

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STROJNÍ



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2021

TOMÁŠ
VOTROUBEK



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Votroubek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **478249**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Identifikace rizik fotovoltaických elektráren v ČR

Název bakalářské práce anglicky:

Identification of risks of photovoltaic power plants in the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

Shrnout poznatky o fotovoltaike a provozu fotovoltaických elektráren. Popsat vztah mezi riziky a bezpečností technických děl. Vytvořit databázi havárií fotovoltaických elektráren v ČR. Údaje v databázi zpracovat statistickými metodami a vybrané případy metodou What, If. Návrh obsahu práce: Souhrn poznatků o fotovoltaike a provozu fotovoltaických elektráren: Fotoelektrický jev; Fotovoltaiický článek; Charakteristika solárních článků; Výroba fotovoltaiického panelu; Fotovoltaiická elektrárna. Rizika a bezpečnost - teorie. Data o haváriích fotovoltaických elektráren. Metoda zpracování dat – What, If. Výsledky. Seznam použité literatury.

Seznam doporučené literatury:

A.F. Herwani, J. A. Usmani: Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010, 14(1), pp. 540-544. // A. Toppato: Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation. Energy. 2008, 33(2), 224-232. DOI: 10.1016/j.energy.2007.11.012. // J. Procházka: Úvod do optoelektroniky. Praha: ČVUT 2015, 70 p. // K. Vrbková, D. Procházková: Příčiny požárů fotovoltaických elektráren v České republice In: Řízení rizik procesů spojených s technickými díly. Praha: ČVUT 2019, pp. 293-300. // D. Procházková: Analýza a řízení rizik. ČVUT, Praha 2011, 405 p. // D. Procházková: Metody, nástroje a techniky pro rizikové inženýrství. ČVUT, Praha 2011, 369 p. // D. Procházková: Bezpečnost složitých technologických systémů. Praha: ČVUT 2015, 208 p. // P. Leger: Požár výrobní haly s fotovoltaickými panely na střeše. 112 (2020), 10, pp. 6-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. RNDr. Danuše Procházková, Dr.Sc., ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**

doc. RNDr. Danuše Procházková, Dr.Sc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení práce, je legální.

V Praze dne 11.6. 2021

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval paní doc. RNDr. D. Procházkové, DrSc. za přínosné konzultace, ochotu a četné rady při vedení práce.

Mé díky patří také paní kpt. Ing. H. Nedělníkové za poskytnutí řady podrobných údajů o požárech fotovoltaických elektráren.

Anotační list

Jméno autora:	Tomáš Votroubek
Název BP:	Identifikace rizik fotovoltaických elektráren v ČR
Anglický název:	Identification of risks of photovoltaic power plants in the Czech Republic
Akademický rok:	2020/2021
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	doc. RNDr. Danuše Procházková, DrSc.
Konzultant:	
Bibliografické údaje:	Počet stran: 41 Počet obrázků: 15 Počet tabulek: 2 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	fotovoltaické elektrárny, požáry, riziko, řízení rizika, bezpečnost
Keywords:	photovoltaic power plants, fires, risk, risk management, safety
Anotace:	Tato práce se zabývá riziky provozu fotovoltaických elektráren, primárně vznikem požárů. Má za cíl shrnout poznatky o fotovoltaiice, provozu fotovoltaických elektráren, rizicích a bezpečnosti technických děl ke kterým fotovoltaické elektrárny patří. Dále vytvořit databázi těchto požárů na území ČR, údaje dat zpracovat statistickými metodami a vybraný případ metodou What if.
Abstract:	This Bachelor's Theses focuses on risks of operating photovoltaic power plants, mainly on the risk of fire. Its goal is to summarize current knowledge of photovoltaics, operating photovoltaic power plants, risks and safety of technological work, to which photovoltaic power plants belong. Furthermore to create database of fires in Czech Republic, process data with statistical methods and chosen example with What if analysis.

Obsah

1	Úvod	9
2	Souhrn poznatků o fotovoltaice a provozu fotovoltaických elektráren.....	10
2.1	Fotovoltaický jev.....	10
2.2	Fotovoltaický článek	12
2.3	Charakteristika solárních článků.....	14
2.4	Výroba fotovoltaického panelu.....	16
2.5	Fotovoltaická elektrárna.....	18
3	Rizika a bezpečnost – teorie	20
3.1	Riziko a bezpečnost.....	20
3.2	Rizika a bezpečnost FV elektráren.....	23
4	Data o haváriích fotovoltaických elektráren.....	26
5	Metody zpracování dat	30
6	Výsledky.....	31
6.1	Statistické metody	31
6.2	Případová studie + Metoda What If.....	33
6.3	Opatření pro vylepšení projektu.....	35
7	Závěr.....	37
	Reference	38
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek	41

Seznam symbolů, indexů a zkratek

ČR – Česká republika

FV – fotovoltaický/á

FE – fotovoltaická elektrárna

FVE – fotovoltaická elektrárna

JPO – jednotky požární ochrany

PN – pozitivní negativní

P – pozitivní

N – negativní

MV – GŘ HZS ČR– Ministerstvo vnitra Generální ředitelství Hasičských záchranných sborů České republiky

W-I – What if – co když

B – počet vznikajících párů

D – důležitost posuzovaného prvku

FF – faktor zaplnění

G(x) – počet vznikajících párů za elektron-díra

K – kritičnost

I_{sc} – zkratový proud

x – vzdálenost od povrchu FV článku

W_g – energii pro překonání zakázaného pásu

W_v – nejvyšší možná energetickou hladinu pro elektron ve valenčním pásu

W_c – nejnižší možná energie pro udržení elektronu ve vodivostním pásu

Z – zranitelnost

Φ_0 – intenzita světla vstupujícího do materiálu

α – absorpční koeficient

λ – vlnová délka dopadajícího záření

V – volt

mV – millivolt

Wp – watt peak

eV – elektronvolt

mm – millimetr

μm – mikrometr

W/m^2 – watt na metr čtvereční

$^{\circ}\text{C}$ – stupeň Celsia

1 Úvod

S měnícím se společenským názorem docházelo v posledních 15 letech v Evropě, potažmo v některých dalších částech světa, k velmi vysokému rozvoji fotovoltaických systémů jako zdroje elektrické energie. V přepočtu instalované kapacity na obyvatele se Česká republika řadí v rámci EU k průměru [1]. Do budoucna bude na fotovoltaické systémy stále větší tlak, poněvadž mezi obnovitelnými zdroji energie jsou v České republice hlavní variantou [2], vzhledem k vyčerpanému potenciálu pro vodní elektrárny a omezenému a problematickému potenciálu větrných elektráren na našem území.

Navzdory jejich značným přínosům v řešení ekologických otázek, zejména vypouštění skleníkových plynů do atmosféry, mají fotovoltaické elektrárny, tak jako každý systém a každá technologie, mnoho vad a problémů spojených s jejich provozem.

Jedním z takových problémů je riziko požárů FV elektráren. Těm se musí v rámci snah o ochranu zdraví, majetku a společnosti věnovat patřičná pozornost. Normy pro návrh a provoz FV elektráren již byly částečně formulovány [3], ale praxe ukázala, že je třeba jejich další doplnění a rozšíření, vycházející ze získaných poznatků nových potřeb.

2 Souhrn poznatků o fotovoltaice a provozu fotovoltaických elektráren

2.1 Fotovoltaický jev

Fotovoltaický jev byl objeven v roce 1839 francouzským fyzikem Edmondem Becquerelem, který pozoroval generování elektrického napětí mezi osvětlenými elektrodami [4].

Při fotovoltaickém jevu dochází pohlcením dopadajících fotonů k předávání energie elektronům ve valenční vrstvě. Tím klesá intenzita světla se zvyšující se vzdáleností od povrchu podle vzorce

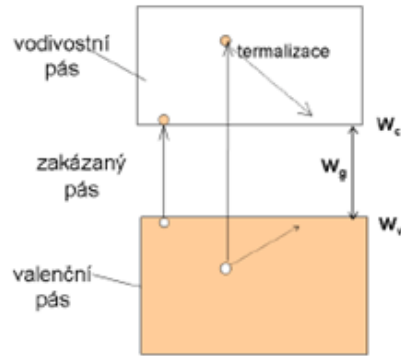
$$\phi(x) = \phi_0 \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

kde Φ_0 je intenzita světla vstupujícího do materiálu, x vzdálenost od povrchu a α představuje absorpční koeficient [4].

Pohlcením fotonů se zvýší střední kinetická energie volných elektronů a dojde ke zvýšení teploty. Pro materiály s kovalentní vazbou dostatečné zvýšení energie elektronu způsobuje jejich přeskok z valenční do vodivostní vrstvy [4].

Pro polovodičové materiály se tím ve valenční vrstvě vytváří prázdné místo, které nazýváme díra. Do těchto děr poté mohou přeskakovat elektrony sousedních atomů, čímž dochází k pohybu díry. Vzhledem k tomu, že se elektrony pohybují proti směru intenzity elektrického pole, se díra pohybuje v jeho směru. Tudíž lze díru charakterizovat jako částici s kladným nábojem [5]. Pro přeskok jednoho elektronu v atomu křemíku z valenční do vodivostní vrstvy je třeba energii 1,12 eV [6].

Při pohlcování fotonu s energií, která převyšuje energii potřebnou pro překonání zakázaného pásma, se přebytečná energie přemění na tepelnou energii. Tento jev se nazývá termalizace, schéma jevu je zobrazeno na obrázku 1, kde W_g je rovna energii potřebné pro překonání zakázaného pásu, W_v představuje nejvyšší možnou energetickou hladinu pro elektron ve valenčním pásu a W_c představuje nejnižší možnou energii pro udržení se ve vodivostním pásu [4].



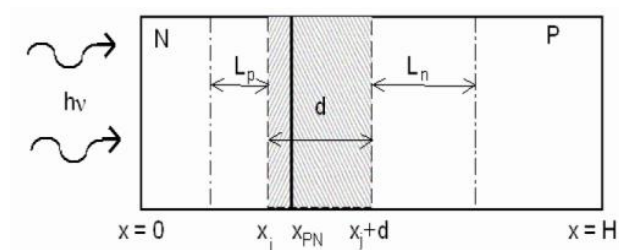
Obrázek 1. Princip FV jevu [4]

Generace párů elektron-díra je popsána vzorcem

$$G_{tot}(x) = \int_0^{\infty} G(\lambda; x) d\lambda = \int_0^{\infty} \alpha(\lambda) \beta(\lambda) \phi(\lambda; x) d\lambda, \quad (2)$$

kde β je počet vznikajících párů, λ je vlnová délka dopadajícího záření α je absorpční koeficient [4].

Pro využití fotovoltaického jevu je třeba vytvořit strukturu s vestavěným elektrickým polem, čímž dojde k zabránění rekombinace párů elektron-díra. Pro to se využívá PN přechod a heteropřechod (přechod na rozhraní dvou materiálů). Struktury oddělují elektrickým polem elektrony a díry jejich urychlováním do oblasti N, v případě elektronů, a do oblasti P v případě děr. Tímto způsobem dojde k jejich nabití, vytvoření napětí a po připojení zátěže k osvětlenému polovodiči prochází elektrický proud [4]. Na obrázku 2 lze vidět schéma funkce FV článku s částí P, do které jsou urychlovány díry, napravo, a částí N, do které jsou urychlovány elektrony, nalevo, oddělené přechodem o tloušťce d .



Obrázek 2. Princip funkce FV článku [4]

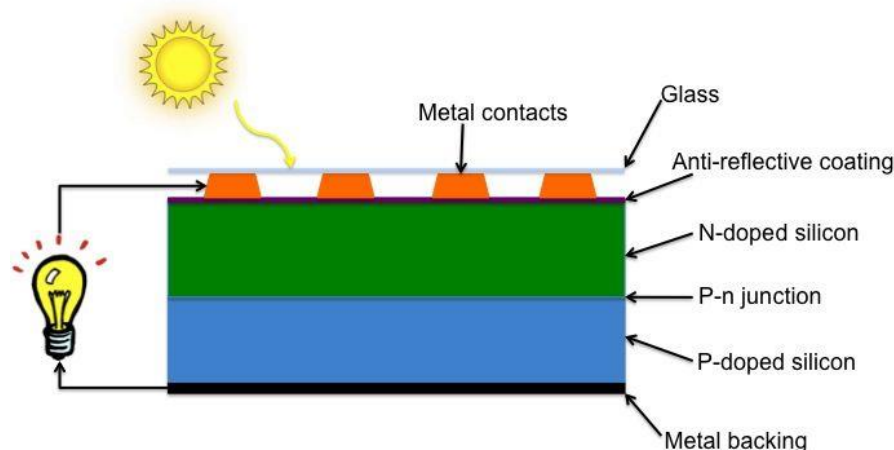
2.2 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka schopná transformovat energii světla na elektrickou energii. Fotovoltaický panel se skládá z více sériově zapojených fotovoltaických článků [5].

Fotovoltaický článek je plochá součástka obvykle ne větší než 200 mm a nepřesahující tloušťku 400 μ m, která má jeden nebo více PN přechodů. Ty generují po vystavení dostatečnému osvětlení stejnosměrný elektrický proud o velikosti úměrné intenzitě elektrického záření a napětí cca stovek mV [5].

Konstrukce článku je sendvičová. Hlavním prvkem je vrstva dopovaná na typ N, která je vrchní, aby byla ozářena světlem. Pod ní se nachází vrstva dopovaná na P. Na zadní straně je pokryta kovovým kontaktem, aby došlo k vytvoření obvodu. Vrchní vrstva je složitější, protože musí dojít k co nejmenšímu pokrytí, z důvodu co nejnižšího blokování světla. Proto je kontakt na N vrstvě proveden ve formě tenkých pruhů. Kontakty jsou vyráběny z niklu a mědi. Kvůli zvýšení výkonu je třeba, aby byl povrch N dopované vrstvy pokryt antireflexní vrstvou, poněvadž křemík jako takový je lesklý [6].

Konstrukce křemíkového článku je zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3. Schéma křemíkového článku [6]

Několik fotovoltaických článků je zapojeno do série, aby bylo využitelné napětí produkovaného elektrického proudu. Častou konfigurací, kterou můžeme vidět na obrázku 4, představuje sestava článků 4x9. Články jsou zapouzdřeny do modulu, který je chrání před vnějšími vlivy, především před korozí, a mechanickým poškozením. Krycí

vrstva musí vydržet krupobití a tepelné změny. Lze využít sklo, ale pouze kalené. Zadní strana může mít celou řadu podob. Od zasklení, přes nalaminovanou fólii, až po zalití do průhledných materiálů [5].



Obrázek 4. FV panel [7]

Fotovoltaický článek je omezen tzv. Shockley-Queisserovým limitem [8]. Ten stanovuje maximální účinnost jednoho článku na přibližně 30 %. Tento limit lze obejít využitím vícevrstevných článků. U dvouvrstevných článků je limit 42 %, u třívrstevných 49 % [8]. V praxi bylo zatím pro polykrystalický křemík dosaženo účinnosti 25 % u dvouvrstevných a 32 % u třívrstevných. U koncentrátorových článků vyrobených z monokrystalického křemíku to pak bylo 27,6 % s 92násobnou koncentrací světla a 43,5 % s třívrstevnými články [9].

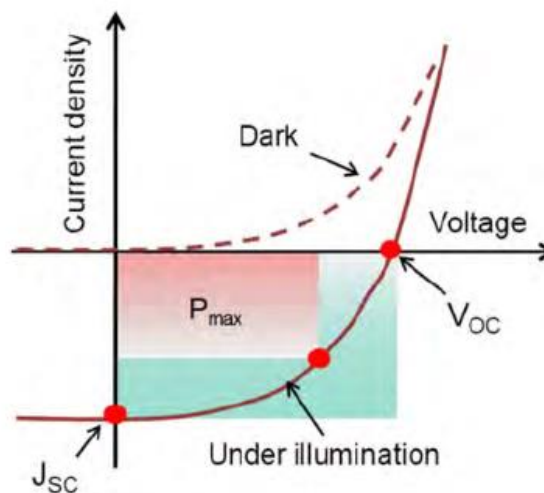
2.3 Charakteristika solárních článků

Důležitými parametry solárního článku jsou napětí na prázdko, proud na krátko, faktor zaplnění, účinnost a špičkový výkon [10]. Všechny jsou měřeny pro standardní podmínky. Ty jsou stanoveny jako intenzita záření 1000 W/m², spektrální šířka 1,5 a teplota článku 25 °C [10].

Napětí na prázdko, také nazývané svorkové napětí, je napětí na svorkách zapnutého zdroje, v tomto případě osvětleného článku, z něhož není odebírán proud. Představuje maximální dosažitelnou hodnotu napětí pro článek [11].

Proud na krátko je nejvyšší dosažitelný proud pro článek I_{sc} . Pro ideální článek se zanedbatelnými ztrátami je proud na krátko shodný s proudem generovatelným zachyceným světlem. Pro dosažení vysokého proudu na krátko je třeba materiál s vysokým koeficientem absorpce. Další důležité faktory ovlivňující zkratový proud jsou velikost článku, jeho optické vlastnosti a intenzita světla. Velikost zkratového proudu generovaného jedním článkem se pohybuje mezi jednotkami až desítkami ampér [6].

Faktor zaplnění FF vyjadřuje voltampérovou charakteristiku solárního článku. Její grafické znázornění můžeme vidět na obrázku 5.



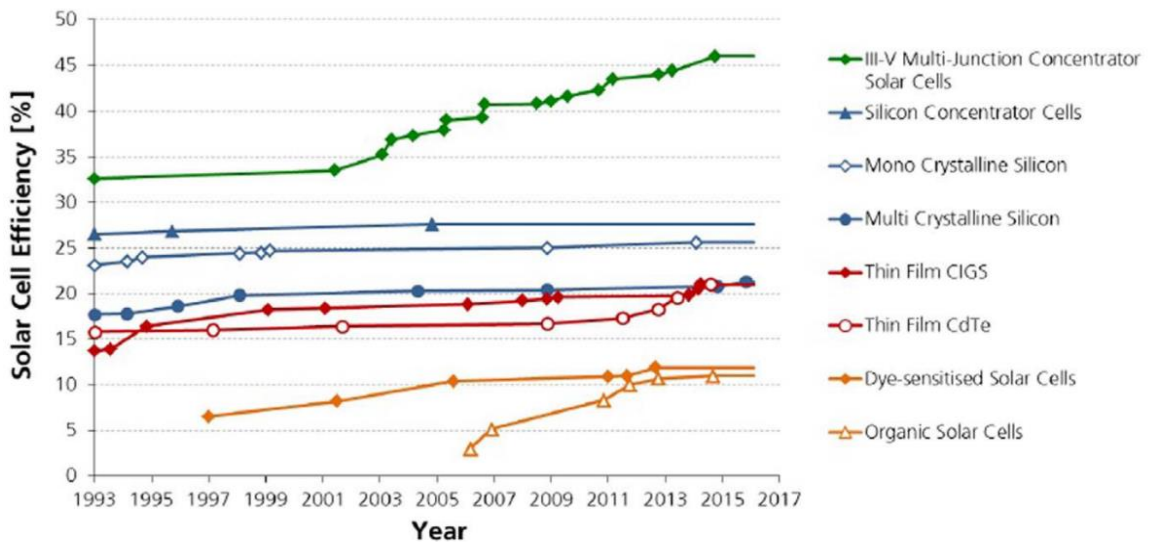
Obrázek 5. Voltampérová charakteristika FV článku [6]

Kvůli nestabilitě slunečního záření je třeba udávat výkon fotovoltaického panelu v tzv. Watt peaku [10]. Tato jednotka určuje výkon panelu při standardních podmínkách.

Ty jsou pro článek ideální a v praxi málokdy dosažitelné, W_p tak představuje nejvyšší možný výkon panelu [11].

Faktor konverze, označovaný také jako účinnost článku, představuje podíl maximální generované energie k působící fotovoltaické energii. Jako takový se jedná o nejdůležitější parametr [10].

I přes masivní podporu a rozvoj fotovoltaických systémů u hlavních technologií stoupá efektivita velmi pomalu, jak ukazuje graf na obrázku 6. Na něm můžeme také vidět, že stěžejní technologie monokrystalického křemíku dosahuje účinnosti již přes dvacet procent. Je však třeba mít na paměti, že tento graf vychází z laboratorních hodnot, nikoliv z hodnot průmyslově vyráběných článků.



Obrázek 6. Vývoj účinnosti FV článků [12]

2.4 Výroba fotovoltaického panelu

Na základě dostupnosti materiálu a zvládnutým výrobním technologiím je nejpoužívanějším materiálem pro fotovoltaické panely čistý křemík [12]. Ten může být buď v monokrystalické podobě, nebo v polykrystalické [12]. Nevýhodou jeho výroby je energetická a technologická náročnost, proto je snaha co nejvíce využívat odpadového materiálu z výroby jiných typů polovodičů. Zároveň probíhá výzkum zabývající se snížením ztrát při výrobě a zavedení energeticky méně náročných postupů [12]. Do křemíku je během výroby přidáno velmi malé množství bóru, který slouží pro vytvoření P-N přechodu [13].

V případě, že není použit odpadní křemík z výroby polovodičů, je třeba oxid křemičitý zredukovat na čistý křemík v obloukové peci. Poté dochází k dalšímu čištění směsí kyslíku a chloru [14].

Pro výrobu monokrystalického křemíku se používá Czochralskiho proces [13]. Ten spočívá v namáčení dlouhého zárodkového krystalu v roztaveném čistém křemíku. Výsledkem jsou dlouhé bloky, jež můžeme vidět na obrázku 7, využitelné pro výrobu integrovaných obvodů i pro fotovoltaické články. Monokrystalický křemík je výrazně lepší pro výrobu článku než polykrystalický, ovšem za cenu výrazně vyšších výrobních nákladů [13].



Obrázek 7. Blok krystalu křemíku [13]

Pro výrobu polykrystalického křemíku se používá Siemensova metoda [13] spočívající v tavení kousků křemíku a odlití a zchlazení, ne nepodobnému odlévání kovů.

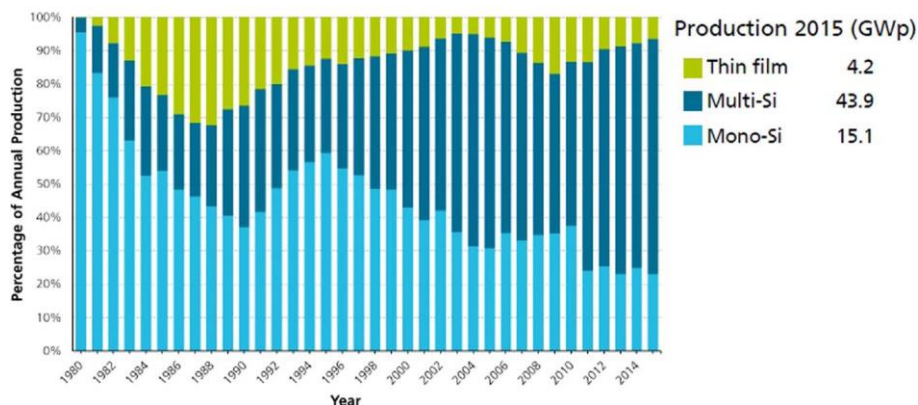
Články z křemíku dosáhly až 25% účinnosti, většina průmyslově vyráběných se však pohybuje okolo 16 % [13].

Materiálem pro špičkové aplikace, jakými jsou koncentrátorové články a solární panely pro využití v kosmu je galium arsenid. Takové články nabízejí velmi vysokou účinnost pohybující se kolem 30 %, což vyvažuje u vesmírných aplikací jejich vysokou cenu [13]. Koncentrátorový modul je postaven na zesílení slunečního záření pomocí čočky nebo zrcadla. Předmětné uspořádání umožňuje až 500násobnou koncentraci záření. Z důvodu vysoké ceny a nutnosti dopadu paprsků na čočku pod správným úhlem jsou koncentrátorové moduly natáčecí [13].

Ve snaze o snížení množství použitého materiálu došlo k rozvinutí technologie tenkého filmu. S tenkostí také souvisí vysoká flexibilita výsledného článku [12]. Pro výrobu tenkovrstvých článků se původně používal amorfni křemík. Dnes mezi materiály převládají kombinace kadmia a teluridu a kombinace mědi, india, galia a selenu. Uplatnění nalézá zejména ve spotřební elektronice a aplikacích na budovách [12].

Tato technologie je i přes stále vysokou cenu a malý podíl na trhu vnímaná jako jedna z těch nejperspektivnějších. V současnosti v Polsku po několika letech velmi úspěšného výzkumu začíná výroba tenkých FV panelů z masově tisknutých perovskitů [15]. Ta má potenciál výrazně snížit výrobní náklady a usnadnit instalaci na budovách [15].

Podíl jednotlivých technologií používaných od roku 1990 do roku 2015 pro konstrukci FV článků lze vidět na obrázku 8. Můžeme vidět, že v dobách, kdy FV elektrárny tvořily standardní součást klasické energetické sítě, se používali většinou články z monokrystalického křemíku, které mají vyšší účinnost, zároveň však vyšší cenu. Z obrázku vyplývá, že při nástupu masového využívání fotovoltaiky postupně převážila technologie polykrystalického křemíku.



Obrázek 8. Podíl technologií na produkci [12]

2.5 Fotovoltaická elektrárna

Fotovoltaické elektrárny se rozdělují primárně na ostrovní, off-grid systémy a na systémy s přímým dodáváním energie do rozvodné sítě (on grid). Dále je lze dělit na základě jich výkonu. Podle [6] se jako hranice považuje 10kWp. Zařízení s nižším výkonem jsou většinou malé soukromé instalace, často na střechách rodinných domů nebo budov malých firem a zařízení s větším výkonem jsou buďto rozsáhlé instalace na větších budovách, samostatně stojící elektrárny apod [6].

Nejjednodušším off-grid systémem je přímé napájení spotřebiče, který je tak v provozu pouze při dostatečné intenzitě slunečního záření. To má omezené, ale přesto praktické aplikace, např. při napájení zavlažovacích zařízení. Nespornou výhodou tohoto řešení je jednoduchost a nízká cena. Proto se pro aplikace, u kterých není přímo nutné dodávání energie v přesně daný čas, jako například již zmíněné zavlažovací systémy, hodí tento systém nejvíce [13].

Rozšířenější je systém s akumulací energie. Jeho součástí je regulátor dobíjení, který optimalizací dobíjení prodlužuje životnost baterie [16]. Kromě elektrických sítí v ostrovním režimu se tyto systémy rozšiřují také v návaznosti na vzestup obnovitelných zdrojů energie, nutnost stabilizace a vyrovnaní produkce a spotřeby energie. V budoucnu lze tedy čekat, že jim bude přikládána velká pozornost.

Hybridní off-grid systém je systém s připojením na další zdroj energie, např. větrný generátor, spalovací generátor. Proto je vhodným řešením do míst, kde je třeba dostatek energie v průběhu celého roku [6].

Klasický i hybridní off-grid systém má i nespočet aplikací. První je budování v podstatě klasických, ale velmi malých energetických soustav, zejména na ostrovech, které daly tomuto uspořádání název [6]. Další jsou pak odlehlé objekty, v dnešní době zejména pro rekreaci a turismus, který je stále významnější, jako například horské chaty. Mimo vyspělý svět, kde často není vybudovaná centrální energetická síť, jsou off-grid systémy základním zdrojem energie. V podobné situaci se také nacházejí mnohé odlehlé oblasti, např. v severních částech Kanady a na Aljašce [17].

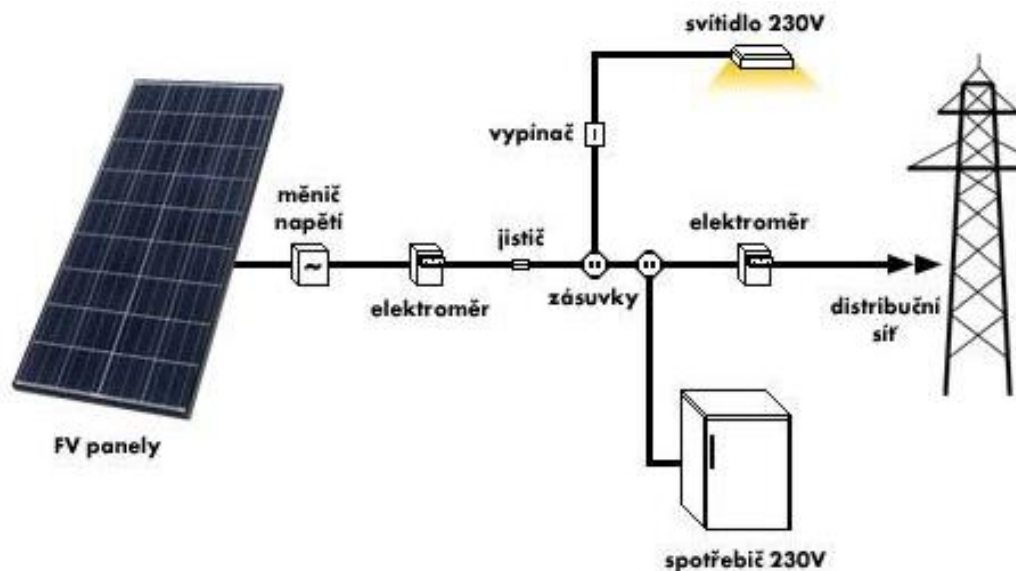
Systémy dodávající přímo do sítě ve vyspělém světě byly, a stále jsou nejrozšířenějšími, ale se vzestupem podílu obnovitelných zdrojů je budou pravděpodobně

částečně nahrazovat systémy s možností akumulace energie, nicméně stále zapojené do energetické sítě [17].

Během posledních patnácti let došlo v reakci na diskuze týkající se produkce oxidu uhličitého v energetice k obrovskému rozšíření on-grid systémů. Dnes tvoří jeden z nejrychleji rostoucích zdrojů elektrické energie a po období, kdy tento růst byl tažen zejména západní Evropou a některými částmi USA, se dnes využívá napříč celým světem [17].

Součástí fotovoltaických systémů jsou kromě samotných panelů a případných baterií solární regulátory, nutné elektrotechnické prvky-jističe, pojistky, spínače [13]. Dále pak mohou být přítomny napěťový měnič, síťový měnič, sledovač slunce a měřící přístroje [13].

Síťový měnič je nutný pro provoz spotřebičů stavěných pro napájení běžných spotřebičů střídavým proudem a pro dodávání elektrické energie do sítě. Převádí stejnosměrný proud produkovaný fotovoltaickými panely na střídavý proud 230 V/50 Hz. Kromě toho funguje jako ochrana a zabezpečení nutné pro povolení připojení do sítě [13]. Schematické znázornění on-grid elektrárny s možnou vlastní spotřebou, bez akumulace, je znázorněno na obr. 9.



Obrázek 9. Systém fotovoltaického zařízení pro vlastní spotřebu s prodejem přebytků do distribuční sítě [6]

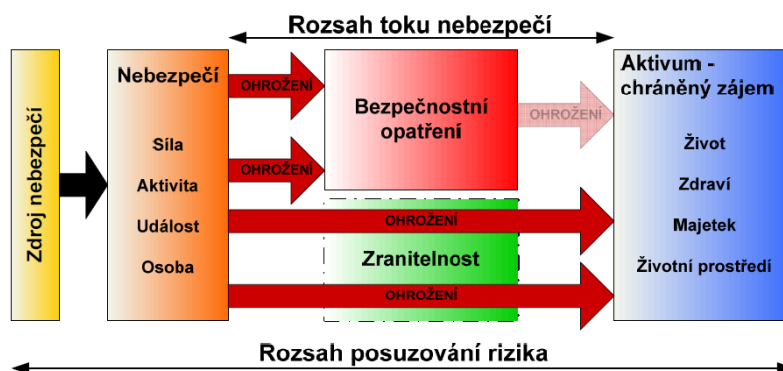
3 Rizika a bezpečnost – teorie

3.1 Riziko a bezpečnost

Mírou ztrát, škod, újmy na lidech, zařízeních a životním prostředí je veličina riziko [17]. Riziko lze definovat několika způsoby. Jedním z nejpoužívanějších je riziko představující součin pravděpodobnosti nastání krizové situace a kvantifikace potenciálních dopadů a důsledků na sledovaný systém [18].

Určujícím kritériem rizika je zranitelnost systému. Ta představuje stránku systému, která umožňuje hrozbě působit [18] „Bezpečnostní opatření představuje proces nebo prostředek navržený za účelem snížení zranitelnosti chráněného zájmu nebo minimalizace působení nebezpečí [18].“

Na obrázku 10 vidíme schematické znázornění působení rizika a bezpečnostních opatření na sledovaný objekt (aktivum).



Obrázek 10. Schéma působení rizika [18]

Bezpečnost je soubor antropogenních opatření a činností prováděných pro zvládnutí rizika (tj. snížení ztrát, škod a újmy na aktivu) [17].

Riziko a bezpečnost spolu korelují, avšak nejsou si přímo úměrné [19]. Jednoduchým příkladem může být instalace hromosvodu. Ten zvyšuje bezpečnost objektu před požárem způsobeným bleskem, nesnižuje však riziko výskytu samotného blesku. Podobně například budovy stavěné na pylonech jsou bezpečnější v případě záplav, jejich konstrukce ale nevede ke snížení šance nastání takové situace.

Veličinou komplementární k bezpečnosti je kritičnost [19]. Kritičností můžeme rozumět mezní stav systému. Ten je posuzován v různých ohledech – škod na lidském zdraví a životech, ekonomických škod, ztráty funkčnosti [19].

Jako hlavní definici můžeme použít vyjádření kritičnosti jako míru důležitosti jejího narušení nebo selhání. Vlastnost prvku, jeho kritičnost, můžeme vyjádřit jako funkci zranitelnosti a důležitosti prvku

$$K = f(Z;D), \quad (3)$$

kde K představuje kritičnost, Z zranitelnost a D důležitost posuzovaného prvku [18]. Při posuzování kritičnosti se tedy v podstatě ptáme, jak významné pro nás je selhání daného systému nebo jeho části? Pro analýzu jsou tedy nejdůležitější prvky, které mají nejvyšší hodnotu kritičnosti a obecně prvky, které mají vyšší míru kritičnosti, než je stanovená hranice [18].

Vzhledem k tomu, že se při posuzování rizika někdy bere v úvahu také vliv následků (tedy fakticky kritičnost), lze o kritičnosti uvažovat jako o podmnožině rizika. Kritičnost a riziko spolu tedy výrazně korelují. Nejvýraznějším rozdílem je fakt, že pro určování kritičnosti se nemusíme zabývat příčinou problému [18].

Při procesech řízení rizika je základním cílem najít nejlepší řešení, jak za optimálních nákladů dosáhnout přijatelné míry rizika. Z hlediska složitosti systémů máme jednoduché celky, složené systémy, složité (komplexní) systémy (výrobní linky) a velmi složité systémy (jaderná elektrárna). V tomto rozdělení můžeme zařadit FV elektrárnu mezi složené systémy [19].

Pro bezpečnost jakéhokoliv systému jsou určující procesy, děje a jevy, vyskytující se ve studovaném systému, a v prostředí, ve kterém se nachází. Základním problémem bezpečnosti je nemožnost ji přesně kvantifikovat. Z tohoto důvodu musíme pouze hledat trendy v čase a přibližnou míru bezpečnosti [19].

V čase tak sledujeme tři základní údaje. Prvním je, zda v průběhu času dochází ke zvyšování či naopak k poklesu bezpečnosti. Druhým, zda se ve vybraných časových úsecích daří dosahovat určené míry bezpečnosti. Nakonec, zda opatření, ke kterým dochází, vedou ke zvyšování bezpečnosti a zároveň jestli byli prostředky na její zvýšení využity efektivně [19].

Pokud chceme dosáhnout cílené úrovně bezpečnosti, je dle práce [19, s. 97-98] nutné

- „uvědomit si aspekty technologického systému, které jsou důležité pro jeho bezpečnost,
- pochopit příčiny poruch a bezpečnosti technologického systému a kontext jejich působení,
- soustředit pozornost na podobnosti i rozdíly pohrom (tj. jevů, které narušují bezpečnost technologického systému) samotných,
- pochopit roli území ve spojitosti s bezpečností technologických systémů, tj. především vlastnosti území, které eskalují a potlačují dopady pohrom vždy nebo jen za určitých okolností,
- používat uvědoměle metodiky hodnocení pohrom, jejich dopadů a identifikace nápravných opatření, stanovit cíle, harmonogramy, monitoringy, organizační struktury, normy, standardy a právní předpisy pro uvědomělé řízení bezpečnosti systému,
- odstranit multiplicity při přípravě opatření na zvládnutí dopadů pohrom,
- při územním plánování, projektování, výstavbě, provozování, odezvě na pohromu v území a při obnově území neaplikovat opatření, která zvyšují rizika spojená s dalšími možnými pohromami.“

V současnosti jsou při řešení bezpečnostní problematiky užívány dva přístupy – řízení rizik a řízení bezpečnosti [20]. Jak z jejich definic vyplývá, tak při řízení rizik se zabýváme primárně potenciálním ohrožením a soustředím se na procesy opatření, sloužící k potlačení zdrojů krizové situace. Při řízení bezpečnosti se zabýváme spíše odolností systému či projektu v případě nastání krizové situace a dopady na jejich provoz, popř. stavem a opatřeními samotného projektu, které brání nastání krizové situace [20].

3.2 Rizika a bezpečnost FV elektráren

Vzhledem k tomu, že jsou FV elektrárny zařízení generující elektrický proud, při jejich provozu se nelze zcela zbavit rizika požáru. Příčiny rizika požáru lze rozdělit do několika základních skupin. Těmi jsou chybný návrh systému, vada výrobku a chyby při instalaci, dále vnější vlivy, zejména počasí a zanedbaná údržba [16].

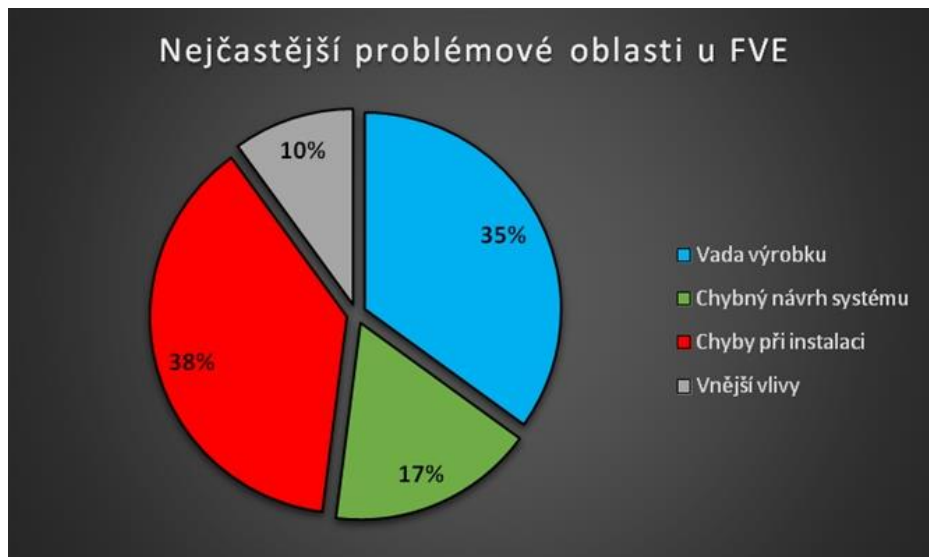
Co se týče první skupiny, tak u chybného návrhu systému se jedná zejména o „volbu nevhodných komponent, nesprávné pojistky na DC straně, nevhodné venkovní měniče, nevhodné svorky, poddimenzování kabeláže, nevhodné umístění měniče (vystavení přímému slunečnímu záření, korozivním látkám atd.)“ [16].

Při instalaci dochází dle práce [16] k chybám např.:

- „špatným napojením konektorů DC části,
- špatným krimpováním (spojování odizolované části kabeláže s konektory) kabelů s konektory,
- nedostatečným nebo žádným odlehčením kabeláže (mechanické přetěžování svorek),
- nedostatečným odizolováním kabelových přípojí,
- nedostatečným utažením svorkovnic a šroubových spojů [16]“.

Chyby při instalaci, jakkoliv jsou nevyhnutelné, lze z velké části připsat na vrub fotovoltaickému rozmachu z let 2009-2012. Při něm došlo k rapidnímu nárůstu v objemu nově instalovaného výkonu [16]. Při takové prudké změně dojde zákonitě k mnoha chybám. V důsledku změn v legislativě [6] a snaze omezit výhodné podmínky pro nové FV elektrárny pak docházelo k ještě překotnějšímu dokončování nových elektráren. V souvislosti s pokračujícím a stupňujícím se tlakem na snižování uhlíkové stopy je plánováno nové rozšiřování FV kapacit, je tedy nutno dále se znovu náležitě věnovat i tomuto faktoru.

Na obrázku 11 můžeme vidět rozložení příčin požárů FVE mezi lety 2011-17. Mezi hlavní faktory nehod patří vady výrobků a chyby při instalaci, což je v souladu s teorií o vlivu překotné výstavby.



Obrázek 11. Příčiny požárů [16]

Jevy, které tvoří nejčastější zdroj požárů, jsou podle [16] přechodový odpor a svodový proud. U přechodového odporu dojde vlivem špatného spojení vodičů, a z toho vyplývajícího špatného kontaktu, k redukci vodivého průřezu, který tím může být přetěžován. To vede k zahřívání a může být zdrojem případného požáru. U svodového proudu dochází k oslabení dielektrických vlastností izolantu, například nevhodným zatížením nebo působením vnějšího prostředí. To vede k vytvoření proudu protékajícího do dalšího vodiče. Ten opět zahřívá už tak slabou izolaci a může ji postupně natavovat, až je dosaženo zkratového proudu [16].

Velmi nízké nároky na obsluhu a údržbu fotovoltaických elektráren byly vždy považovány jako jejich velká výhoda. Může se to v některých případech ukázat i jako problém. V případě umístění elektrárny na volné ploše mimo obydlenu oblast není v případě vzniku požáru v okolí nikdo, kdo by si jej rychle všiml, což dává čas na to, aby se požár rozhořel a způsobil větší škody, než dojde k hasičskému zásahu.

Při vzniku požáru pak ovšem nepředstavují samostatně stojící panely příliš složitý problém, zejména díky prostornosti elektráren [21]. Vyskytuje se u nich ale další riziko hoření vegetace, které bývá zejména během letních měsíců velmi vysoké. To může přispět ke zhoršení požáru způsobeného komponentou elektrárny nebo také být samo primárním zdrojem hoření.

V případě umístění na střeše je zase velkým problémem ztížená dostupnost. V obou případech je situace samozřejmě výrazně komplikována přítomností elektrického vybavení [21]. K tomu navíc i problémem dostat toto vybavení do beznapěťového stavu. V případě výrobních hal, které jsou na rozdíl od střech rodinných domů často kovové, je vysoké riziko napětí v konstrukci budovy [16].

4 Data o haváriích fotovoltaických elektráren

Generální ředitelství hasičského záchranného sboru ČR začalo evidovat požáry fotovoltaických elektráren v roce 2010 [22]. Zprvu byly zaznamenávány pouze významné požáry. V roce 2015 začaly být zaznamenávány požáry bez ohledu na velikost [22].

V Německu, zemi s největšími kapacitami ve fotovoltaice v Evropské Unii, se tato data zatím systematicky neevidují, nicméně je lze alespoň částečně dohledat pro případné srovnání [16].

Datový soubor o požárech FE uvedený v tabulce jedna byl sestaven z dat [16]a z komunikace s kpt. Ing. Hanou Nedělníkovou z Oddělení statistiky a humanitární pomoci MV-GŘ HZS ČR [23].

Stupeň poplachu používá HZS k označení odezvy na závažné události [17].

Tabulka 1. Data o požárech FE v ČR 2010-2020

Datum	Místo	Objekt, zařízení zasažené požárem / příčina požáru FE	Způsobená škoda [Kč]	Počet IPO	Stupeň poplachu
23. 03. 2010	Dubňany	Proudové přetížení v hlavním rozvaděči FE	10 000 000		
27. 02. 2011	Křenovice	Trafostanice v areálu FE	?		
25. 08. 2012	Kunice-Stránčice	Střecha skladu s FE	17 000 000		
12. 10. 2012	Beroun	Střecha sportovní haly s FE	15 000 000		
31. 10. 2012	Okolí Brna	Měnič FE	9 000 000		
13. 06. 2013	Kosořín	Trafostanice v areálu FE	7 500 000		
31. 07. 2013	Malíkovice – Čanovice	Velkokapacitní seník s FE- nedbalost při svařování hydroizolační lepenky	20 000 000		
11. 04. 2015	Kraj Vysočina	Střídač FE-technická závada	35 000		
11. 04. 2015	Zlínský kraj	Rozvodna FE- Nepředpokládané změny provozních parametrů	2 500 000		
29. 04. 2015	Královehradecký kraj	FE na střeše haly-Technická závada	1 300 000		
29. 04. 2015	Středočeský kraj	Elektroinstalace v rozvodně FE -technická závada	100 000		
19. 06. 2015	Středočeský kraj	Rozvodná deska FE- Nepředpokládané změny provozních parametrů	3 000 000		

Datum	Místo	Objekt, zařízení zasažené požárem / příčina požáru FE	Způsobená škoda [Kč]	Počet IPO	Stupeň poplachu
30. 08. 2015	Středočeský kraj	Rozvaděč FE- Nepředpokládané změny provozních parametrů	50 000		
18. 09. 2015	Pardubický kraj	Rozvaděč FE-Technická závada	200 000		
16. 03. 2016	Královehradecký kraj	Trafostanice FE - Technická závada	240 000		
10. 04. 2016	Královehradecký kraj	Panel na střeše domu - Technická závada	200 000		
10. 06. 2016	Plzeňský kraj	Trafostanice FE - Technická závada	1 500 000		
29. 06. 2016	Jihomoravský kraj	Sběrná skříň FE na střeše - Technická závada	67 900		
01. 07. 2016	Olomoucký kraj	Panely FE na střeše - Nepředpokládané změny provozních parametrů	426 200		
27. 07. 2016	Ústecký kraj	Trafostanice FE - Technická závada	800 000		
08. 08. 2016	Zlínský kraj	Rozvaděč FE - Technická závada	20 000		
23. 08. 2016	Praha	Baterie - Technická závada	100 000		
30. 08. 2016	Středočeský kraj	Elektroinstalace FE - Technická závada	450 000		
07. 11. 2016	kraj Vysočina	Elektrické rozvody FE - Technická závada	200 000		
14. 11. 2016	Liberecký kraj	Transformátor FE - Nepředpokládané změny provozních parametrů	1 500 000		
24. 02. 2017	Královehradecký kraj	Trafostanice FE - Technická závada	400 000		
17. 05. 2017	Jihočeský kraj	Technologický kontejner FE - Technická závada	1 500 000		
13. 06. 2017	Pardubický kraj	FE - Technická závada	5 000 000		
23. 06. 2017	Pardubický kraj	FE - Blesk	400 000		
02. 07. 2017	Středočeský kraj	Pojistková skříň FE - Nepředpokládané změny provozních parametrů	200 000		
08. 07. 2017	Olomoucký kraj	FE - Technická závada	2 000 000		
30. 07. 2017	Liberecký kraj	Elektrozvaděč FE - Technická závada	100 000		
21. 01. 2018	Hradec Králové	Požár solární elektrárny - Nepředpokládané změny provozních parametrů	120 000	3	I.
21. 02. 2018	Česká Lípa	FE - Nepředpokládané změny provozních parametrů	2 000 000	3	I.
08. 03. 2018	Strakonice	Požár v objektu trafostanice v areálu FVE - Technická závada	2 000 000	4	I.

Datum	Místo	Objekt, zařízení zasažené požárem / příčina požáru FE	Způsobená škoda [Kč]	Počet IPO	Stupeň poplachu
21. 05. 2018	České Budějovice	Požár rozvaděče solární elektrárny (v poli) - Technická závada	600 000	2	I.
25. 05. 2018	Praha-východ	požár kondenzátoru v rozvodny fotovoltaické elektrárny - Technická závada	120 000	5	I.
04. 06. 2018	Mělník	Požár střešní konstrukce stodoly - nezjištěno	400 000	3	I.
04. 06. 2018	Pardubice	Požár RD - technické závady	6 000 000	10	II.
08. 06. 2018	Beroun	Požár dřevěných podlážek lešení ve fotovoltaické elektrárně - Nepředpokládané změny provozních parametrů	10 000	4	I.
09. 06. 2018	Plzeň-sever	Požár záložního zdroje el. energie - Technická závada	200 000	3	I.
07. 08. 2018	Chomutov	Požár travního porostu a sběrných skříní u fotovoltaických panelů - v šetření	1 000 000	1	I.
05. 01. 2019	Středočeský- Mladá Boleslav	Požár garáže a RD - technické závady	3 000 000	4	I.
27. 03. 2019	Jihomoravský- Brno-město	Požár půdního prostoru rodinného domu - technické závady	400 000	6	I.
20. 04. 2019	Středočeský- Praha-východ- Říčany	Požár školky a OC - technické závady	12 000 000	14	II.
24. 05. 2019	Hlavní město Praha-Hlavní město Praha	Požár elektroinstalace - technické závady	50 000	1	I.
11. 06. 2019	Plzeňský-Klatovy	požár RD - technické závady	450 000	5	II.
14. 06. 2019	Hlavní město Praha-Hlavní město Praha	požár sklepních prostor - technické závady	900 000	7	II.
26. 06. 2019	Olomoucký- Prostějov	Požár fotovoltaického panelu - technické závady	365 000	3	I.
26. 06. 2019	Plzeňský-Tachov	Střídače FVE - technické závady	50 000	7	II.
08. 07. 2019	Olomoucký- Prostějov	Zahoření elektroinstalace k solárním panelům na střeše haly na pile - technické závady	100 000	5	I.
15. 07. 2019	Středočeský- Mělník	Žhnutí izolace přívodních vodičů k rozvaděči panelů FVE - nepředpokládané změny provozních parametrů včetně	?	4	I.

Datum	Místo	Objekt, zařízení zasažené požárem / příčina požáru FE	Způsobená škoda [Kč]	Počet IPO	Stupeň poplachu
25. 07. 2019	Jihomoravský-Hodonín	Rozvaděč FVE v rodinném domě - technické závady	500 000	4	I.
11. 08. 2019	Jihomoravský-Břeclav	Rozvaděč FVE - technické závady	250 000	5	I.
11. 10. 2019	Jihomoravský-Blansko	Baterií od FVE - nepředpokládané změny provozních parametrů	3 000	5	I.
30. 11. 2019	Liberecký-Česká Lípa	Požár trávy v objektu solární elektrárny	0	2	I.
06. 12. 2019	Středočeský-Rakovník	Akumulátory FVE v technické místnosti - nepředpokládané změny provozních parametrů	700 000	4	I.
25. 03. 2020	Zlínský	Požár střešního pláště - fotovoltaiky - technické závady	200 000	7	II.
14. 04. 2020	Středočeský	Požár - nepředpokládané změny provozních parametrů včetně	0	1	I.
08. 05. 2020	Ústecký	Požár travního porostu v objektu solární elektrárny	450 000	3	I.
18. 05. 2020	Jihočeský	Likvidace požáru technologického kontejneru FVE-technické závady	3 000 000	2	I.
19. 05. 2020	Pardubický	Technické závady - vada materiálu, konstrukce, opotřebení	60 000	3	I.
26. 06. 2020	Ústecký	Požár elektroinstalace v zahradní chatě - nepředpokládané změny provozních parametrů	0	1	I.
27. 06. 2020	Moravskoslezský	Požár dvou hal - technické závady	24 600 000	10	II.
28. 06. 2020	Jihomoravský	Garáž a hospodářské stavení za rodinným domem - technické závady	2 000 000	4	I.
30. 06. 2020	Středočeský	Sběrnice FVE s rozšířením na střešní konstrukci objektu - technické závady	25 000 000	12	II.
05. 07. 2020	Moravskoslezský	Baterie fotovoltaické elektrárny ve sklepě - technické závady	500 000	2	I.

5 Metody zpracování dat

Při zpracování dat v tabulce 1 byly použity metody matematické statistiky (histogramy), pro vybraný případ byla použita metoda What, If a zpracovaná případová studie.

Metoda, co když (z anglického What if, zkratka WFA nebo W-I) je analytická metoda používaná pro řízení rizik a rozhodování. Tato metoda je systematická, ne však přísně strukturovaná. Jejími výstupy jsou potenciální problémy, rizika a návrhy opatření na jejich předcházení nebo mírnění. Tato metoda je velice oblíbená, neboť je její použití zcela univerzální, a její aplikace snadná. Základním požadavkem je s danou problematikou seznámený tým a z toho vyplývající schopnost v méně systematickém prostředí intuitivně formulovat možné problémy. Pokud je toto zajištěno, následuje koncepční řešení problémů [24]. Tuto metodu používáme formou vyplňování tabulky; tabulka 2, pomocí dat získaných od expertů, brainstormingem či panelovou diskuzí [25].

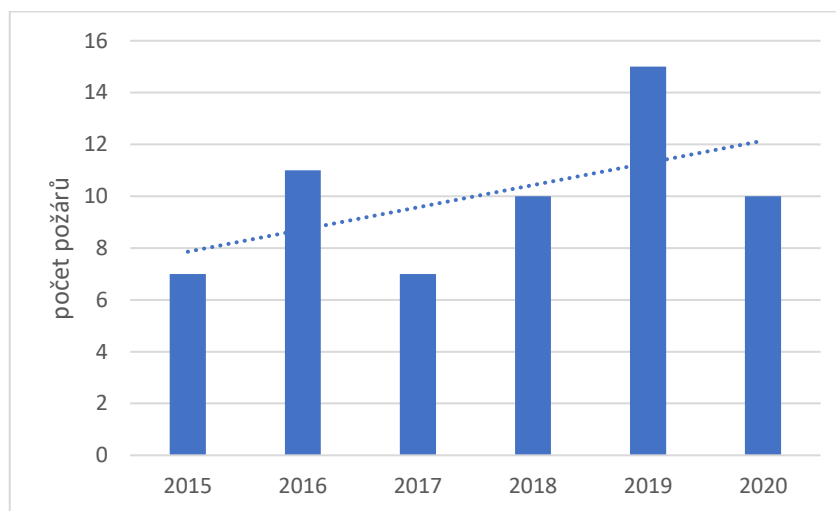
Metoda What If je vhodná pro aplikaci v menším množství a v méně náročných studiích. V náročnějších je třeba pro eliminaci rizik použít systematictější metodu s více propracovanou strukturou, např. metodu HAZOP (Hazard and Operability Study) - analýzu ohrožení a provozuschopnosti [24].

Pomocí případové studie, která představuje model průběhu reálné zkušenosti získané v zájmové oblasti rozšiřujeme znalosti o dané problematice. Používáme ji při řízení projektů a procesů, nejsou-li znalosti o problému strukturované a nesplňují tedy požadavky vyžadující stanovení obecně platného řešení [25].

6 Výsledky

6.1 Statistické metody

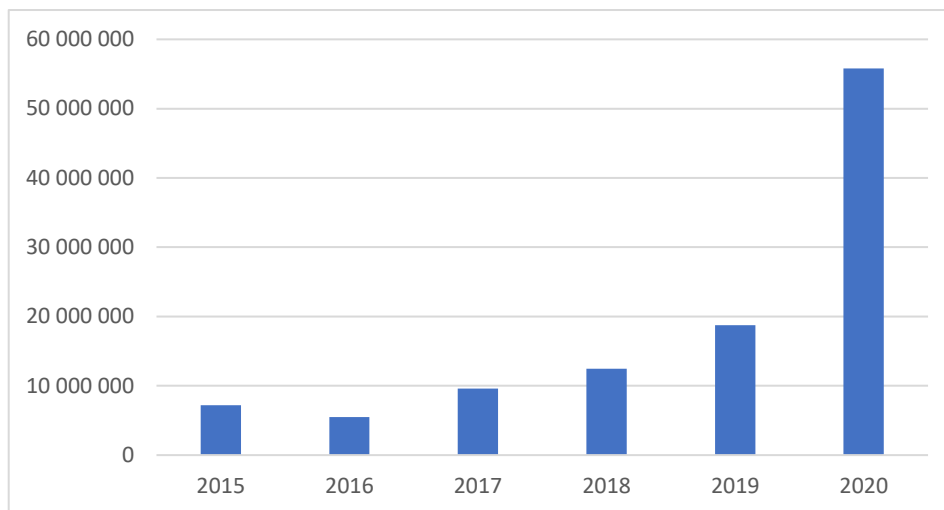
Na obrázku 12 můžeme vidět nárůst počtu požárů FV elektráren mezi lety 2015 až 2020. S další výstavbou, a zároveň s pokračujícím časem, stárnutím komponent a působením počasí lze předpokládat zhoršování stavu částí fotovoltaických elektráren a s tím v budoucích letech další absolutní i relativní nárůst počtu technických problémů, včetně požárů.



Obrázek 12. Graf vývoje počtu požárů FVE v ČR

Ze shromážděných dat lze vidět rostoucí škody způsobené požáry FVE. K těmto škodám je také nezbytné si připočíst náklady na samotný hasičský zásah, které jsou vzhledem k podstatě problematiky (výskytu elektrotechniky) poměrně vysoké. Je tedy vitální se zabývat možnostmi snížení těchto škod.

Na obrázku 13 na další straně lze jasně vidět rostoucí škodu vznikající při požárech FV elektráren.



Obrázek 13. Graf způsobených škod požáry FVE v ČR

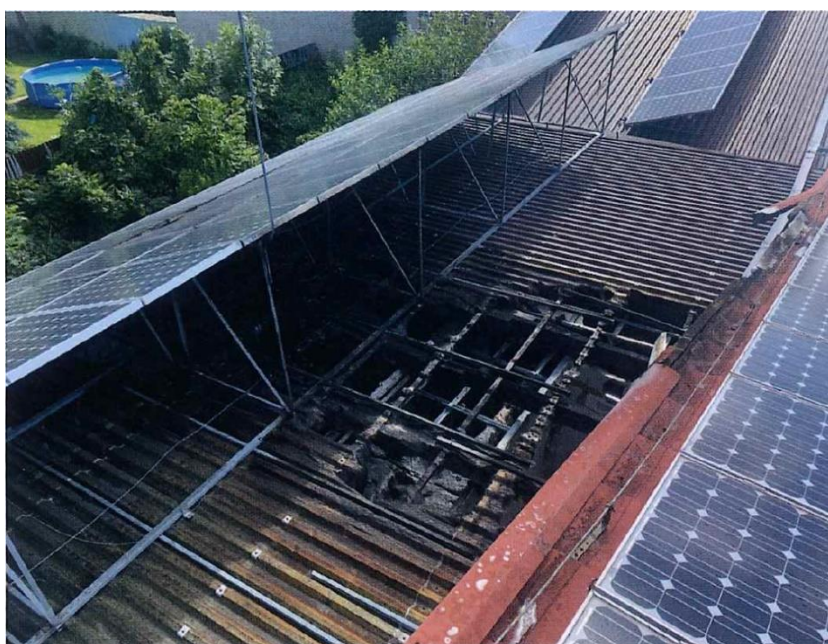
Mezi lety 2018 až 2020, pro která se podařilo shromáždit data, lze vidět také výrazný procentuální nárůst požárů druhého stupně, z 14 % v roce 2018, 26 % v roce 2019 až na 30 % v roce 2020. Tyto údaje korelují se zvyšující se škodou způsobenou událostí.

Mezi příčinami vzniku požárů jasně vedou technické závady, které byly nejčastějším důvodem vzniku požáru každý sledovaný rok.

6.2 Případová studie + Metoda What If

30. června 2020 došlo k požáru v prostorách průmyslového objektu společnosti Černus-CZ v Kostelci nad Labem. Objekt má rozměry 50x30m. Jedná se o zděnou stavbu s kazetovým stropem a dřevěnou střechou sedlového typu s pálenými taškami. Na jižní a západní straně se nacházejí zděné přístavky. Objekt je rozdělen na dva požární úseky dělicí stěnou nacházející se přibližně ve středu. V prostorech bylo instalováno na rozsáhlé střešní ploše 2200 fotovoltaických panelů. Celé zařízení mělo výkon 350 kW. Sběrnice a měniče napětí byly umístěny v technologické místnosti, stavebně neoddělené od střechy [26].

Požár se rozšířil z technologické místnosti se sběrnici a s 15 měniči a rozšířil do střešní konstrukce, což poškodilo asi 20 FV panelů. Část střechy se propadla, jak můžeme vidět na obrázku č.14 [26].



Obrázek 14. Záběr na propadlou střechu výrobní haly [26]

Po práci vyšetřovatelů byla určena jako příčina vzniku požáru „vznik elektrického oblouku v centrální sběrnici v místnosti sběrnice a střídačů“ [26]. Po rozhoření požáru v místnosti se sběrnici docházelo dále k „následným rozšířením po izolacích elektrických vedení na střešní konstrukci části objektu“ [26].

Tabulka 2, ukazuje ztráty, škody a újmy na veřejných aktivech pomocí aplikace standardního modelu pro metody What, If [25].

Tabulka 2. Standardní model pro aplikaci metody What, If. [25]

Aktivum	Dopady požáru na aktivum
Životy a zdraví lidí	Ohrožení osob požárem, kouřem a borcením stavby, zranění člena HZS
Bezpečí lidí	Ohroženo panikou
Majetek	Rozsáhlé zničení majetku
Veřejné blaho	Narušeno panikou
Životní prostředí	Poškozeno toxickým dýmem, hořením elektrotechniky a požární vodou
Infrastruktury a technologie	Výrobní technologie výrazně poškozena
Dodávky energií	Přerušena dodávka z FVE
Dodávky vody	Velká spotřeba vody na hašení
Kanalizace	Nutnost odvodu velkého množství vody ze zásahu HSZ, potenciálně obsahující chemikálie z hoření či hasebních prostředků
Přepravní síť	Přetížené i zablokované komunikace vlivem rozsáhlého zásahu 10 JPO s 22 kusy mobilní techniky
Komunikační a informační sítě	Zatíženy krizovou komunikací
Bankovní a finanční sektor	Nepřímý
Nouzové služby	Velká účast HZS z širokého okolí, potenciální nedostatek pro zásah na jiném místě
Základní služby v území (průmysl, zemědělství, zásobování, zdravotnictví, likvidace odpadů, sociální služby, pohřební služby)	Malý
Státní správa a samospráva	Evakuace lidí
Prioritní zařízení, komponenty, vazby a toky v technickém díle	Rozsáhle poškozeno výrobní zařízení, stavba i prvky fotovoltaické elektrárny.

6.3 Opatření pro vylepšení projektu

Pro posouzení chyb v projektu se musíme zeptat na dvě základní otázky – Jak by mělo být zabráněno vzniku požáru? A jak mělo být zabráněno jeho rozšíření?

U instalace s poměrně vysokým výkonem by mělo být v centrální místnosti se sběrníci a rozvaděči zvoleno lepších komponent, se zajištěnou vyšší mírou elektrické izolace a také vyšší mírou nehořlavosti. Alternativou by byla externí izolace, například ve formě zesílené nehořlavé desky, která by byla součástí konstrukce, na které je celé vybavení umístěno a která by bránila rozšíření požáru a dávala by větší množství času pro odhalení požáru v jeho zárodku.

Na obrázku 15 můžeme vidět technologickou místnost po požáru a zásahu HZS.



Obrázek 15 Technologická místnost po požáru

Zajištění senzorů pro detekci požáru, obzvláště v uzlu, kde je umístěno velké množství elektrických komponent, a zároveň je uzavřený, což umožňuje využití detektorů kouře, by mělo být nezbytnou součástí projekce a výstavby FV elektrárny. Místo toho byl požár odhalen až ve chvíli, kdy bylo slyšet výbuchy a vidět dým valící se z prostoru. Dřívější odhalení, kontakt hasičského sboru a zásah by výrazně zvýšil šanci na nižší

škody, které byly v tomto případě jedny z nejvyšších, dosud způsobených v České republice požárem fotovoltaické elektrárny.

Jak mělo být zabráněno dalšímu rozšíření požáru? Základním problémem v objektu byla dřevěná střecha, navíc stavebně neoddělená od technologické místnosti. To vedlo k velmi problematickému rozšíření požáru do střešní konstrukce. Mělo by tedy být při projekci elektrárny zvoleno jiných, méně hořlavých materiálů, v případě, že je elektrárna projektovaná jako součást výstavby objektu. To však není příliš častý případ, navíc dřevěné prvky jsou díky ceně a dostupnosti stále běžnou součástí střešních konstrukcí. Jako schůdnější alternativou se jeví lepší oddělení a požární odizolování exponovaných míst s vysokým rizikem vzniku požáru, jako v tomto případě technologické místnosti.

Dalším problémem byl fakt, že i přes urychlené odpojení od sítě nebylo možné dosáhnout odpojení panelů od technologické místnosti, a tak byly měniče v průběhu zásahu stále pod proudem. To kromě zvýšení rizika poranění zasahujících hasičů dále výrazně zvyšuje náklady na celý zásah z důvodu použití speciálních hasebních metod (práškového hašení). Pro uhašení technologické místnosti se sběrnici a měniči byla využita přibližně tuna prášku. Proto by zajímavou možností bylo vytvoření nouzového odpojení FV panelů od sběrnice a měničů, které by bylo stranou potenciálních zdrojů požáru.

7 Závěr

Výsledky této práce ukazují na potřebu zabývat se sestavením patřičných norem, které by nastavovaly požadavky pro projektování a bezpečný a udržitelný provoz fotovoltaických elektráren a pro zajištění bezpečnosti lidí i majetku. Jejich součástí by měly být požadavky na výběr jednotlivých komponent, umístování zařízení apod. Možnosti pro zlepšení návrhu projektování fotovoltaické elektrárny byly načrtnuty v kapitole 6. Vzhledem k pokračujícímu a stupňujícímu se trendu výstavby je třeba vytvořit lépe a konkrétněji nastavený rámec pro celou tuto oblast.

Při instalaci FV panelů na střešní konstrukce výrobních hal je možné, že v případě požáru a propadu střechy dojde k poškození nebo zničení strojů a technologií v hale umístěných. Často se jedná o zařízení, která mají velmi vysokou hodnotu, proto by se při instalaci měla zahrnout jejich hodnota do odhadování kritičnosti případného požáru, a z toho odvozeno případné zvýšení požární ochrany.

Reference

- [1] *Photovoltaic barometer 2017* [online]. Observ'ER, 2017 [cit. 2021-02-03]. ISSN 2115-824X. Dostupné z: <https://www.eurobserv-er.org/photovoltaic-barometer-2017/>
- [2] ČTK. Studie: Pro splnění cílů EU potřebuje ČR soláry na brownfieldech. *Tzb-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o, c2001-2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/127398-studie-pro-splneni-cilu-eu-potrebuje-cr-solary-na-brownfieldech>
- [3] HOŠEK, Zdeněk a Josef KOŠŤÁL. Požární bezpečnost fotovoltaických systémů: Příloha. *Elektro*. Praha, 2011, (4), 3-5. ISSN 1210-0889.
- [4] MORAVEC, Jan. Polovodiče: Fotovoltaický jev a parametry fotovoltaického článku. *Oenergetice* [online]. Třebíč: OM Solutions s.r.o, 2017 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/polovodice-fotovoltaicky-jev-parametry-fotovoltaickeho-clanku>
- [5] DOLEŽAL, Martin, Jana NEVŘALOVÁ, Miloslav OTÝPKA a Věroslav VALA. *Solární energie*. 1. Tábor: Střední průmyslová škola strojní a stavební, 2013.
- [6] VRBKOVÁ, Kateřina. *Manuskript Diplomové práce*. Brno: VUT, 2019.
- [7] Fotovoltaický solární panel, 165 W, monokrystalický. *Kokiskashop* [online]. Kokiska, 2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://www.kokiskashop.cz/cz/fotovoltaicky-solarni-panel-165-w-monokrystalicky-P74182/>
- [8] BECHNIK, Bronislav. Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie. *Tzb-info* [online]. Topinfo s.r.o, c2001-2021 [cit. 2021-02-04]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [9] GREEN, Martin, Keith EMERY, Yoshihiro HISHIKAWA, Wilhelm WARTA a Ewan DUNLOP. Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in*

- Photovoltaics: Research and Applications* [online]. 2015, **23**(1), 1-9 [cit. 2021-01-03]. ISSN 10627995. Dostupné z: doi:10.1002/pip.2573
- [10] NIKL, Ondřej. *Analýza VA charakteristik FVE*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. ZČU.
- [11] SAHA, Sudip K. Materials Research and Opportunities in Solar (Photovoltaic) Cells. *Proceedings of the Indian National Science Academy* [online]. 2015, **81**(4) [cit. 2021-03-04]. ISSN 0370-0046. Dostupné z: doi:10.16943/ptinsa/2015/v81i4/48309
- [12] SAMPAIO, Priscila a Mario GONZÁLEZ. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, **74**, 590-601 [cit. 2021-01-02]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.02.081
- [13] ALBRECHT, Daniel. *Fotovoltaické elektrárny a jejich návrh*. Brno, 2016. Bakalářská práce. VUT.
- [14] SHERWANI, A.F., J.A. USMANI a VARUN. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2010, **14**(1), 540-544 [cit. 2021-01-02]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2009.08.003
- [15] REDAKCE. Perovskitová revoluce ve fotovoltaice přichází z Polska?. *Solární novinky* [online]. Dobra: Jaroslav Dorda, c2009-2021 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/perovskitova-revoluce-ve-fotovoltaice-prichazi-z-polska/>
- [16] NOS, Filip. Požáry fotovoltaických elektráren. *Časopis 112*. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2018, (1). ISSN 1213-7057.
- [17] PROCHÁZKOVÁ, Danuše. *Ústní sdělení*. 2021.
- [18] ROSTEK, Petr a Vilém ADAMEC. *Riziko nebo kritičnost infrastruktury*. 2014. Dostupné také z: <http://www.population-protection.eu/prilohy/casopis/17/127.pdf>

- [19] PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Bezpečnost složitých technologických systémů*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství, 2015. ISBN 978-80-01-05771-1.
- [20] PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Metody rizikového inženýrství*. 1. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2012. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-807-3851-118.
- [21] PECL, Jan. Fotovoltaické systémy při požáru z pohledu jednotek požární ochrany. *Časopis 112*. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2020, (10), 4-5. ISSN 1213-7057.
- [22] VRBKOVÁ, Kateřina a Dana PROCHÁZKOVÁ. Příčiny požárů fotovoltaických elektráren v České republice. In: *Řízení rizik procesů spojených stechnickými díly*. Praha: ČVUT v Praze, 2019, s. 293-300. ISBN 978-80-01-06656-0.
- [23] NEDĚLNÍKOVÁ, Hana. *Písemná komunikace*. 2021.
- [24] HÁJKOVÁ, Martina. Identifikace nebezpečí a hodnocení rizik-metody. *Bozpinfo* [online]. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, c2002-2021 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.bozpinfo.cz/identifikace-nebezpecni-hodnoceni-rizik-metody>
- [25] PROCHÁZKOVÁ, Dana. *Analýza, řízení a vypořádání rizik spojených s technickými díly*. 1. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní, 2018. ISBN 978-80-01-06480-1.
- [26] LEGER, Patrik a Luboš KLOBÁSA. Požár výrobní haly s fotovoltaickými panely na střeše. *Časopis 112*. Praha: Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2020, (10), 6-8. ISSN 1213-7057.

Seznam obrázků

Obrázek 1. Princip FV jevu [4]	11
Obrázek 2. Princip funkce FV článku [4]	11
Obrázek 3. Schéma křemíkového článku [6]	12
Obrázek 4. FV panel [7]	13
Obrázek 5. Voltampérová charakteristika FV článku [6]	14
Obrázek 6. Vývoj účinnosti FV článků [12]	15
Obrázek 7. Blok krystalu křemíku [13]	16
Obrázek 8. Podíl technologie na produkci [12]	17
Obrázek 9. Systém fotovoltaického zařízení pro vlastní spotřebu s prodejem přebytků do distribuční sítě [6]	19
Obrázek 10. Schéma působení rizika [18]	20
Obrázek 11. Příčiny požárů [16]	24
Obrázek 12. Graf vývoje počtu požárů FVE v ČR	31
Obrázek 13. Graf způsobených škod požáry FVE v ČR	32
Obrázek 14. Záběr na propadlou střechu výrobní haly [26]	33
Obrázek 15 Technologická místnost po požáru	35

Seznam tabulek

Tabulka 1. Data o požárech FE v ČR 2010-2020	26
Tabulka 2. Standardní model pro aplikaci metody What, If. [25]	34