2 na Obr. 35 tvořeny patičí a samotnou kartou. Výrobce tedy fy ABB udává hodnotu spolehlivostních parametrů již pro celou tuto kombinaci. Navíc spolehlivostní parametry rozšiřuje i o konkrétní hodnotu PFD případně PFH v kombinaci s úrovní vlastností pro kterou jsou určeny. Jak bylo avizováno, v předchozím textu může být u programovatelné elektroniky SFF poměrně vysoké (v našem případě 99,68%). Proto je karta určena v normální kombinaci pro SIL3 a v redundantní kombinaci pro SIL4 (redundancí se zvýší HW tolerance poruch podle Tab. 24).

Poznámka

V současné době se lze u bezpečnostních řídicích systémů setkat s tzv. technologií HART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol). Jedná se o použití komunikačního protokolu pro signály 4-20mA. Celá komunikace 4-20mA pak získá jakousi elementární inteligenci, kdy jednotlivá zařízení mají vlastní adresu a mohou kromě měřené hodnoty přenášet i informace o svém stavu. Hlavní výhody jsou tedy, rozšíření možností přenášených informací a možnost připojit několik zařízení na jeden vstup/výstup řídicího systému.

Příklad 24 Řídicí systém

Z pohledu použitého řídicího systému budeme volit tzv. HI (high integrity) systém. Jedná se o komponentu certifikovanou až do úrovně SIL2/SIL3, opět v závislosti na HW toleranci poruch. SFF udávané výrobcem bude ještě vyšší než v případě AI karty, konkrétně 99,9%.

Příklad 25 Výstupní AO karta

Výstup bude opět v podobě unifikovaného signálu 4-20mA. Opět platí, že fyzicky je blok A4 reprezentován použitou patičkou a samotnou kartou. Spolehlivostní údaje jsou výrobcem opět zadány pro obě komponenty společně. Celá komponenta je certifikována pro SIL2/SIL3, opět v závislosti na HW toleranci poruch. Rovněž disponujeme informací o PFD a PFH systému s celkovým SFF=99,68%.

□ Výpočet celkových parametrů systému

Celou úlohu budeme řešit pro režim s nízkým vyžádáním, tedy pro parametr PFD. Použité vztahy jsou stejné jako v předchozím případě. Nebudeme je zde proto znovu dlouze vypisovat, ale budeme se na ně pouze odvolávat.

Celý systém je realizován v jednonábové architektuře. Nejprve definujeme parametry T_1 a MTTR. MTTR odhadneme na 8 hodin, kdy budeme předpokládat, že je k dispozici dostatečný počet opravárenských čt a náhradních dílů. T_1 definuje čas po kterém je provedena komplexní kontrolní zkouška systému tzv. proof test. Budeme tedy uvažovat interval do této zkoušky cca. 1 rok (tedy 8760 hodin).

Vyžádání bezpečnostní funkce budeme předpokládat 1x za rok. Což vzhledem na omezenou životnost celé technologie bude nutně znamenat režim provozu s tzv. „nízkým vyžádáním“. Cílovým parametrem proto bude hodnota PFD celého systému. Tuto hodnotu určíme stejně jako v předchozím příkladu pomocí vztahu (5.2), při splnění podmínky (5.3). Výsledné hodnoty pro jednotlivé komponenty jsou pak uvedeny v Tab. 26.

Parametr/komponenta	Čidlo tlaku	Bariéra	Karta AI	Kontrolér DCS CPU	Karta AO	Bariéra	Ventil
Architektura	1001	1001	1001	1001	1001	1001	1001
HW tolerance	0	0	0	0	0	0	0
λ_{du} (p/rok)	6,53E-08	1,70E-09	1,54E-10	5,74E-09	1,34E-08	4,40E-09	1,00E-07
λ_{dd} (p/rok)	1,56E-08	2,10E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
MTTR (hod.)	8	8	8	8	8	8	8
T_1 (hod.)	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
β (%)	0	0	0	0	0	0	0
t_{CE} (hod.)	3,54E+03	3,36E+02	4,39E+03	4,39E+03	4,39E+03	4,39E+03	4,39E+03
t_{GE} (hod.)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
PFD_i	2,86E-04	7,45E-06	6,75E-07	2,51E-05	5,87E-05	1,93E-05	4,38E-04
PFD_{SYS}	8,35E-04						

Tab. 26: Hodnoty pro příklad tlakového zásobníku (část hardware).

PFD celého systému z jednotlivých dílčích PFD_i vypočteme pomocí vztahu (5.8). Pouze s uvažováním rozšíření o členy respektující řídicí systém. Výsledná hodnota v podobě PFD_{sys} je pak uvedena v Tab. 26.

□ Posouzení software

Při posouzení software se v rámci IEC 61508 používá kvalitativní metoda založená na řadě doporučených technik / opatření. Jedná se o velmi komplikovanou problematiku, k jejímuž zvládnutí je nutné znát základy tvorby software a konstrukční požadavky příslušné profese (zejména elektronika / elektro). Proto se jí zde nebudeme zabývat do detailů, ale zaměříme se spíše na praktické souvislosti.

Na trhu existuje celá řada výrobců, kteří dodávají hardware pro systémy DCS, nebo PLC s certifikací na určitou úroveň SIL. Pokud volíme tento certifikovaný hardware, splníme zejména požadavky řešené v předchozí části tohoto příkladu. Nicméně prakticky každý výrobce dodává i softwarové nástroje pro programování takovýchto systémů.

Použití těchto nástrojů nám umožní splnit požadavky na software, bez toho aniž bychom museli provádět podrobnou analýzu požadavků uvedených v IEC 61 508, Příloha A a B. Tyto nástroje totiž disponují celou řadou postupů, které zajišťují kvalifikovaný přístup k řešení při respektování požadavků na konkrétní úroveň integrity bezpečnosti. Mezi tyto nástroje patří zejména certifikované knihovny bloků (časovače, čítače, apod.), které prošli důkladným ověřením před začleněním do výsledného nástroje.

Z dalších požadavků, jejichž splnění zajišťuje použitý aplikační software lze uvést například omezení délky kódu, použitých datových typů, cyklů, autodiagnostiku, apod. V praktických úlohách nám proto stačí použít odpovídající software v souladu s pokyny dodavatele a automaticky lze předpokládat, že budou splněny všechny požadavky IEC 61 508 a souvisejících předpisů. Pro náš příklad budeme předpokládat právě toto „zjednodušení“ tedy použití odpovídajícího aplikačního software, programovacího jazyka a dodržení pokynů výrobce. Přehled technik a opatření, uvažovaných pro náš příklad je uveden v Tab. 27. Význam údajů uvedených v této tabulce je následující:

- Celá tabulka je rozdělena podle jednotlivých fází plánování životního cyklu celkové bezpečnosti na devět částí.
- **Odkaz:** jedná se o odkaz na přílohy A, B a C uvedené v IEC 61 508-3.
- **SILx:** jsou zde uvedeny požadavky na použití konkrétní techniky / opatření. Uvedené jsou požadavky na SIL2 a SIL3. Pro náš příklad je sice cílová hodnota SIL2, ale jak bylo uvedeno v předchozím textu je systém v redundantní konfiguraci použitelný i pro SIL3. Čtenář tak může porovnat rozdíl v požadavcích mezi oběmi možnými úrovněmi. Význam písmen v těchto polích je následující:
 - a. *H* – technika / opatření je doporučeno pro použití v konkrétní úrovni SILu. Pokud se uvedená technika / opatření nepoužije, je nutné provést důkladnou analýzu vlivu na celý systém a zdůvodnit její nepoužití.
 - b. *HR* – technika / opatření je velmi doporučeno pro použití v konkrétní úrovni SILu. Vynechání této techniky / opatření není možné.

Specifikace požadavků bezpečnosti software			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Prostředky specifikace pomocí počítače	B.2.4	R	HR
Poloformální metody	Tabulka B.7	R	HR
Formální metody včetně např. CCS, CSP, HOL, LOTOS, OBJ, dočasná logika (temporal logic), VDM a Z	C.2.4	R	R
Návrh a vývoj softwaru: architektura softwaru			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Zjišťování a diagnóza vad	C.3.1	R	HR
Detekční a samoopravné kódy	C.3.2	R	R
Programování s ověřováním předpokládaných poruch (failure assertion programming)	C.3.3	R	R
Řízené zhoršení vlastností	C.3.11	NR	NR
Oprava vad s využitím technik umělé inteligence	C.3.12	NR	NR
Dynamická rekonfigurace	C.3.13	NR	NR
Poloformální metody	Tabulka B.7	R	HR
Prostředky specifikace pomocí počítače	B.2.4	R	HR
Návrh a vývoj softwaru: podpůrné prostředky a programovací jazyk			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Vhodný programovací jazyk	C.4.6	HR	HR
Programovací jazyk s přísnou kontrolou typů	C.4.1	HR	HR
Jazykový podsoubor	C.4.2	HR	HR
Ověřené (s osvědčením) prostředky	C.4.3	HR	HR
Knihovna důvěryhodných/ověřených softwarových modulů a komponent	C.4.5	HR	HR
Návrh a vývoj softwaru: podrobný návrh			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Poloformální metody	Tabulka B.7	HR	HR
Prostředky návrhu pomocí počítače	C.3.5	R	HR
Defenzivní programování	C.2.5	R	HR
Modulární přístup	Tabulka B.9	HR	HR
Pravidla pro návrh a kódování	Tabulka B.1	HR	HR
Strukturované programování	C.2.7	HR	HR
Použití důvěryhodných/ověřených softwarových modulů a komponent (jsou-li k dispozici)	C.2.10 C.4.5	HR	HR
Návrh a vývoj softwaru: začlenění a zkoušení softwarových modulů			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Pravděpodobnostní zkoušky	C.5.1	R	R
Dynamická analýza a zkoušky	B.6.5	HR	HR

Záznam a analýza dat	C.5.2	HR	HR
Funkční zkoušky a zkoušky typu „černé skříňky“	B.5.1 B.5.2 Tabulka B.3	HR	HR
Funkční modelování	C.5.20 Tabulka B.6	R	HR
Zkoušky rozhraní	C.5.3	R	HR
Začlenění programovatelné elektroniky (hardwaru a softwaru)			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Funkční zkoušky a zkoušky typu „černé skříňky“	B.5.1 B.5.2 Tabulka B.3	HR	HR
Funkční modelování	C.5.20 Tabulka B.6	R	HR
Potvrzení platnosti bezpečnosti softwaru			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Pravděpodobnostní zkoušky	C.5.1	R	R
Simulace/modelování	Tabulka B.5	R	HR
Funkční zkoušky a zkoušky typu „černé skříňky“	B.5.1 B.5.2 Tabulka B.3	HR	HR
Ověření softwaru			
Technika / opatření	Odkaz	SIL2	SIL3
Formální zkouška	C.5.13	R	R
Pravděpodobnostní zkoušky	C.5.1	R	R
Statická analýza	B.6.4 Tabulka B.8	HR	HR
Dynamická analýza a zkoušení	B.6.5 Tabulka B.2	HR	HR
Komplexní metrika	C.5.14	R	R

Tab. 27: Požadavky na software z pohledu použitých technik / opatření.

Závěrem této části věnujme pozornost hloubce zjednodušení, kterou jsme aplikovali na posuzování softwarové části řešeného příkladu. Předně v Tab. 27 jsou vynechány techniky / opatření požadované ve fázi modifikace a zdokonalování. Pokud bychom uvažovali o provádění činností v těchto fázích, bylo nutné je do této tabulky doplnit. Dále by bylo nutné vypracovat odpovídající plán začleňování software do E/E/PES ve smyslu IEC 61 508-3, splnit podmínky nezávislosti, definovat průběhy testů (např. FAT), zodpovědnost jednotlivých osob řešitelského týmu, apod. Proto je nutné mít na paměti, že v rámci tohoto příkladu jsme provedli pouze velmi omezené množství činností nutných k celkové realizaci systému E/E/PES.

□ Kontrolní zkouška

Tak jako v předchozím případě bude nutné určit parametry a rozsah periodické kontrolní zkoušky. Interval periodické zkoušky jsme stanovili na 1 rok. Po této době bude nutné technologii na 8 hodin odstavit. Požadavky na rozsah periodické zkoušky jsou obdobné jako v předchozím příkladu. Tedy ventily by bylo vhodné k tlakové nádobě připojit přes odpovídající tlakovou soupravu, aby bylo možné jejich ověřování

bez demontáže. V rámci zkoušky bude pak nutné provést ověření senzoru tlaku PT2. Nejjednodušší metodou bude využití proudového generátoru 4-20mA v kombinaci s kalibrovaným ampérmetrem.

Součástí zkoušky bude muset být i detailní prověření propojení jednotlivých komponent jakožto i vizuální kontrola všech rozpojitelných spojů (svorkovnic). Při specifikaci požadavků na kontrolní zkoušku je důležité mít na paměti, že po provedení této zkoušky je technicky zařízení považováno za nové. Proto je nutné, aby zkouška byla komplexní a prováděna podle kvalifikovaného plánu.



Shrnutí pojmů

- | | |
|----------------------|----------------------------------|
| ✓ tlakový zásobník, | ✓ úroveň integrity pro hardware, |
| ✓ snímač tlaku, | ✓ úroveň integrity pro software, |
| ✓ výpočet PFD, | ✓ E/E/PE, |
| ✓ architektura 1oo1, | ✓ E/E/PES. |
| ✓ architektura 1oo2, | |



Otázky

9. Definujte rozdíl mezi E/E/PE a E/E/PES.
10. Vysvětlete oblast použití cílového parametru PFD a PFH. V čem se tyto parametry liší?
11. Vyhledejte na internetu alespoň dva různé výrobce DCS systémů pro bezpečnostní aplikace.
12. Pomocí internetu se pokuste nalézt spolehlivostní data pro základní bezpečnostní komponenty (ventily, senzory, relé, stykače, bariéry, apod.). Zamyslete se nad tím, zda by vámi získaná data byla dostatečná pro použití v bezpečnostních aplikacích.
13. Definujte rozsah a parametry kontrolní zkoušky (tzv. proof test).



Další zdroje

IEC 61 508-1 až IEC 61 508-7

17 Literatura

- [1] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-1, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 1: Všeobecné požadavky, 2011.
- [2] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-6 Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 6: Metodické pokyny, 2011.
- [3] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-2, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 2: Požadavky na elektrické/elektronické/programovatelné elektronické systémy související s bezpečností, 2011.
- [4] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-5, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 5: Příklady metod určování úrovní integrity bezpečnosti, 2011.
- [5] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-3, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 3: Požadavky na software, 2011.
- [6] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-4, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 4: Definice a zkratky, 2011.
- [7] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61508-4, Funkční bezpečnost elektrických/elektronických/programovatelných elektronických systémů souvisejících s bezpečností-Část 7: Přehled technik a opatření, 2011.
- [8] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61 511-1, Funkční bezpečnost - Bezpečnostní přístrojové systémy pro sektor průmyslových procesů - Část 1: Požadavky na systémy hardwaru a softwaru, struktura, definice,
- [9] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61 511-2, Funkční bezpečnost - Bezpečnostní přístrojové systémy pro sektor průmyslových procesů - Část 2: Metodický pokyn pro používání IEC 61511-1
- [10] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61 511-3, Funkční bezpečnost - Bezpečnostní přístrojové systémy pro sektor průmyslových procesů - Část 3: Pokyn pro stanovení požadované úrovně integrity bezpečnosti, 2005

-
- [11] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 62 061, Bezpečnost strojních zařízení - Funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických řídicích systémů souvisejících s bezpečností, 2011
- [12] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN ISO 13849-1, Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci, 2014
- [13] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61 800-5-1-ed. 2, Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí - Část 5-1: Bezpečnostní požadavky - Elektrické, tepelné a energetické, 2008
- [14] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, ČSN EN 61 800-5-2, Systémy elektrických výkonových pohonů s nastavitelnou rychlostí - Část 5-2: Bezpečnostní požadavky – Funkční, 2008

18 Zkratky

Zkratka	Význam
PFH _D	pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu
SFF	podíl bezpečných poruch (resp. selhání)
T ₁	interval kontrolního testu
T ₂	interval diagnostického testu
β	tendence k selhání se společnou příčinou
DC	diagnostické pokrytí
MTTF _d	střední doba do nebezpečné poruchy
HW	hardware
SIL	úroveň integrity bezpečnosti
SIL _{CL}	omezení architektury
PDS	bezpečnostní funkce
E/E/PE	elektrický/elektronický/programovatelný elektronický
STO	bezpečné vypnutí točivého momentu
SS1	bezpečné zastavení 1
SS2	bezpečné zastavení 2
SOS	bezpečné provozní zastavení
SLA	bezpečné omezené zrychlení
SAR	bezpečný rozsah zrychlení
SLS	bezpečná omezená rychlost
SSR	bezpečný rozsah rychlosti
SLT	bezpečné omezený moment
STR	bezpečný rozsah momentu
SLP	bezpečně omezená poloha
SLI	bezpečně omezený přírůstek
SDI	bezpečný směr
SMT	bezpečná teplota motoru
SBC	bezpečné ovládání brzdy
SCA	bezpečná vačka
SSM	monitor bezpečné rychlosti
PLC	programovatelná logická řídicí jednotka
DCS	distribuovaný řídicí systém
BP	British Petroleum
EUC	řízené zařízení
SIS	bezpečnostní přístrojový systém
CIB	celková integrita bezpečnosti
ALARP	"as low as reasonably practicable" nejmenší rozumně použitelný
C _{1...n}	následek nebezpečné události
F _{1...n}	četnost a doba vystavení v nebezpečné oblasti
P _{1...n}	možnost vyhnout se nebezpečné události
W _{1...n}	pravděpodobnost nežádoucího výskytu
F _{np}	četnost vyžádání ochranného systému (tedy četnost

	nebezpečné události);
F_t	četnost přípustného rizika;
F_p	četnost rizika po realizaci ochranných opatření,
R_{np}	riziko procesu
R_t	riziko po aplikaci ochranných opatření
LC	fáze životního cyklu celkové bezpečnosti
E/E/PES	elektrický/elektronický/programovatelný elektronický systém
PFD	pravděpodobnost nebezpečné chyby na vyžádání
PFD_s	pravděpodobnost nebezpečné chyby na vyžádání celého systému
CCF	společná porucha, porucha se společnou příčinou
MTTR	střední doba obnovy
ESD	samostatný bezpečnostní přístrojový systém
CPU	procesor, mikroprocesor
HI	vysoká úroveň integrity
FAT	přejímací zkouška ve výrobě