

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Technicko-ekonomická studie návrhu vlastní spotřeby VVER1000

Vedoucí práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Martin Stránský

Plzeň, 2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLEČKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin STRÁNSKÝ**
Osobní číslo: **E10N0056P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Technicko - ekonomická studie návrhu vlastní spotřeby
VVER1000**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:


1. Popište základní koncepce bezpečného provozu bloku JE VVER1000.
2. Proveďte analýzu abnormálních provozů bloku s přechodem na vlastní spotřebu bloku.
3. Technicko - ekonomicky zhodnoťte zregulování na vlastní spotřebu z běžného provozního stavu.
4. Proveďte optimalizaci návrhu vlastní spotřeby.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zabývá studii napájení, spotřebičů a režimů vlastní spotřeby. Nejprve obsahuje seznámení se základní charakteristikou bloků VVER ve světě i v České republice, následně prohlubuje informace o bezpečném provozu jaderného bloku VVER-1000. Rozebírá hlavní principy a bezpečnostní systémy použité v jaderné elektrárně a sjednocuje je do stavových bezpečnostních stromů. Plynule je navázáno na kapitulu o abnormálních stavech včetně podrobného popisu typových situací. Rozebrána je četnost výskytu událostí INES na jaderné elektrárně Temelín a ta je porovnána jak mezi jednotlivými bloky, tak i mezi elektrárnami Temelín a Dukovany. Stěžejním bodem je pak rozbor vlastní spotřeby z pohledu spotřebičů, zdrojů napájení, režimů provozu, řešení typických událostí z pohledu vlastní spotřeby a možností její optimalizace. Diplomová práce je uzavřena ekonomickou studii jaderné energetiky a vlivu přechodu na režim napájení vlastní spotřeby.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna Temelín, stupnice INES, elektrické schéma bloku VVER-1000, vlastní spotřeba elektrárny Temelín

Technical-economic study of VVER1000 own power consumption

Abstract

The submitted thesis deals with power supply, devices and modes of own consumption (own consumption's power supply, devices and modes). It includes general characteristics of VVER units both in the world and in the Czech Republic as well as the information about safe operation of VVER-1000 unit. The text describes main principles and safety systems used in nuclear power plant. Chapter three deals with abnormal situations, including detailed description of the most considered situation. Another objective that the thesis deals with is INES scale with description of INES incidents that were reported on the Temelin power plant. Key point of the thesis is described in a fourth chapter which brings detailed analysis of VVER-1000 own power consumption – its devices, power supply, power modes and optimization possibilities. Last part of the work is dedicated to economic study of nuclear engineering in general and economic results of switching to own consumption mode.

Key words

Nuclear power plant Temelin, INES scale, electrical scheme of VVER-1000 unit, Temelin own power consumption

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 8.5.2012

Bc. Martin Stránský

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé diplomové práce paní Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za její odbornou pomoc při vypracování diplomové práce a vřelý přístup.

Také bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřeji Trubkovi. a panu Ing. Václavu Bláhovi, CSc za poskytnutí cenných rad a informací z praxe.

Obsah

SEZNAM ZKRATEK.....	9
ÚVOD	10
1 CHARAKTERISTIKA BLOKŮ VVER.....	12
1.1 OKB GIDROPRESS.....	12
1.2 VVER VE SVĚTĚ	12
1.3 VVER V ČR	15
1.3.1 Jaderná elektrárna Dukovany	15
1.3.2 Jaderná elektrárna Temelín.....	15
2 BEZPEČNÝ PROVOZ BLOKU VVER-1000.....	17
2.1 ATOMOVÝ ZÁKON	17
2.1.1 Předmět úpravy (§1).....	17
2.2 ZÁKLADNÍ POJMY	18
2.2.1 Jaderná bezpečnost.....	18
2.2.2 Režimy provozu jaderných elektráren	18
2.2.3 Bezpečnostní systémy	19
2.2.4 Redundance.....	19
2.2.5 Diverzita	20
2.2.6 Ochrana do hloubky	21
2.3 STAVOVÉ STROMY KRITICKÝCH BEZPEČNOSTNÍCH FUNKCÍ	23
3 ABNORMÁLNÍ PROVOZ VVER 1000 A HAVARIJNÍ STAVY.....	26
3.1 KLASIFIKACE HAVÁRIÍ A STUPNICE INES	26
3.1.1 Základní typové situace.....	26
3.1.2 Maximální projektová havárie	28
3.1.3 Analýza průběhu maximální LOCA	29
3.2 STUPNICE INES	29
3.3 ZAŘAZENÍ UDÁLOSTÍ NA JETE DO INES	30
4 ELEKTRICKÉ SCHÉMA A VLASTNÍ SPOTŘEBA JE TEMELÍN.....	32
4.1 ELEKTRICKÉ ZDROJE NAPÁJENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY	33
4.1.1 Pracovní zdroje napájení VS	33
4.1.2 Rezervní zdroje napájení VS	35

4.1.3	Nouzové zdroje napájení VS	35
4.2	ROZDĚLENÍ SPOTŘEBIČŮ VLASTNÍ SPOTŘEBY	36
4.2.1	Spotřebiče I. kategorie	36
4.2.2	Spotřebiče II. kategorie	36
4.2.3	Spotřebiče III. kategorie	36
4.2.4	Spotřebiče III/I. kategorie	37
4.2.5	Spotřebiče III/II. kategorie	37
4.3	SYSTÉM NAPÁJENÍ SPOTŘEBIČŮ VLASTNÍ SPOTŘEBY	37
4.3.1	Bezpečnostní systém ZN kategorie I a II	38
4.3.2	Systém ZN kategorie III/I. a III/II	39
4.3.3	Systém nezajištěného napájení III. kategorie	40
4.4	REŽIMY NAPÁJENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY	40
4.5	PŘECHOD NA VLASTNÍ SPOTŘEBU Z BĚŽNÉHO PROVOZU	41
4.5.1	Základní typové situace 1, 2 a 3	41
4.5.2	Základní typová situace 4 – ostatní havárie	42
4.5.3	Základní typová situace 5 – vnější vlivy	42
4.5.4	Sjíždění a najíždění bloku	44
5	EKONOMICKÉ ASPEKTY PŘECHODU NA VLASTNÍ SPOTŘEBU	45
5.1	INSTALOVANÝ VÝKON A BILANCE VYROBENÉ ELEKTŘINY	45
5.2	NÁKLADY NA VÝROBU ELEKTRICKÉ ENERGIE	47
5.2.1	Cena jaderného paliva	48
5.3	EKONOMICKÝ VLIV ODSTÁVKY	48
6	OPTIMALIZACE VLASTNÍ SPOTŘEBY JADERNÉ ELEKTRÁRNY	50
6.1	EKONOMICKÁ STRÁNKA OPTIMALIZACE	50
6.2	OPTIMALIZACE VLASTNÍ SPOTŘEBY	51
6.3	PRŮBĚH METODY PRO OPTIMALIZACI ZAŘÍZENÍ	52
6.3.1	Matematické modely optimalizačních metod	52
6.3.2	Realizace optimalizačního řešení	53
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM TABULEK	56
	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

Seznam zkratk

- I. O.** – primární okruh jaderné elektrárny
- II. O.** – sekundární okruh jaderné elektrárny
- AZ** – aktivní zóna
- DG** – dieselgenerátor
- FVE** – fotovoltaické elektrárny
- INES** – Mezinárodní stupnice jaderných událostí (z anglického: *The International Nuclear Event Scale*)
- IŘS** – informační a řídicí systémy
- JB** – jaderná bezpečnost
- JE** – jaderné elektrárny
- JEDU** – jaderná elektrárna Dukovany
- JETE** – jaderná elektrárna Temelín
- KBF** – kritická bezpečnostní funkce
- LOCA** – havárie s únikem chladiva (z anglického: *Loss-of-Coolant Accident*)
- NN** – nezajištěné napájení
- PE** – parní elektrárny
- PG** – parogenerátor
- PPE** – paroplynové elektrárny
- PSE** – plynové a spalovací elektrárny
- PVE** – přečerpávací vodní elektrárny
- TG** – turbogenerátor
- VE** – vodní elektrárny
- VS** – vlastní spotřeba elektrické energie
- VTE** – větrné elektrárny
- VVER** – vodo-vodní energetický reaktor (z ruského: *Vodo-Vodyanoiĭ Energeticheskiĭ Ryeaktor*)
- SVBR** – olovo-bizmutový rychlý reaktor (z ruského: *Svintsovo-Vismutovyĭ Bystryĭ Ryeaktor*)
- ZN** – zajištěné napájení

Úvod

Ještě před dvěma lety se zdálo, že přichází nová éra jaderné energetiky – jaderná renesance. Lidé začali opět naslouchat nabídkám na výstavbu dalších jaderných elektráren a nehoda z Černobylu se již zdála být překonána. Pak ovšem přišla přírodní a s ní spjatá jaderná katastrofa a důvěra v bezpečnost jaderných elektráren opět klesla. Po nehodě v Japonské jaderné elektrárně Fukušima dne 11. března 2011 se lidé po celém světě opět začali ptát, zda jsou jaderná zařízení opravdu připravena na vše, co by je mohlo ohrozit. Novým testům neunikly ani jaderné elektrárny Temelín a Dukovany.

Hlavní příčinou Fukušimské havárie bylo nedostatečné chlazení aktivní zóny uvnitř reaktoru. Poté, co elektrárna ztratila napájení zvenčí, byly poslední nadějí elektrárny dieselgenerátory. Ty měly napájet spotřebiče vlastní spotřeby výrobních bloků, ale bohužel byly zaplaveny. A nejen o vlastní spotřebě jaderné elektrárny bude vypovídat tato diplomová práce.

Nejprve se seznámíme s oběma jadernými elektrárnami nacházejícími se na území České republiky – Dukovany a Temelínem, s jejich historií, vývojem a základními technickými parametry. Když je řeč o těchto elektrárnách, musíme zmínit i společnost, která se zasloužila o projekt a výstavbu obou jaderných zařízení.

V druhé kapitole se již přiblížíme více k jádru práce a budou rozebrány podmínky bezpečného provozu bloku VVER-1000, jaderná bezpečnost a přiblíženy budou hlavní pojmy jaderné bezpečnosti. Na ty pak bude navázáno v kapitole třetí, která bude pojednávat o abnormálních stavech, které se mohou ve spojitosti s VVER-1000 objevit, a stress-testech, které jsou velmi ožehavým tématem evropské energetiky po nehodě ve Fukušimě. Kapitola bude obsahovat klasifikaci havárií, které jsou v rámci projektu uvažovány až po maximální projektovou havárii, kterou se budeme snažit hlouběji analyzovat. Závěrem této kapitoly budou analyzovány události, které se v posledních letech na elektrárně Temelín vyskytly.

Ve čtvrté kapitole bude podrobně rozebrána stěžejní část této diplomové práce, a to vlastní spotřeba jaderné elektrárny Temelín. Nejprve bude nastíněno základní elektrické schéma výrobního bloku a po něm již přijde rozbor zdrojů napájení vlastní spotřeby, jejich diferenciací a zajištění. Poté budou popsány všechny skupiny spotřebičů včetně jejich potřeb a způsobu napájení. Závěrem této kapitoly budou také upřesněny jednotlivé

režimy, ve kterých se může elektrárna nacházet, a přiblíženy způsoby zregulování na vlastní spotřebu. Závěrem kapitoly uvedu některé možnosti optimalizace vlastní spotřeby.

Pátá kapitola, která tuto práci uzavře, bude vypovídat o ekonomické stránce jaderné elektrárny Temelín včetně vlivu odstávek a přechodu na vlastní spotřebu z běžného chodu jaderné elektrárny Temelín.

1 Charakteristika bloků VVER

Reaktory VVER, popřípadě WWER v anglické literatuře, jsou tlakovodní reaktory vyvíjené konsorciem OKB Gidropress, Škoda JS a Atomstroyexport. K základním charakteristikám těchto reaktorů patří například chlazení i moderování lehkou vodou, mírně obohacený uran použitý jako palivo, šestiúhelníkové palivové kazety, parogenerátory umístěné ve vodorovné poloze a vzhledem k tlakovodnímu charakteru reaktoru samozřejmě oddělený primární a sekundární chladicí okruh. [1, 6]

1.1 OKB Gidropress

Úřad OKB Gidropress (OKB je zkratkou *Opytnoe konstruktorskoe byuro* = Experimentální a konstrukční úřad) byl založen na základě vyhlášky Rady lidových komisařů SSSR v lednu roku 1946. Podnik se angažuje ve všech odvětvích jaderného strojírenství, od výzkumu a vývoje, přes teoretické a analytické návrhy až po vlastní realizaci projektů. Všechny činnosti jsou řízeny základními principy společnosti, kterými jsou zvýšená bezpečnost, spolehlivost, efektivita a konkurenceschopnost jak v Rusku, tak i v zahraničí.

První reaktory byly vystavěny v 60. letech 20. století. Jednalo se o tři základní projekty:

- 1- reaktory pro jaderné ponorky chlazené směsí olova a bizmutu (SVBR)
- 2- zařízení pro sodíkem chlazené rychlé reaktory
- 3- reaktory pro jaderné elektrárny chlazené i moderované vodou (VVER)

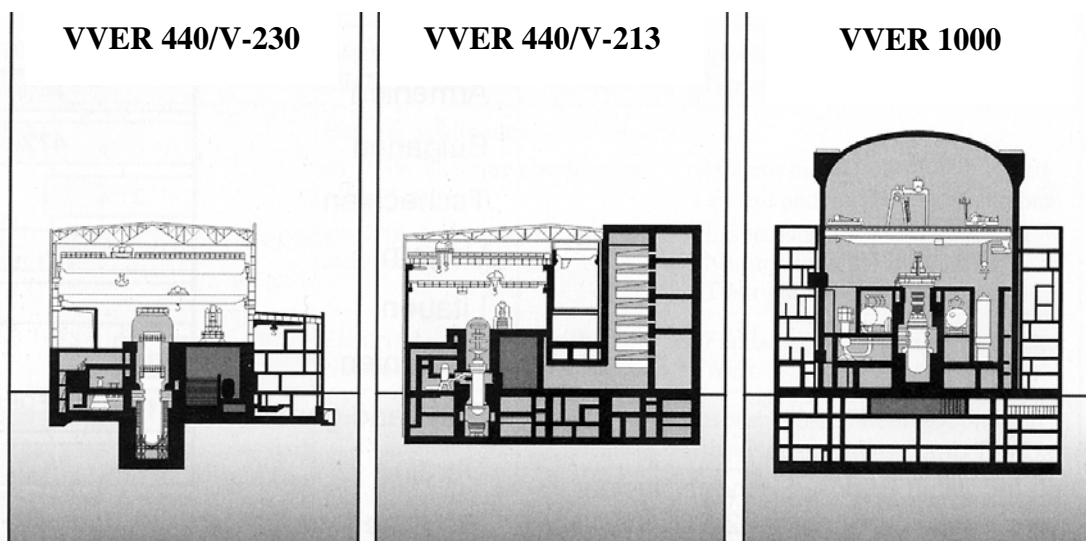
Podnik se snaží jít s nejnovějšími trendy a požadavky a v historii přispěl celosvětově významnou měrou k vývoji jaderného průmyslu. Jeho projekty byly realizovány především ve střední a východní Evropě. V poslední době však zvyšující se poptávka po jaderné energetice v Asii donutila Gidropress také k expanzi daleko na východ. [4, 6]

1.2 VVER ve světě

První reaktory VVER pro jaderné elektrárny začaly být stavěny v šedesátých letech. Byly to VVER-210 Novovoronež-1 (provoz 1964-1988, hrubý výkon 210MWe) a Rheinsberg-1 (1966-1990, 70MWe) dostavěné v letech 1964, respektive 1966. V současné době jsou však již přes dvacet let odstavené. Odstavený je i druhý reaktor ve Novovoroneži, který byl prototypem již VVER-365 (1969-1990, 365MWe).

Po roce 1970 již přišly na svět první reaktory z řady VVER-440. Celkem jich bylo postaveno 35, včetně Německého Greifswald-6, který byl sice ve východním Německu roku 1989 dostavěn, ale nikdy neuveden do provozu. Posledními reaktory VVER-440 uvedenými do výstavby byly reaktory v jaderné elektrárně Mochovce (Slovensko), a to roku 1982 (2 již dostavěné bloky), respektive 1985 (plánované dokončení dalších 2 bloků v letech 2012-2013). Celkový počet dokončených reaktorů tohoto typu je 35. Dalších 13 rozestavěných reaktorů nebylo dostavěno. [4, 19]

Roku 1974 však již Gidropress začal s výstavbou prvního bloku VVER-1000, již tradičně v elektrárně Novovoronež (1980-2035?, 1000MWe). Plánovaná doba životnosti je zde odhadována až na 55 let, u ostatních VVER-1000 zhruba 30 let, stejně jako u VVER-440. Od roku 1980 bylo postaveno 29 jednotek VVER-1000, během několika let by měly být dostaveny další. Stejně jako ostatní společnosti jaderného strojírenství se i Gidropress u těchto reaktorů snaží klást ve vývoji důraz na zvyšování bezpečnosti, efektivnosti nebo hospodárnosti. Je zřejmá snaha o zjednodušování konstrukce reaktorů. Vývoj reaktorů VVER je patrný na obrázku 1.1 níže.



Obr. 1.1 – Vývoj reaktorů VVER [4, 7]

Seznam dosud realizovaných řad a modelů reaktorů VVER je zpracován v následujícím seznamu:

Seznam reaktorů VVER					
Řada	Model	První reaktor dostavěn	Navrženo	Postaveno	Stále v provozu
VVER-210	V-1	1964	2	2	0
VVER-365	V-3M	1969	1	1	0
VVER-440	V-179	1971	2	2	2
	V-230	1973	14	14	3
	V-311	1977	2	2	2
	V-213	1980	26	17	16
	V-318	zrušeno	4	0	0
	součet:		48	35	23
VVER-1000	V-187	1980	1	1	1
	V-302	1982	1	1	1
	V-320	1984	48	22	22
	V-428	2006	2	2	2
	V-338	1984	3	3	3
	V-412, 446, 466	ve výstavbě	6	0	0
	součet:		61	29	29
VVER-1200		ve výstavbě	3	0	0

Tab. 1.1 – Seznam reaktorů VVER ve světě [8, 17, 19]

Během posledních čtyř let byla v Rusku zahájena stavba 3 nových reaktorů s označením VVER-1200, které se již zcela řadí do nejvyspělejší třetí generace reaktorů.

U této nejmodernější generace reaktorů se oproti druhé generaci předpokládá zvýšení efektivnosti přeměny tepelné energie na elektrickou až na 39%. Toho má být dosaženo vyššími teplotami v celém chladicím cyklu, což je již v současnosti možné díky pokroku ve vývoji materiálů. Další velmi podstatnou změnou, která je od reaktorů 3. generace očekávána, je faktor využití pohybující se okolo 95%. Posunout by se měla i minimální životnost bloků, která by měla dosáhnout 60 let. Samozřejmostí je i zvýšení bezpečnosti delším reakčním časem operátorů, dvojitým kontejmentem obklopujícím primární okruh a zjednodušením aktivní zóny v kombinaci s větším množstvím pasivních bezpečnostních systémů. Tím vším by mělo dojít k stonásobnému snížení pravděpodobnosti tavení reaktoru z 1/10 000 let na 1/1 000 000 let a tisícinásobnému snížení úniku radioaktivity z 1/100 000 let na 1/100 000 000 let. [4, 17]

1.3 VVER v ČR

V České Republice se nachází dvě jaderné elektrárny. Starší z nich je jaderná elektrárna Dukovany s čtyřmi bloky. 1., 2. a 4. blok disponují výkonem 460MW, 3. blok po zvýšení výkonu až 500MW, celkově tedy 1880MW. Druhou jadernou elektrárnou je JE Temelín s celkovým výkonem 2000MW (2x1000MW). [8, 9]

1.3.1 Jaderná elektrárna Dukovany

Stavba JEDU započala v roce 1970 podpisem smlouvy o výstavbě 4 bloků 30 km jihovýchodně od Třebíče. První blok s výkonem 440MW začal dodávat do sítě energií v roce 1985, poslední čtvrtý o tři roky později. Reaktory obou dvojbloků jsou typu VVER-440 model V 213. Tepelný výkon každého bloku je 1375MW. U třetího bloku, na kterém již došlo mezi roky 2005 až 2009 k modernizaci systému měření a regulace, rotoru turbíny a satoru turbogenerátoru, bylo dosaženo zvýšení výkonu až na 500MW, čímž se zvedla účinnost přeměny tepelného výkonu na elektrický až na 36,4%. K zvýšení výkonu by mělo dojít na všech čtyřech blocích do konce roku 2012. [1, 9, 17]

Jako palivo na JEDU je použit středně obohacený uran. Od spuštění v roce 1985 elektrárna pracovala s tříletým palivovým cyklem. V roce 2003 se však přešlo na čtyřletý cyklus s méně obohaceným palivem Gd-1 (4,38% U235), v roce 2005 na pětiletý cyklus s obohacením Gd-2 (4,25% U235). V současnosti jsou Dukovanské reaktory provozovány s palivem Gd-2M (4,38% U235) s úplným pětiletým cyklem. V několika následujících letech se předpokládá přechod na šestiletý palivový cyklus. [10, 18]

JEDU patří mezi nejlépe hodnocené jaderné elektrárny v celosvětovém měřítku. Je řazena mezi 20% nejspolehlivějších elektráren a díky minimálnímu množství a krátké době neplánovaných odstávek se ve statistikách vyšplhala mezi pomyslnou špičku. Faktor využití se v posledních letech pohyboval dokonce okolo 94%, a to hlavně na blocích 1 a 2. [8]

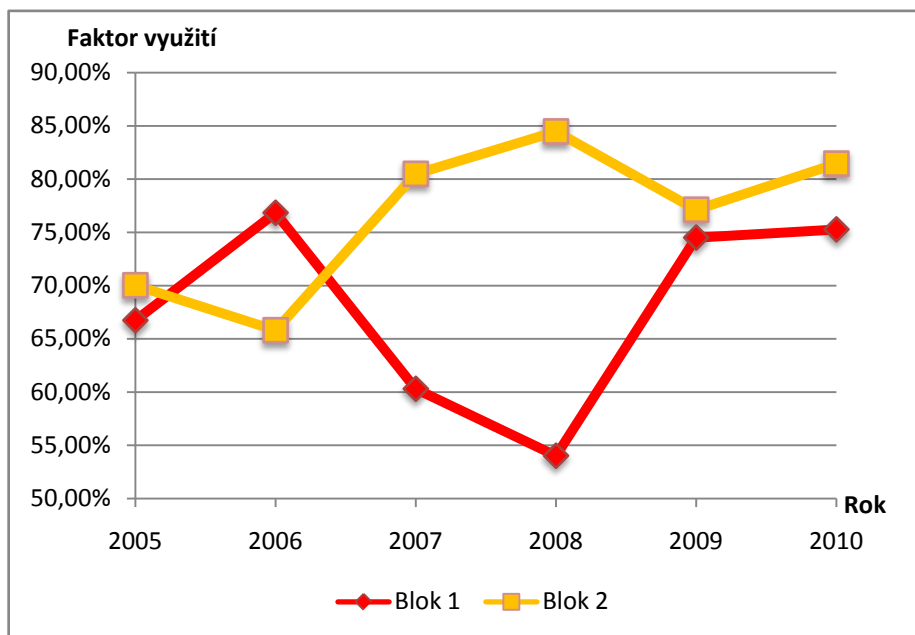
1.3.2 Jaderná elektrárna Temelín

Nejvýkonnější elektrárnou v České republice o výkonu 2000 MW je JETE ležící v obci Temelín v jižních Čechách. Nachází se 5 km od Týna nad Vltavou a necelých 50 km od hranic s Rakouskem, což především po spuštění elektrárny vyvolávalo vysoké množství sporů. JETE vyrobila první kilowatthodinu v prosinci 2000, a to v prvním

bloku. Stavba byla zkolaudována o 6 let později a trvala tedy 19 let - od února 1987, kdy byla stavba zahájena, do listopadu 2006. [1, 9, 19]

Elektrina je vyráběna dvěma bloky obsahujícími tlakovodní reaktory VVER 1000 typu V-320. Výkon turbogenerátoru obou bloků se v druhé polovině roku 2011 pohyboval okolo 1015 MWe, a jelikož je tepelný výkon 3000 MWt, efektivita přeměny tepelné energie na elektrickou mírně překračuje 33%. Teplota chladiva při výstupu z reaktoru je 320°C při tlaku 15,7 MPa, oproti tomu hodnoty JEDU dosahují 297°C a 12,25MPa.

I z důvodu toho, že JETE patří mezi relativně mladé elektrárny, je její využitelnost velice kolísavá, a to především kvůli prvnímu bloku. Zatímco na druhém bloku se faktor využití pohybuje posledních 5 let mezi 77-84%, průběh využitelnosti bloku jedna není zdaleka tak klidný, jak se můžete přesvědčit na následujícím obrázku 1.2.



Obr. 1.2 – Vývoj faktoru využití obou bloků JETE v letech 2005-2010 [8]

Důvodem poklesu faktoru využití v letech 2007 a 2008 jsou především komplikace při modernizaci turbíny, především jejího vysokotlakého dílu. Tím se docílilo zvýšení elektrického výkonu z 994 MWe na 1020 MWe. [8, 9]

Vývoj paliva na JETE je oproti JEDU o něco pestřejší vzhledem k faktu, že palivo bylo v historii elektrárny dodáváno od 2 různých firem. Prvním dodavatelem paliva byl americký Westinghouse, druhým pak ruská korporace TVEL, která začala dodávat palivo v létě 2011. [18]

2 Bezpečný provoz bloku VVER-1000

Jaderná elektrárna Temelín je od samého začátku provozována v souladu s platnou legislativou upravující bezpečný provoz jaderných zařízení, který v ČR představuje zákon č. 18/1997 Sb. Základní body jeho znění jsou zpracovány v podkapitole 2.1.

2.1 Atomový zákon

Atomový zákon (Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření a o změně a doplnění některých zákonů) byl přijat v roce 1997 a byl to první zákon, který shrnul a upravil systémově právo, které se týká jak jaderné energie, JB, tak i nakládání s radioaktivními odpady. Je rozdělen do 5 částí, z nichž atomový zákon je rozpracován v části první. Obsahuje šest hlav:

- 1) Úvodní ustanovení
- 2) Obecné podmínky pro vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie, činností vedoucích k ozáření a zásahů ke snížení ozáření
- 3) Podmínky pro využívání jaderné energie a ionizujícího záření
- 4) Nakládání s radioaktivními odpady
- 5) Občanskoprávní odpovědnost za jaderné škody
- 6) Výkon státního dozoru a pokuty

Další části zákona (2. – 5.) jsou změnami a doplněním zákonů vztahujících se k okresním úřadům, policii ČR a daním z příjmů. [2]

2.1.1 Předmět úpravy (§1)

Tento zákon upravuje

- a) způsob využívání jaderné energie a ionizujícího záření a podmínky vykonávání činností souvisejících s využíváním jaderné energie a činností vedoucích k ozáření,
- b) systém ochrany osob a životního prostředí před nežádoucími účinky ionizujícího záření,
- c) povinnosti při přípravě a provádění zásahů vedoucích ke snížení přírodního ozáření a ozáření v důsledku radiačních nehod,
- d) zvláštní požadavky pro zajištění občanskoprávní odpovědnosti za škody v případě jaderných škod,
- e) podmínky zajištění bezpečného nakládání s radioaktivními odpady,

f) výkon státní správy a dozoru při využívání jaderné energie, při činnostech vedoucích k ozáření a nad jadernými položkami. [2, 5]

2.2 Základní pojmy

V souvislosti problematikou provozu jaderných zařízení se často setkáváme s následujícími pojmy:

2.2.1 Jaderná bezpečnost

- stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod [2, 3]

2.2.2 Režimy provozu jaderných elektráren

Provoz jaderných elektráren se rozděluje do tří základních kategorií, ve kterých se může nacházet. Jsou jimi provoz normální, abnormální a mimořádný (havarijní). Filozofie bezpečného provozu bloku pak vychází ze zásady zachování bezpečných podmínek ve všech těchto třech provozech.

Normální provoz

- všechny stavy a operace plánovaného provozu jaderně energetického zařízení při dodržení limitů a podmínek pro bezpečný provoz
- např.: spouštění, ustálený provoz a odstavování reaktoru; zvyšování a snižování jeho výkonu; údržba, opravy a výměna paliva

Abnormální provoz

- stavy, operace a události, které jsou neplánované; jejich výskyt lze při provozu očekávat; vybočení hlavních parametrů bloku z normálních provozních mezí
- výpadky zařízení I. O. nebo II. O., které nevedou bezprostředně k aktivaci systémů ochrany reaktoru nebo bloku, ale jsou vyřešeny limitačními systémy (při dosažení nastavených hodnot limitačního systému se spustí procedury vedoucí k omezení nebo ke snížení výkonu reaktoru tak, aby bylo zabráněno dosažení hodnot ochrany reaktoru), regulačními systémy nebo zásahem obsluhy
- po odstranění takovýchto stavů se jaderné zařízení vrací zpět do normálního provozu
- např.: náhlý pokles zatížení TG, výpadek turbíny, ztráta některých systémů bloku

Mimořádný (havarijní) provoz

- události způsobené selháním nebo porušením stavebních konstrukcí, technologických souborů a zařízení, kterých se dosáhlo vnějšími vlivy nebo chybami obsluhy
- negativně ovlivňují bezpečnost provozu jaderného zařízení, dochází k porušení provozních limitů a podmínek, mohou způsobit porušení palivových článků
- následují zásahy systémů ochrany reaktoru nebo bloku. [3, 11]

Porucha

- událost ukončující provozuschopnost systému
- provozuschopnost systému – stav, kdy je systém schopen plnit požadované funkce a hodnoty všech parametrů jsou v povolených mezích
- v systému může dojít k jednoduché poruše (porucha pouze jednoho prvku systému) nebo vícenásobné poruše. Pokud jsou poruchy způsobeny stejnou příčinou a vznikají v krátkém časovém intervalu, hovoříme o poruše se společnou příčinou
- aby se množství poruch a jejich potenciální následky zminimalizovaly, byly zavedeny bezpečnostní systémy ochran

2.2.3 Bezpečnostní systémy

Bezpečnostní systémy rozdělujeme do třech základních kategorií:

- aktivní – systémy dodávají čerpadly kyselinu boritou a další roztoky
– vysokotlaký, nízkotlaký a sprchový systém
- pasivní – využívají přírodních zákonů, například gravitační síly
- inherentní – vyplývají z fyzikální podstaty systému, nikoli lidských opatření
– mnohem vyšší inherentní bezpečnosti oproti varným reaktorům je dosaženo u bezpečnostních systémů tlakovodních reaktorů, jejichž účinnost klesá s rostoucí teplotou [3]

2.2.4 Redundance

Redundance neboli zálohování je vlastnost systému, která slouží k zamezení následků náhodných poruch zálohováním prvků, či dílčích systémů. Toto zálohování má za následek fakt, že náhodné selhání jednotlivého prvku neovlivní funkci celého systému. Tohoto základního principu je využíváno velice často. Na JETE se konkrétně jedná například o vysokotlaký a nízkotlaký systém chlazení aktivní zóny nebo systém havarijního napájení PG. Tyto systémy jsou zálohované s logikou 3 x 100% neboli 1 z 3,

jedná se tedy o 3 identické větve, u kterých stačí, aby byl funkční alespoň 1 ze systémů, a provoz může pokračovat.

Na základě pravděpodobnostních analýz PSA (Probabilistic Safety Assessment) se však uplatňují i jiné systémy zálohování, například u společnosti Westinghouse se objevuje systém 4 x 75% nebo 4 x 50%. Výhoda zálohování 4 x 50% spočívá v nižších nárocích na materiály, či místo, jelikož je ve skutečnosti k dispozici pouze rezerva 100%. Bezpečnost však je srovnatelná, jelikož stejně jako u logiky 3 x 100% je celý systém schopen provozu ještě při výskytu poruch ve dvou větvích, viz obrázek 2.1.



Obr. 2.1 – Metody zálohování 3 x 100% a 4 x 50%

Nevýhodou tohoto principu je fakt, že pokud má systém nějaké slabé místo, může dojít k poruše na všech třech větvích – poruše se společnou příčinou.

Aby se zabránilo poruchám se společnou příčinou způsobených totožným umístěním systémů, využívá se principu separace, kdy se jednotlivé redundantní větve prostorově oddělí. [3]

2.2.5 Diverzita

Diverzita je ještě o něco důmyslnější způsob jak zabránit poruše se společnou příčinou (konstrukční, systematická či výrobní vada) než separace a docílí se jí tak, že jsou jednotlivé zálohovací větve realizovány různými výrobci, odlišnými postupy nebo na základě různých fyzikálních principů. Jedním z příkladů takto diverzifikované zálohy může být použití záložního systému na hydraulickém principu k zálohování systému na principu elektrickém.

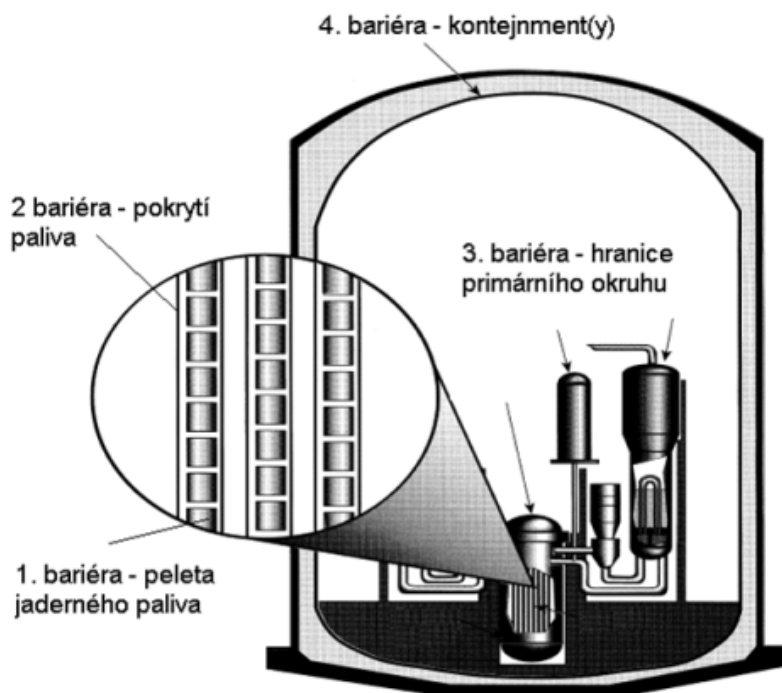
2.2.6 Ochrana do hloubky

Dodržování všech zásad JB je dosahováno plněním principů ochrany do hloubky. Ústředním principem je myšlenka násobných bariér sloužících k prevenci nehod, respektive šíření radioaktivních látek. Při normálním provozu elektrárny musí být k dispozici všechny složky hloubkové ochrany, při abnormálním či havarijním provozu pak musí být tyto složky alespoň v určených limitech. [3, 11]

Ochrana do hloubky je zajišťována dvěma způsoby, které se vzájemně doplňují a prolínají. Jsou jimi:

1. Fyzické bariéry

1. Struktura paliva a 2. Povlak palivových tyčí
– k záchytu a zabránění úniku pevných i plyných produktů štěpení
3. Tlaková hranice I. O.
– nádoba reaktoru a stěny potrubí odolné vůči teplotnímu a radiačnímu zatížení
4. Ochranná hermetická obálka
– kontejnment – jednoduchý nebo dvojitý
– u JETE se jedná o vrstvu železobetonu silnou 1,2 m s ocelovou hermetickou výstelkou

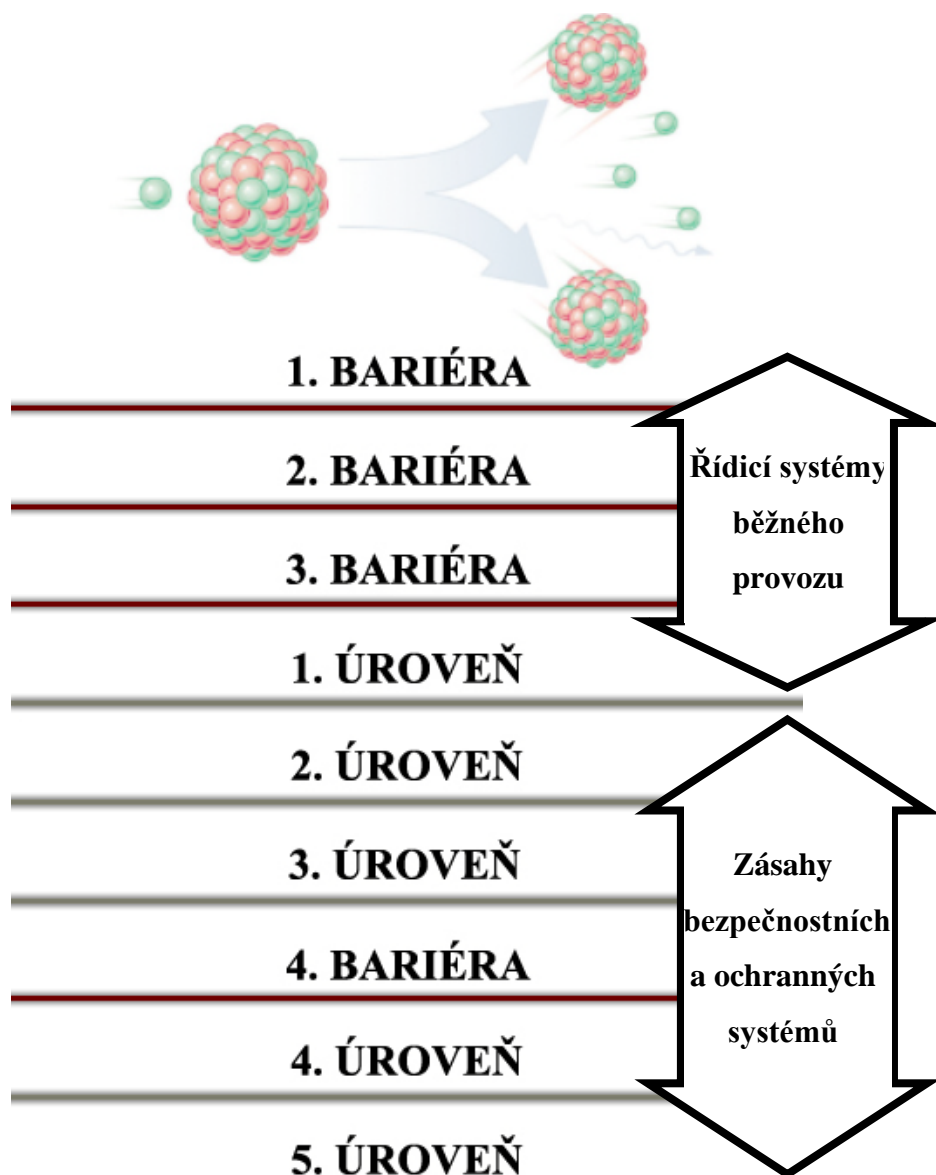


Obr. 2.2 – Fyzické bariéry ochrany do hloubky [11]

2. Obranné úrovně

1. úroveň – regulační systém
 - prevence: konzervativní projekt, kultura bezpečnosti, kontrola jakosti
2. úroveň – limitační systém
 - snaha o co nejrychlejší návrat do původního stavu
 - první zásahy bezpečnostních a ochranných systémů
3. úroveň – ochrana reaktoru
 - zabránění rozvoji poruchy do projektových nehod či havárií
 - systémy havarijního chlazení AZ, snižování tlaku v I. O.
4. úroveň – bezpečnostní systémy
 - udržení celistvosti ochranné obálky (fyzická bariéra 4)
 - lapač AZ, systém pasivního odvodu tepla z ochranné obálky, systém kontroly vodíku
5. úroveň – havarijní plány
 - ochrana pracovníků a obyvatelstva v případě selhání všech předchozích opatření

Kombinace a provázání obou složek ochrany do hloubky, kterými jsou zmíněné fyzické bariéry a ochranné úrovně, je znázorněna na obrázku 2.3 níže. [3, 4, 12]



Obr. 2.3 – Kombinace fyzických bariér a obranných úrovní [3]

2.3 Stavové stromy kritických bezpečnostních funkcí

Na JETE se používá celkem 6 takzvaných kritických bezpečnostních funkcí (dále KBF). Prostřednictvím vyhodnocení jejich stavů se získávají stavové stromy KBF, které tvoří systematický prostředek pro hodnocení bezpečného stavu bloku. KBF zajišťují neporušenost fyzických bariér a postupy pro jejich případné obnovení tvoří další stupeň ochrany do hloubky.

Použitými KBF na JETE jsou v pořadí od nejvyšší k nejnižší prioritě:

- A. udržování **Podkritičnosti AZ**
 - minimalizací vývinu tepla v palivu
- B. udržování **Chlazení AZ**
 - zajištěním chladiwa I. O. pro odvod tepla z AZ
- C. udržování **Odvodu tepla z I. O.**
 - zajištěním chladiwa II. O. pro odvod tepla z AZ a I. O.
- D. udržování **Neporušenosti I. O.**
 - zabráněním narušení integrity I. O.
- E. udržování **Neporušenosti kontejnmentu**
 - zabráněním narušení integrity ochranné hermetické obálky
- F. udržování **Zásoby chladiwa I. O.**
 - zajištěním chladiwa pro efektivní odvod tepla z AZ, kontrola tlaku I. O.

Jak již bylo zmíněno výše, KBF se starají o udržení funkčnosti fyzických bariér. Jsou s nimi svázány následujícím způsobem:

Bariéra	Kritická bezpečnostní funkce
Struktura paliva a povlak palivových tyčí (bariéra 1 + 2)	A. udržování Podkritičnosti AZ
	B. udržování Chlazení AZ
	C. udržování Odvodu tepla z AZ
	F. udržování Zásoby chladiwa I. O.
Tlaková hranice I. O. (bariéra 3)	C. udržování Odvodu tepla z AZ
	D. udržování Neporušenosti I. O.
	F. udržování Zásoby chladiwa I. O.
Kontejnment (bariéra 4)	D. udržování Neporušenosti kontejnmentu

Tab. 2.1 – Provázanost kritických bezp. funkcí s fyzickými bariérami [3]

Pokud dojde k porušení některé z těchto funkcí, musí operativní personál zasáhnout použitím konkrétního postupu na základě vyhodnocení příslušného Stavového stromu, který má vždy pouze jeden vstup, ale existuje u něj několik výstupů. U každého výstupu je pak uveden konkrétní postup vedoucí k obnovení KBF. Za porušení funkce se považuje

stav, který je vyhodnocen jinak než uspokojivý. Stupně ohrožení KBF přitom rozlišujeme a označujeme následovně:

1. Červený vstup – extrémní ohrožení
2. Oranžový vstup – vážné ohrožení
3. Žlutý vstup – neuspokojivý stav
4. Zelený vstup – uspokojivý stav

Platí, že pokud se vyskytuje 1 jakákoli signalizace extrémního ohrožení a další signalizace nižších stupňů, musí být ostatní postupy přerušeny a zahajuje se postup pro obnovování ohrožené kritické bezpečnostní funkce s extrémním ohrožením. Obdobně se postupuje i v případě nižších signalizovaných stupňů. Zároveň se klade důraz i na pořadí KBF v případě shodného ohrožení, musí být tedy například přednostně řešen postup obnovení Podkritičnosti AZ před obnovením Neporušenosti I. O. [3]

3 Abnormální provoz VVER 1000 a havarijní stavy

Jak již bylo řečeno na začátku kapitoly 2, za abnormální provoz elektrárny je považován provoz, při němž nastávají stavy, operace a události, které jsou neplánované, avšak jsou předvídatelné a po jejich odstranění se zařízení vrací zpět do normálního stavu.

Pokud však limitační a regulační systémy nebo obsluha reaktoru abnormální situaci nevyřeší adekvátně, může reaktor přejít do stavu havarijního. Následkem této situace je zásah systémů ochrany reaktoru nebo ochrany bloku. Subsystem ochrany reaktoru spočívá v zastavení jaderné reakce v AZ reaktoru uvolněním regulačních tyčí a jejich volným pádem do dolní koncové polohy. Subsystem ochrany bloku pak plní ostatní bezpečnostní funkce spuštěním zásahů nebo sekvencí zásahů. [4, 12]

3.1 Klasifikace havárií a stupnice INES

Projektová havárie je nehoda, se kterou projekt jaderného zařízení počítá a jejíž řešení je v projektu zahrnuto. Maximální projektová havárie pak vychází z důsledků hypotetické havárie, která má největší možný negativní dopad na jaderné zařízení.

3.1.1 Základní typové situace

Při klasifikaci havárií rozlišujeme 5 základních typových situací, ke kterým může v jaderné elektrárně dojít. [3, 4]

1. Růst výkonu reaktoru

Jedná se o havárii, která je zaviněna kladnou změnou reaktivity, která má za následek zvyšování výkonu a s tím zvyšování vývinu tepla, které nestihne být dostatečně rychle odváděno. K této situaci může dojít jednak při spuštění reaktoru na nízkém výkonu, kdy v reaktoru ještě není dostatečné množství tepelných neutronů a nepůsobí tedy teplotní zpětná vazba, nebo již při provozu na plném výkonu.

Podnětem pro kladnou změnu reaktivity může být vystřelení jedné tyče nebo pomalé vysouvání skupiny regulačních tyčí, uvolnění usazenin bóru, vtok studené vody do AZ nebo například chybné zavezení paliva. [3, 12]

2. Havárie se ztrátou chladiva

K této situaci může dojít následkem tří možných podnětů, kterými jsou porušení těsnosti smyček, prasknutí potrubí nebo v nejhorším případě prasknutí reaktorové nádoby. Tato havárie má za následek snížení nebo úplné omezení chladicí schopnosti I. O. K prasknutí potrubí pak může dojít v třech základních místech

- v hlavním potrubí I. O., což se u tlakovodních reaktorů považuje za maximální projektovou havárii,
- v trubce PG,
- v některé z trubek se středním či malým únikem chladiva. [3]

3. Havárie v systému odvodu tepla

V této kategorii se jedná o problémy s odvodem tepla z reaktoru, které mohou nastat problémem jak v primárním tak především v sekundárním okruhu. S ohledem na vysoký zbytkový tepelný výkon reaktoru přetrvává nebezpečí i v případě jeho odstavení. V I. O. se mluví především o selhání HCČ, ke kterému může dojít vinou mechanické či elektrické závady. Jelikož se jedná o jednu z klíčových částí I. O., je její zálohování řešeno redundantně. Teoretickými haváriemi v II. O. mohou být:

- výpadek parní turbíny,
- selhání hlavního napájecího čerpadla II. O. nebo prasknutí trubek II. O., a tím selhání dodávky napájecí vody do PG,
- prasknutí hlavního parního kolektoru, který má potenciálně velmi nebezpečné následky. Při poruše totiž dochází k prudkému poklesu tlaku, což je regulačním systémem řešeno zvýšením výkonu reaktoru, což může mít fatální následky,
- selhání odvodu tepla v kondenzátoru, při čemž je problém řešen odstavením turbíny a dále jako při jejím výpadku. [3, 9]

4. Ostatní havárie

Do této kategorie se řadí havárie spojené s výrobou, či manipulací s palivem a havárie při práci s radioaktivním odpadem.

5. Vnější vlivy

Vnější vlivy, které jsou pro jaderné elektrárny brány v potaz, jsou

- zemětřesení
- požáry
- záplavy, tsunami
- vichřice, tornáda
- extrémní nízké nebo vysoké teploty
- pád letadla, teroristický útok a sabotáž

Studiem vnějších vlivů vyvolaných přírodním děním se zabývají zátěžové testy (neboli stress testy), které v současnosti probíhají na všech Evropských jaderných elektrárnách včetně JEDU a JETE. Jde o reakci na havárii z roku 2011 v Japonské Fukušimě ve snaze zmapovat teoretické možnosti a nedostatky zabezpečení. Zátěžové testy se snaží tedy zároveň zmapovat závažné technické problémy, jakými jsou například ztráta elektrického napájení nebo ztráta odvodu tepla.

Předmětem stress testů však nejsou rizika způsobená lidskou činností (podbod 6 předchozího seznamu), která jsou posuzována paralelně se stress testy. [2, 3, 4]

3.1.2 Maximální projektová havárie

Maximální projektová havárie vychází z důsledků maximální hypotetické havárie, která slouží jako základ pro návrh bezpečnostních systémů. U tlakovodních reaktorů VVER je jako maximální projektová havárie stanovena situace, při které dojde za nominálního výkonu k prasknutí hlavního cirkulačního potrubí I. O. s okamžitým oboustranným výtokem chladiva (LOCA – loss-of-coolant accident), navíc spojeným se zemětřesením a výpadkem vnějšího napájení.

Ač je pravděpodobnost maximální projektové havárie na JETE stanovena na 10^{-5} až 10^{-6} za rok, neboli stane se jednou za 100 000-1 000 000 let, musí být elektrárna schopna tuto situaci zvládnout. Ze všech teoretických havárií byla havárie LOCA zvolena jako maximální projektová, protože představuje největší nebezpečí, a to tím, že porušuje dvě ochranné bariéry ze čtyř (bariéry se zachovanou funkcí: struktura paliva a ochranná obálka) a únik radioaktivních látek je největší. [6, 18]

3.1.3 Analýza průběhu maximální LOCA

V 1. fázi procesu dochází k rychlému odtlakování I. O., téměř úplné ztrátě chladiva a obnažení AZ. Po dosažení bezpečnostních hodnot dojde k rychlému odstavení reaktoru. Zároveň je aktivována funkce havarijního vstřikování chladiva. Téměř ihned dojde k přerušení štěpné řetězové reakce (inherentní princip), to však nic nemění na neustálém nárůstu teploty paliva v důsledku nedostatečného chlazení.

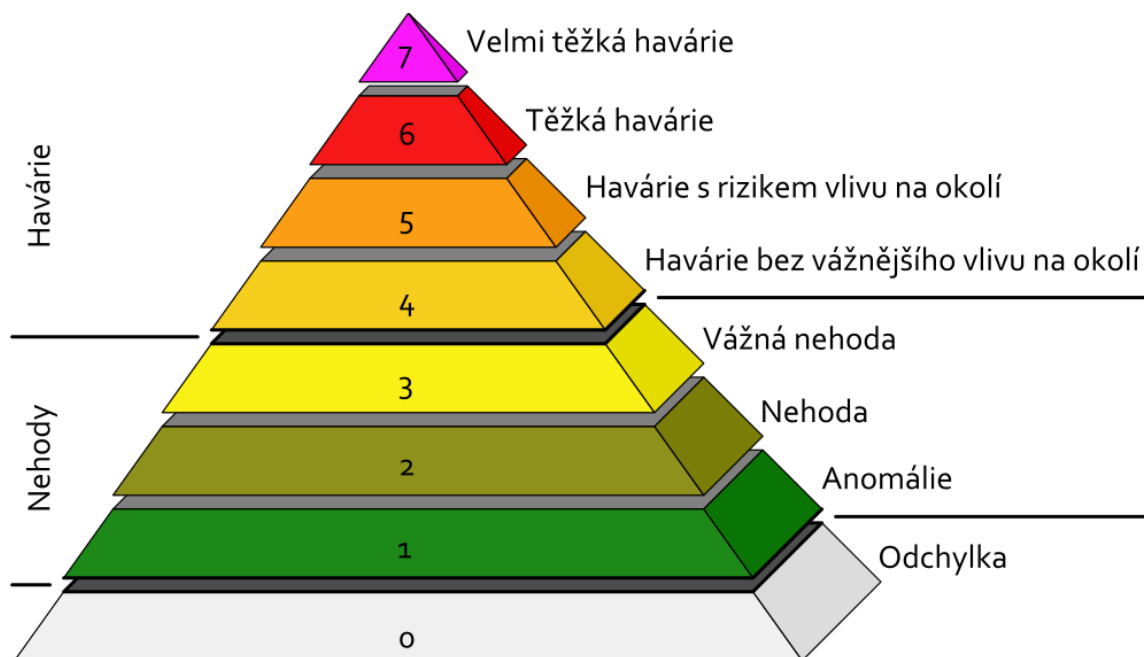
V průběhu 2. fáze je AZ chlazená z vysoko a nízkotlakého systému havarijního chlazení AZ a z hydroakumulátoru. Po ukončení výtoku vody z hydroakumulátoru a současném odpařování chladicí vody opět dojde ke snížení množství chladiva v reaktoru.

Ve 3. fázi havárie dojde k dalšímu obnažení AZ a následnému vzrůstu teploty paliva. Systémy vysokotlakého a nízkotlakého vstřikování však neustále vstřikují další vodu, dokud není AZ opět zaplavena a teplota paliva přestane konečně růst. Následně začne teplota AZ klesat na rovnovážnou stabilní úroveň. [6]

3.2 Stupnice INES

Stupnice INES je osmistupňová škála poruch a havárií zavedená pro hodnocení nestandardních situací na jaderných zařízeních. Byla zavedena v roce 1990 organizací IAEA. Hodnocení poruch a havárií probíhá podle 3 kritérií a události je přiřazen nejvyšší v nich dosažený stupeň, přičemž stupeň 0 je odchylka, která je bezproblémově zvládnuta při provozu limitačním a regulačním systémem, a stupeň 7 je velmi těžká havárie s dlouhodobými důsledky pro životní prostředí. Kritéria jsou následující:

1. Dopad na životní prostředí - Únik radioaktivních látek mimo elektrárnu
2. Dopad na zařízení a prostředí uvnitř elektrárny - Únik RA v rámci elektrárny
3. Dopad na bezpečnostní systémy - Stav bezpečnostních systémů elektrárny [4, 6]

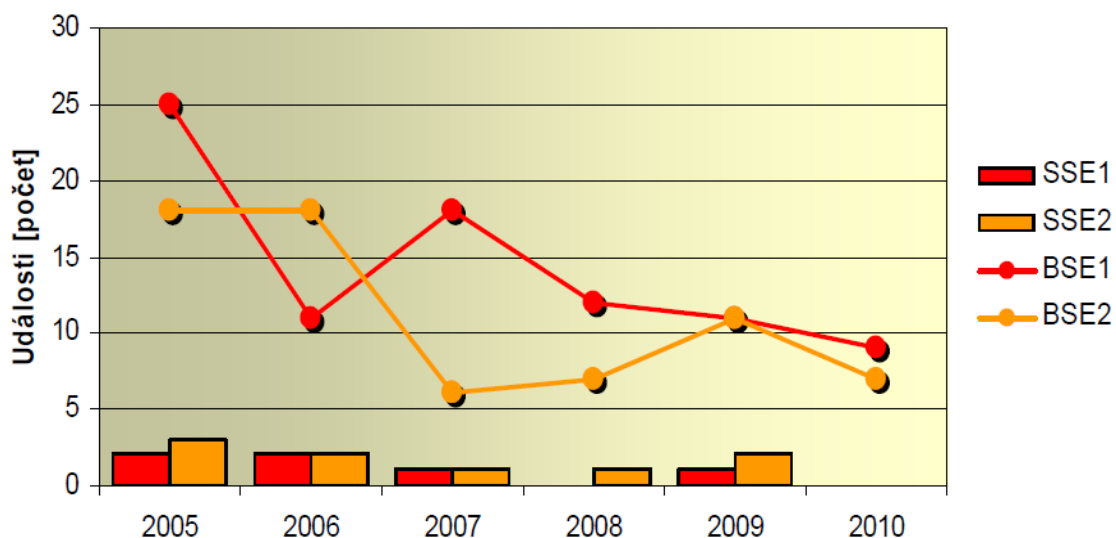


Obr. 3.1 – Mezinárodní stupnice jaderných událostí INES [13]

3.3 Zařazení událostí na JETE do INES

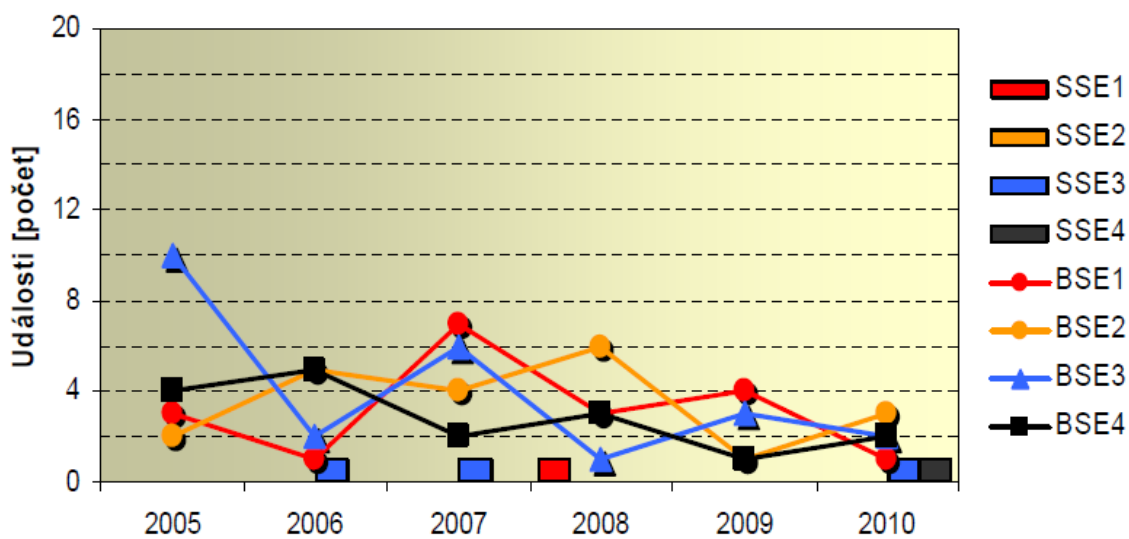
Výsledky každé jaderné elektrárny ve stupnici INES jsou pro veřejnost jedním z nejspíše pochopitelných zdrojů informací ohledně bezpečnosti elektrárny. V běžném provozu se dosahuje pouze odchylek, anomálií a zřídka nehod, tedy stupňů 0-2 a tato zařazení dalších nehod do stupnice bývají též častým motorem kritik odpůrců jaderné energetiky. V případě JETE se jedná o kritiku převážně ze strany různých zájmových skupin ze sousedícího Rakouska nebo regionů jižních Čech, kde jedním z argumentů bývá právě nadprůměrný počet událostí v porovnání s jinými elektrárnami, jelikož je na JETE průměrný počet událostí INES 0 15 za rok (průměr Francouzských elektráren dosahuje hodnoty 7) a událostí INES 1 se ročně vyskytne průměrně 1,7 v porovnání s francouzskou hodnotou 1,1. [9]

I přesto jsou hodnoty velice pozitivní díky nulovému výskytu stupňů 2 a vyšších a především klesající tendencí výskytu ostatních událostí, který v roce 2010 zaznamenal dokonce nulový výskyt INES 1. Šestiletý vývoj událostí je znázorněn na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 – Události INES 0 (SSE) a INES 1 (BSE) na blocích 1 a 2 JETE v letech 2005-2010 [9]

Pro informaci, JEDU, která patří mezi elektrárny s nejvyšším faktorem využití a nejmenším počtem hlášených událostí na světě, je k nahlédnutí na obrázku 3.3. [9]



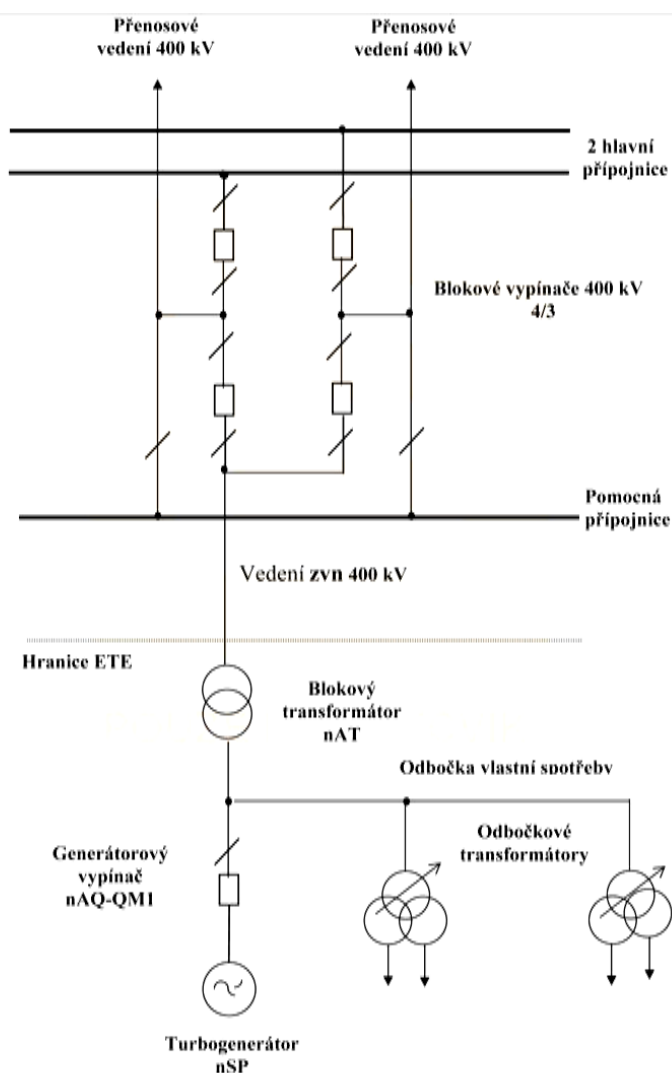
Obr. 3.3 – Události INES 0 (SSE) a INES 1 (BSE) na blocích 1-4 JEDU v letech 2005-2010 [9]

4 Elektrické schéma a vlastní spotřeba JE Temelín

Elektrické schéma elektrárny je souhrnem všech elektrických zařízení, mezi které patří přístroje, automatiky, ochrany, či ovládací obvody. Ve snaze každé elektrárny je, aby jejich uspořádání a zvolení bylo co nejehospodárnější a nejefektivnější ve spojení co možná největší bezpečností. Celé schéma je pak děleno do dvou základní částí a to:

- vyvedení výkonu do elektrizační soustavy
- napájení vlastní spotřeby

V případě JETE je elektrické schéma provedeno následujícím způsobem. Z obrázku 4.1 je snadno patrná hranice mezi vlastní elektrárnou Temelín a vnějším vedením s rozvodnou Kočín. Toto schéma je řešeno blokově, tudíž každý blok má vlastní vyvedení výkonu tak napájení vlastní spotřeby, a to z důvodu snížení možnosti přenosu poruch mezi bloky navzájem.



Obr. 4.1 – Vyvedení výkonu výrobního bloku na JETE [3]

Vedle vyvedení vyrobeného výkonu je neméně důležitou částí elektrického schématu i vlastní spotřeba jaderné elektrárny. Toto schéma je souhrnem všech zařízení důležitých pro výrobu elektrické energie včetně všech pomocných a bezpečnostních systémů. Celkové množství rezervy elektrické energie použité pro VS se pohybuje do 5% z celkového vyráběného výkonu, přičemž projekt původně počítal až s osmi procenty.

V principu je systém VS položen na rozdělení zařízení na spotřebiče, kterým je přiřazeno označení dle důležitosti napájení, a na zdroje napájení a rozvodné sítě elektrické energie k těmto spotřebičům. Vše je zajišťováno systémy regulace, automatiky a elektrických ochran. [3]

4.1 Elektrické zdroje napájení vlastní spotřeby

Jak již bylo zmíněno, napájení VS je pro každý z výrobních bloků řešeno samostatně. Základní částí každého z bloků jsou čtyři blokové rozvodny 6 kV **nBA**, **nBB**, **nBC** a **nBD**, kde *n* je 1 nebo 2 v případě popisu 1. resp. 2. výrobního bloku. (systém nezajištěného napájení) Tyto rozvodny dále napájí spotřebiče VS, proto k nim musí být zajištěna dodávka el. energie za všech okolností. Tomu je dosaženo třemi systémy napájení, a to Pracovními zdroji, Rezervními zdroji a Nouzovými zdroji, jejichž rozmístění a zastoupení je zřetelné z obrázku 4.2. Základní provozní režimy těchto systémů jsou následující:

- Pracovní zdroje
 - provoz pod zatížením
- Rezervní zdroje
 - chod naprázdno pod napětím
- Nouzové zdroje
 - všechny dieselgenerátory v režimu „horká rezerva“ [3, 9]

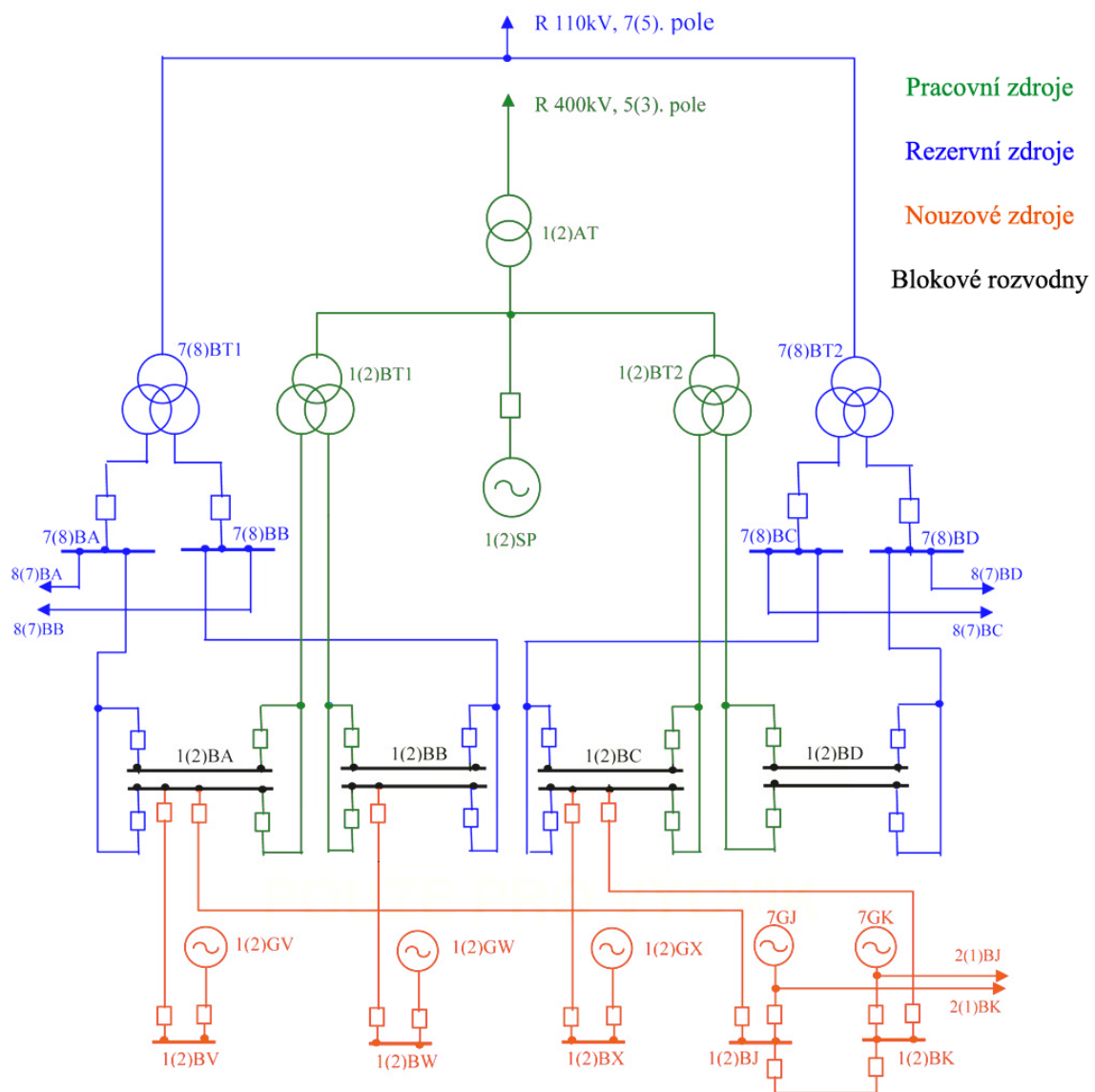
4.1.1 Pracovní zdroje napájení VS

První ze systémů napájení jsou Pracovní zdroje. Je to základní dráha napájení, která musí být schopna dodávat energii jak při normálním, tak abnormálním provozu. Čtyři blokové rozvodny **nBA** až **nBD** jsou v tomto případě napájeny přes odbočkové transformátory **nBT1** a **nBT2**, kde každé ze dvou sekundárních vinutí obou transformátorů napájí jednu rozvodnu. Napájení odbočkových transformátorů závisí na situaci následovně:

1. Turbogenerátorem **nSP** 1000MW
 - během provozu bloku
2. Z rozvodny Kočín sítí 400 kV přes blokový transformátor **nAT**
 - při plánovaném najíždění či odstavení bloku
 - při havarijním odstavení turbogenerátoru

Parametry užívaných transformátorů:

- nAT: 3 jednofázové transformátory 3 x 400 MVA; 420 kV/24 kV
- nBT1, nBT2: 63 MVA; 24 kV/2 x 6,3 kV [3, 9]



Obr. 4.2 – Rozdělení zdrojů napájení VS [3]

4.1.2 Rezervní zdroje napájení VS

V případě ztráty napájení z pracovních zdrojů, tzn. při výpadku dodávky z výrobního bloku nebo 400kV přívodu z rozvodny Kočín, jsou spotřebiče VS napájeny pomocí rezervních zdrojů. Z tohoto důvodu musí být tento systém zcela nezávislý na systému Provozních zdrojů.

Je tomu docíleno separovaným 110kV venkovním vedením z rozvodny Kočín až do prostoru JETE, ke každému výrobnímu bloku zvlášť. Tam je vedení rozděleno na dvě a přivedeno na transformátory rezervního napájení **mBT1 a mBT2**, m zastupuje označení 7 (v případě rezervních zařízení 1. bloku) a 8 (v případě rezervního zařízení 2. bloku). Z těchto transformátorů je napájení přivedeno na čtyři 6 kV rozvodny rezervního napájení **mBA1 až mBA4** (oba transformátory opět disponují dvojím sekundárním vinutím). Z těchto rozvodů vedou 4 vývody již na 4 blokové rozvodny, zároveň jsou zde však i podélné spojky spojující rozvodny rezervního napájení druhého bloku. Tyto spojky jsou za běžného provozu provozovány odděleně. [3, 12]

Parametry užívaných transformátorů:

- mBT1, mBT2: 63 MVA; 110 kV/2 x 6,3 kV

4.1.3 Nouzové zdroje napájení VS

Nouzové zdroje napájení jsou ty zdroje, které jsou uvedeny do funkce při nedostupnosti pracovních i rezervních zdrojů a které bývají určeny k nouzovému napájení spotřebičů určených k dochlazování reaktoru.

Prvním zdrojem této kategorie jsou systémy baterií VARTA, které jsou určeny pro nejdůležitější spotřebiče s malým příkonem. Napájí spotřebiče stejnosměrným napětím 220V.

Druhý zdroj jsou dieselgenerátory, které zásobují ostatní důležité spotřebiče střídavým proudem. Oba bloky jsou vybaveny třemi vlastními DG bezpečnostních systémů označenými **nGV**, **nGW** a **nGX** zajišťujícími napájení spotřebičů majících přímý vliv na JB. Navíc mají oba bloky 2 společné DG **GJ** a **GK** (zasazené do společné DG stanice umístěné mezi oběma bloky). Tyto dva DG napájí spotřebiče, které nemají sice přímý vliv na JB, ale mohou ovlivnit bezpečnost osob a důležitých zařízení.

Každý z celkem 8 DG má výkon 6,3MW. Provozují s v režimu „horká rezerva“. [3]

4.2 Rozdělení spotřebičů vlastní spotřeby

Spotřebiče VS lze rozdělit do tří základních kategorií a jejich dělení je dáno s ohledem na:

- důležitost zařízení při havarijním dochlazení bloku
- vliv na technologický proces
- nárok na spolehlivost elektrického napájení

Základními třemi kategoriemi jsou pak

- Spotřebiče I. kategorie
- Spotřebiče II. kategorie
- Spotřebiče III. kategorie

4.2.1 Spotřebiče I. kategorie

Jedná se o celkově nejnáročnější zařízení z pohledu jejich požadavků na spolehlivost napájení. Musí být totiž připojeny k napájení ze všech možných zdrojů napájení VS (pracovní, rezervní, nouzové – baterie i DG) ve všech provozních režimech bloku. Zároveň je přípustný čas přerušení napájení pouze v rámci zlomků vteřin.

Výkonové požadavky těchto zařízení jsou však menší, jedná se například o napájení systémů souvisejících s JB nebo nouzového osvětlení. [3]

4.2.2 Spotřebiče II. kategorie

Z hlediska náročnosti na spolehlivost je II. kategorie spotřebičů v porovnání s I. méně náročná, avšak její napájení musí být zajištěno z 3 tříd zdrojů napájení, a to pracovního, rezervního a nouzového systému pomocí DG stanic. Povolené přerušení dodávky elektrické energie u těchto spotřebičů je stanoveno na desítky sekund až minut, což je oproti I. kategorii značný rozdíl.

Do skupiny těchto spotřebičů patří systémy související s JB o větších výkonech (stovky kW), kterými jsou většinou různá čerpadla havarijního chlazení nebo vstřikování bóru. [3]

4.2.3 Spotřebiče III. kategorie

Spotřebiči III. kategorie jsou zařízení nemající přímý vliv na JB ani se nepodílí na havarijním dochlazení bloku. Napájení je zajištěno pouze z pracovních a rezervních

zdrojů, takže v situaci, kdy jsou oba tyto systémy napájení mimo provoz, spotřebiče III. kategorie nejsou napájeny.

Spotřebiči zahrnutými do této kategorie jsou např. pohony hlavního cirkulačního čerpadla, kondenzátní čerpadla, ventilační systémy,

Některé spotřebiče jsou však značeny jako spotřebiče III/I nebo III/II. To jsou ty spotřebiče, které byly částečně ze skupiny III vyčleněny, jelikož napájí zařízení, která mohou znatelně ovlivnit bezpečnost osob či drahých zařízení, a proto je žádoucí jejich napájení oproti spotřebičům III. kategorie posílit. [3]

4.2.4 Spotřebiče III/I. kategorie

Princip jejich napájení je shodný s kategorií I. Spotřebiče vyžadují nepřetržité napájení ze všech zdrojů napájení VS (i akumulátorové baterie), stejně tak jako obnovení dodávky ve zlomcích sekund. Samozřejmě však nemají přímý vliv na JB.

Patří sem důležité spotřebiče jako například řídicí jednotky II. O., „non-safety“ spotřebiče I. O. nebo řídicí počítač.

4.2.5 Spotřebiče III/II. kategorie

Ani tyto spotřebiče nemají přímý vliv na JB, ale jejich požadavky na plynulost dodávky elektrické energie je shodná s kategorií II. Zdroje napájení jsou též shodné, tudíž pracovní a rezervní zdroje a DG stanice.

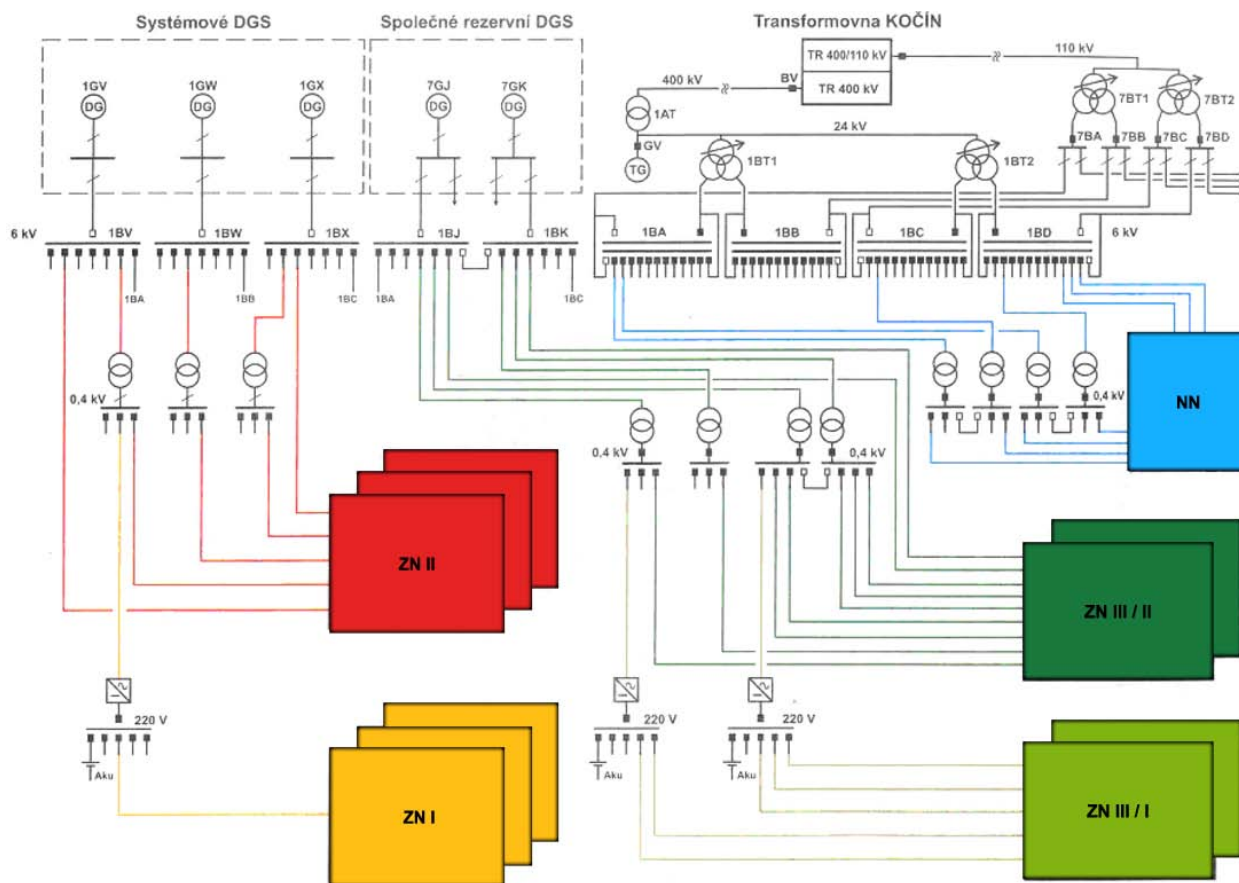
Mezi spotřebiče III/II. kategorie patří především pohony různých čerpadel (čerpadla požární vody, doplňování kondenzátního okruhu nebo mazadel a oleje turbosoustrojí) [3]

4.3 Systém napájení spotřebičů vlastní spotřeby

Z požadavků spotřebičů rozdělených do předchozích pěti skupin vyplývá i způsob řešení jejich napájení. Rozlišujeme tedy 3 základní skupiny:

- 1) ZN I a ZN II – Bezpečnostní systém zajištěného napájení I. a II. kategorie
- 2) ZN III/I a ZN III/II – Systém zajištěného napájení III/I. a III/II. kategorie
- 3) NN – Systém nezajištěného napájení III. kategorie

Znázornění všech systémů napájení je patrné z následujícího obrázku 4.3.



Obr. 4.3 – Systémy napájení spotřebičů VS [3]

4.3.1 Bezpečnostní systém ZN kategorie I a II

Bezpečnostní systémy na každém bloku jsou zformovány do tří divízí, které jsou napájeny bezpečnostními systémy zajištěného napájení. Každý systém ZN je složen ze dvou částí – síť ZN I. nebo II. kategorie, nominálního zdroje a nouzového zdroje.

Síť systému ZN I napájí nejdůležitější spotřebiče z hlediska jaderné bezpečnosti. Skládá se z několika rozveden napájejících spotřebiče stejnosměrným i střídavým napětím 230 a 400 V.

Nominálním zdrojem je systém ZN II, jeho napájení bude vysvětleno níže, a jako nouzový zdroj jsou použity akumulátorové baterie, které jsou uvedeny ve funkčnost v případě přechodu z pracovních na rezervní zdroje nebo v případě úplné ztráty napájení, tudíž po dobu startu DG.

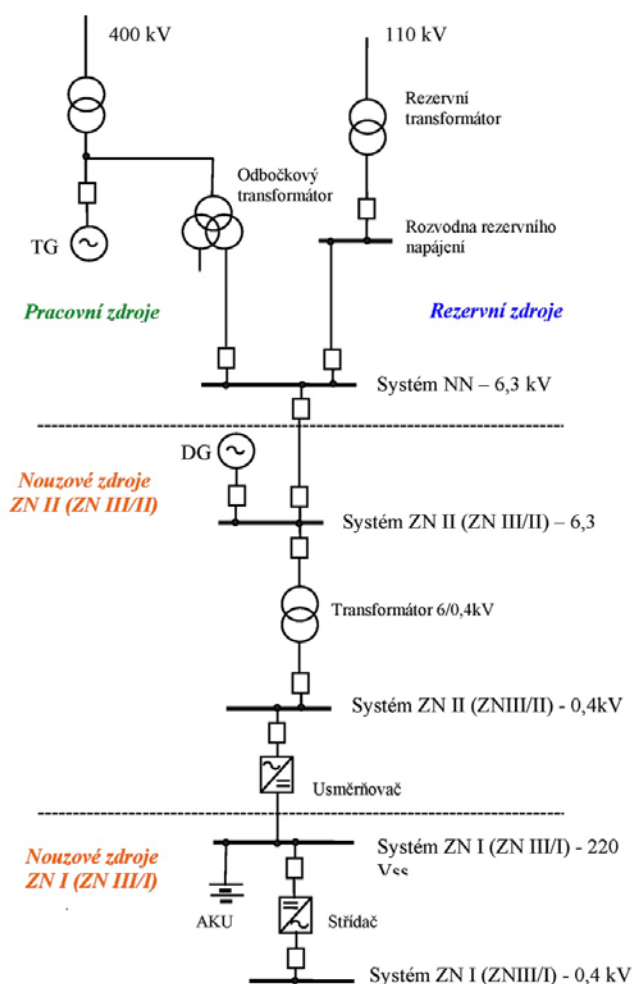
Síť systému ZN II slouží jednak k napájení spotřebičů II. kategorie ale zároveň i k napájení systému ZN I (s výjimkou doby náběhu DG v případě úplné ztráty napájení, kdy systém ZN I napájí akumulátory).

Jako nominální zdroj jsou využity rozvodny NN o napětí 6 kV napájené z pracovních a rezervních zdrojů. Nouzovým zdrojem jsou DG, tudíž při úplné ztrátě napájení je tento systém úplně bez napájení až do připojení DG. [3]

4.3.2 Systém ZN kategorie III/I. a III/II.

Systém ZN III/I a ZN III/II napájí spotřebiče kategorií III/I a III/II a jsou v podobném vztahu jako ZN I a ZN II. To znamená, že nominálním zdrojem III/I je systém III/II a nouzovým zdrojem až do připojení DG jsou akumulátorové baterie, zatímco systém III/II je po dobu připojování DG bez napájení.

Zřetelná provázanost podsystemů III. kategorie se systémy I. a II. kategorie lze sledovat na obrázku 4.4.



Obr. 4.4 – Provázanost zdrojů ZN III/I s ZN I a ZN III/II s ZN II [3]

4.3.3 Systém nezajištěného napájení III. kategorie

Systém nezajištěného napájení neboli NN, napájí spotřebiče kategorie III. V režimu napájení VS z pracovních a rezervních zdrojů pak všechny spotřebiče, tedy kategorie I, II, III, III/I i III/II. Pokud dojde k přerušení dodávky z pracovních a rezervních zdrojů, zůstává systém NN téměř bez dodávky energie. Více o režimech napájení si přiblížíme v odstavci 4.4.

Systém NN se skládá ze 4 základních blokových rozveden a dále 12 úsekových rozveden rozdělených podle spotřebičů, které jsou jimi napájeny.

- 1) Blokové rozvodny nBA, nBB, nBC, nBD (6 kV, 50 Hz) napájí:
 - spotřebiče III. kategorie o výkonech vyšších 170 kW
 - ostatní úsekové rozvodny a sekční spojky pro napájení všech systémů ZN
- 2) Úsekové rozvodny (10 rozveden 400 V + 2 rozvodny 230 V, 50 Hz)
 - spotřebiče III. kategorie o výkonech menších 200 kW na I. O. i II. O.
 - ohříváky kompenzátoru objemu
 - osvětlení bloku

V režimu pracovního a rezervního napájení je systém NN napájen klasicky k tomu určenými cestami dle obr. 4.3, popřípadě 4.4. V režimu nouzového napájení zůstává systém NN bez napájení. [3]

4.4 Režimy napájení vlastní spotřeby

Napájení vlastní spotřeby má čtyři základní režimy, které již byly částečně zmíněny dříve. Nyní následuje kompletní shrnutí všech možností a následků těchto režimů.

1) RE1 – Nominální provozní režim

Jedná se o požadovaný nejefektivnější režim, kdy spotřebiče VS jsou napájeny částí z vyváděného výkonu do elektrizační soustavy odbočkou přes odbočkové transformátory nBT1 a nBT2

2) RE2 – Najíždění a odstavování bloku

Jelikož v těchto fázích není možné odbočkové transformátory napájet z turbogenerátoru, je výkon přiveden přes blokový transformátor nAT sítě 400 kV z rozvodny Kočín. Napájení je tedy stále zajištěno pomocí provozních zdrojů.

3) RE3 – Napájení VS z rezervních zdrojů

K tomuto režimu může dojít při ztrátě provozních zdrojů napájení, jejichž důvodem mohou být za první vypnutí vypínače turbogenerátoru ve spojení s vypnutím vypínače vedení 400 kV v rozvodně Kočín nebo za druhé vypnutím vypínače vedení v rozvodně Kočín a nezregulování turbogenerátoru pouze pro napájení VS. V tomto případě se napájení začne realizovat rezervním systémem napájení z rozvodny Kočín vedením 110 kV.

4) RE4 + RE5 – napájení VS z nouzových zdrojů

Nejhorší poruchou vlastní spotřeby bloku je stav tzv. úplné ztráty napájení VS, který nastane, pokud nedojde po ztrátě provozního napájení k úspěšné aktivaci systému rezervního napájení VS. Síť NN zůstává až na výjimky bez napětí, systémy ZN II a ZN III/II se ocitnou do startu DG na několik sekund bez napětí a nemohou napájet systém ZN I a ZN III/I, které musí po tuto dobu napájet akumulátorové baterie.

Během provozu RE4 jsou napájeny spotřebiče pouze výjimečně, a to ty, které jsou napájeny z úsekových rozvodů propojených s napájením druhého výrobního bloku, který nemusí být poruchou napájení prvního bloku ovlivněn.

Režim zajištěný bateriemi je označován RE4, provoz pod DG RE5. [3, 9]

4.5 Přejít na vlastní spotřebu z běžného provozu

V této podkapitole bude hlavním cílem rozbor základních situací, které by mohly teoreticky při provozu JETE nastat. V první části budou popsány řešení základních typových situací z podkapitoly 3.1.1, v druhé části pak ostatní možné přechody na vlastní spotřebu.

4.5.1 Základní typové situace 1, 2 a 3

Dle podkapitoly 3.1.1 se jedná o „Růst výkonu reaktoru“, „Havárie se ztrátou chladiva“ a „Havárie v systému odvodu tepla“. V případě těchto tří situací dochází jako následek poruch k odstavení turbogenerátoru. Vlastní spotřeba tím pádem nemá možnost být napájena elektrickou energií vyrobenou v samotném výrobním bloku. To má za následek změnu režimu napájení vlastní spotřeby z RE1 na RE2.

Z toho vyplývá, že zdrojem napájení VS jsou stále provozní zdroje, avšak odbočkové transformátory jsou místo turbogenerátoru napájeny 400kV vedením z rozvodny Kočín.

Rezervní i nouzové zdroje jsou tedy nevyužity a jejich režimy se nemění, to znamená že 100kV vedení z Kočina zůstává v chodu naprázdno pod napětím a dieselgenerátory v režimu horká rezerva.

4.5.2 Základní typová situace 4 – ostatní havárie

Do této kategorie patří méně nebezpečné události spojené s manipulací s palivem a radioaktivním odpadem. Jelikož tyto havárie nijak neovlivňují chod výrobního bloku, zůstává po této události napájení VS beze změny.

Pokud tedy probíhá odstávka bloku, a vyskytne se problém při výměně paliva, režim RE2 se nemění. Zároveň platí, že ke změně režimu napájení nedochází, ani pokud je výrobní blok v normálním výrobním režimu a vlastní spotřeba se v době jakékoli události spojené s manipulací radioaktivního odpadu nachází v režimu napájení RE1.

4.5.3 Základní typová situace 5 – vnější vlivy

Tato kategorie situací zahrnuje havárie, které by se mohly přihodit v následku přírodních katastrof nebo lidského zavinění (viz. podkapitola 3.1.1). Teoreticky představují pro napájení VS největší riziko a i díky havárii v JE Fukušima jsou tyto havárie v poslední době pod drobnohledem organizací pro jadernou bezpečnost.

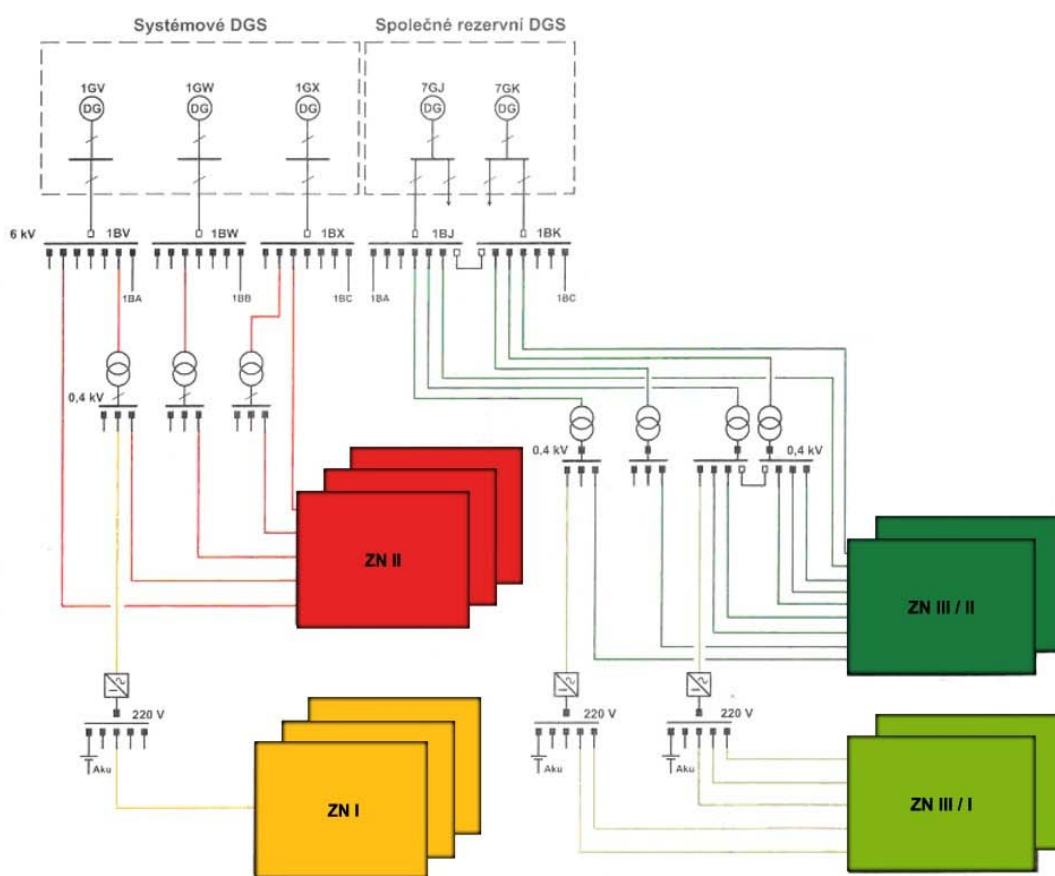
Přírodní katastrofy by mohly teoreticky zavinit následující poruchy:

1) Porucha 400 kV i 110 kV vedení spojujících JETE s rozvodnou Kočín při normálním běhu výrobního bloku

Následkem toho by nebylo možné vyvádět celý výkon bloku 1000 MW do distribuční sítě a došlo k automatickému přechodu na ostrovní provoz. Výkon by byl snížen pouze na napájení vlastní spotřeby, a pokud by nebylo možné obnovit porouchané vedení, byl by výrobní blok bezpečně odstaven za pomoci napájení z dieselgenerátorů. Znamená to, že by elektrárna přešla z režimu RE1 na režim RE1 s omezeným výkonem, kde napájeny budou stále všechny spotřebiče a následně na RE5, kde napájeny budou pouze spotřebiče kategorií I, II, III/I a III/II. Všechny spotřebiče z kategorie III zůstávají bez napájení. [3, 12]

2) Porucha elektrického vedení dle 1) včetně odbočky vyvedení výkonu z výrobního bloku

Pokud dojde k poruše při vyvedení výkonu z turbogenerátoru a zároveň jsou porušena jak pracovní, tak rezervní napájecí vedení z rozvodny Kočín, není možné napájet vlastní spotřebu ani z jedné z hlavních dvou složek napájení VS. V tom případě musí být aktivováno napájení pomocí nouzových zdrojů – akumulátorových baterií a dieselgenerátorů. Systém napájení VS je zjednodušen dle obrázku 4.5.



Obr. 4.5 – Napájení VS bez pracovních a rezervních zdrojů napájení [3]

V případě takové poruchy dojde k okamžitému startu dieselgenerátorů, které jsou do té doby v režimu horká rezerva, a jejich start probíhá po dobu několika málo sekund. To je však nemyslitelné pro spotřebiče kategorií I a III/I, proto jsou v těchto několika sekundách napájeny akumulátorovými bateriemi – režim RE4. Po startu DG přestávají baterie spotřebiče napájet a všechny spotřebiče na obrázku 4.5 výše jsou napájeny z DG – režim RE5. [3, 12]

4.5.4 Sjíždění a najíždění bloku

Na začátku odstavování výrobního bloku je napájení vlastní spotřeby zajišťováno z turbogenerátoru (režim RE1). Výkon se postupně snižuje z 1000 MW až ke 200 MW, a poté dojde k vypnutí generátorového vypínače. Vlastní spotřeba je napájena stále z RE1 přes vedení linky 400 kV. Na režim RE2 se přechází, pouze pokud probíhá údržba zařízení pracovních zdrojů.

Při najíždění bloku je možností napájení spotřeby více.

- 400 kV linka je odsvorkovaná na generátorovém vypínači a napájení VS je zajištěno přes tuto linku (RE1). Turbína se roztočí na 3000 otáček/minutu a po nastavení napěťových a frekvenčních poměrů se přifázuje (RE1).
- 400 kV linka je odsvorkovaná na vypínači v Kočíně a napájení VS je realizováno přes rezervní linku 110 kV (RE2). Po sladění napěťových a frekvenčních poměrů se zapne vypínač v Kočíně, což má za následek postupné přepínání rozvoden z rezervního na pracovní napájení (RE1). [3, 4]

5 Ekonomické aspekty přechodu na vlastní spotřebu

V této kapitole budou stručně popsány základní ekonomické statistiky z oblasti energetiky. Porovnány budou jak různé typy elektráren z hlediska jejich roční produkce elektrické energie, tak i náklady spojené s produkcí elektrické energie. V druhé části bude jednoduše rozebrána situace, která z ekonomického hlediska nastává při přechodu jaderné elektrárny na vlastní spotřebu.

5.1 Instalovaný výkon a bilance vyrobené elektřiny

V České republice, stejně tak jako ve světě, převažují svým instalovaným výkonem klasické parní elektrárny, jejichž instalovaný výkon dosahoval k 31. 12. 2011 v ČR 10787 MW, což je přibližně 53% z celkového instalovaného výkonu ČR, který činí 20250 MW. Na druhém místě se nachází jaderné elektrárny JEDU a JETE s instalovaným výkonem 3970 MW, které tvoří necelých 20% z celkového instalovaného výkonu českých elektrických zdrojů. Největší změnou v instalovaném výkonu za poslední dva roky jsou pochopitelně díky „solárnímu boomu“ fotovoltaické elektrárny, které se posunuly ze 465 MW (31. 12. 2009) na 1971 MW (31. 12. 2011), tedy na více jak čtyřnásobný instalovaný výkon. [13]

Oproti instalovanému výkonu vyrobený výkon ukazuje skutečné množství vyrobené elektrické energie. Z něho lze velice dobře vyčíst skutečné nasazování konkrétních typů elektráren během celého roku. Z tohoto pohledu je skutečně vidět veliký nárůst u jaderných elektráren, oproti tomu u elektráren fotovoltaických, větrných a samozřejmě přečerpávacích vodních je nejznatelnější pokles zastoupení v grafu výroby oproti zastoupení v grafu instalovaném výkonu. Detailnější popis instalovaného a vyrobeného výkonu je obsažen v tabulkách 5.1 a 5.2.

Pro následující tabulky a grafy byly pro lepší orientaci použity tyto zkratky:

Parní elektrárny – **PE**, paroplynové elektrárny – **PPE**, plynové a spalovací elektrárny – **PSE**, vodní elektrárny – **VE**, přečerpávací vodní elektrárny – **PVE**, jaderné elektrárny – **JE**, větrné elektrárny – **VTE** a fotovoltaické elektrárny – **FVE**.

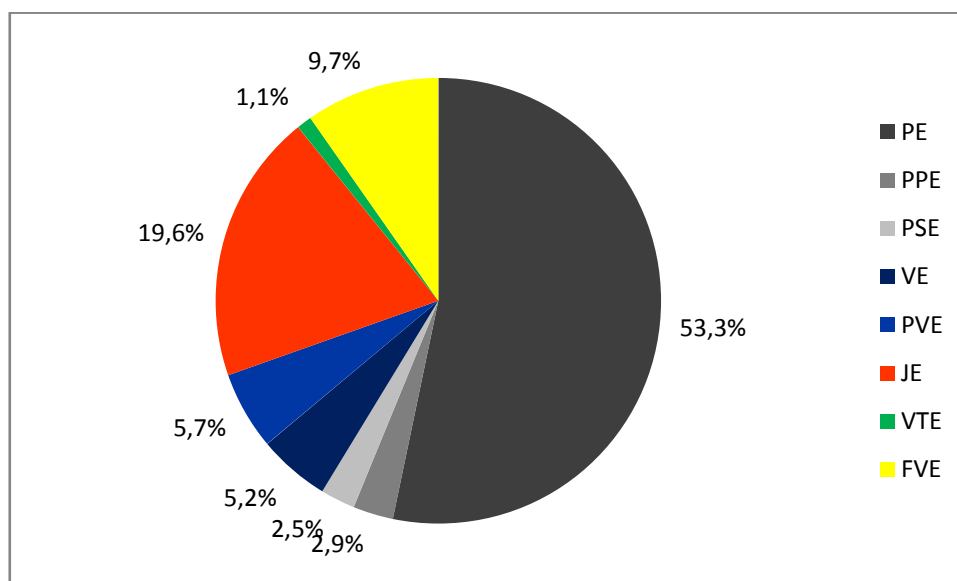
	PE	PPE	PSE	VE	PVE	JE	VTE	FVE	celkem
Instalovaný Výkon [MW]	10787,49	590,72	510,82	1054,56	1146,5	3970	218,9	1970,97	20249,96
Podíl [%]	53,27%	2,92%	2,52%	5,21%	5,66%	19,60%	1,08%	9,73%	100,00%

Tab. 5.1 – Instalovaný výkon základních typů elektráren v ČR [13]

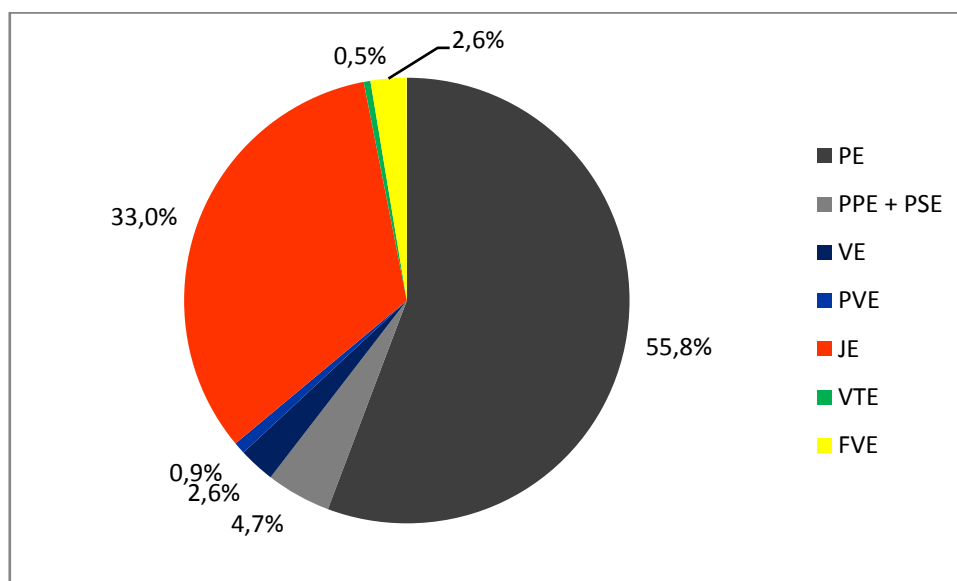
	PE	PPE + PSE	VE	PVE	JE	VTE	FVE	celkem
Vyrobený výkon [MW]	45183,7	3814,2	2123,8	697,2	26708	396,8	2118	81041,7
Podíl [%]	55,75%	4,71%	2,62%	0,86%	32,96%	0,49%	2,61%	100,00%

Tab. 5.2 – Vyrobený výkon v ČR za rok 2011 [13]

Z následujících dvou grafů na obrázcích 5.1 a 5.2 lze přehledně porovnat rozdíl mezi instalovaným a vyrobeným výkonem za rok 2011. Nejpatrnější je rozdíl u jaderných elektráren označených oranžovou barvou a fotovoltaických a větrných elektráren, které jsou v barvou žlutou, popřípadě zelenou.



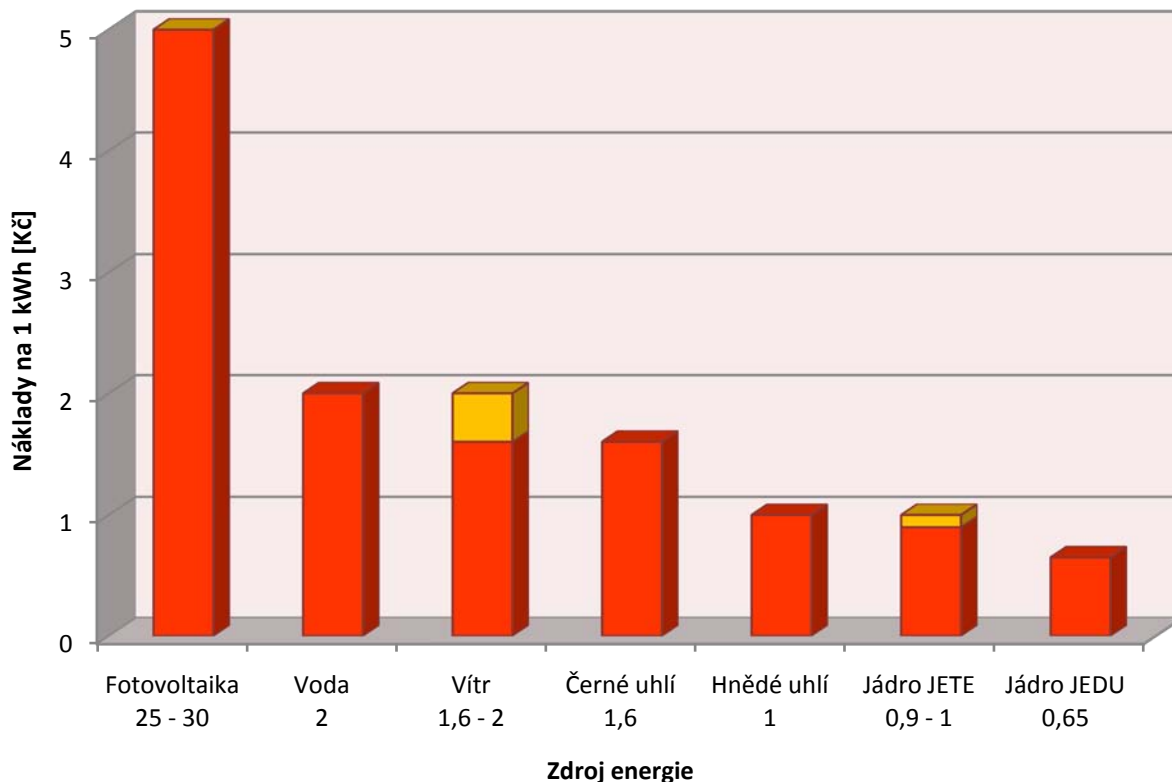
Obr. 5.1 – Instalovaný výkon v ČR k 31. 12. 2011 [13]



Obr. 5.2 – Vyrobený výkon za rok 2011 [13]

5.2 Náklady na výrobu elektrické energie

V porovnání s ostatními zdroji elektrické energie se jaderné elektrárny jeví jako nejlevnější. V následujícím obrázku 5.3 lze patrně vidět rozdíly mezi jednotlivými zdroji, pouze sloupec nákladů na výrobu 1 kWh ve fotovoltaických elektrárnách je z důvodu přehlednosti grafu oříznutý již v hodnotě 5 namísto hodnot 25 – 30. V nákladech jsou zahrnuty všechny dílčí náklady včetně nákladů na výstavbu, provoz i likvidaci zařízení.



Obr. 5.3 – Náklady na výrobu 1 kWh elektrické energie v Kč [3, 14]

JETE si tedy v porovnání s průměrem nákladů na výrobu 1 kWh všech ostatních elektráren v ČR stojí velmi dobře. Oproti výsledkům JEDU však stále ještě ztrácí, což je dáno především nižším faktorem využití a kratší dobou v provozu. Nižší faktor využití je spojený s delšími a neplánovanými odstávkami. A jelikož byla JETE uvedena do provozu před téměř 10 lety a JEDU již o necelých 25 let dříve, činí odpisy dané pořizovací cenou na výstavbu JETE významnější položku, která tedy náklady na výrobu 1 kWh zvyšují. [3, 13, 14]

5.2.1 Cena jaderného paliva

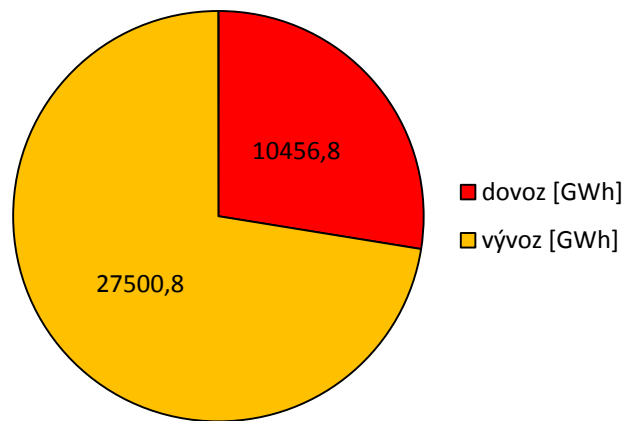
Velkou výhodou jaderných elektráren ale bezesporu zůstává jejich relativně malá závislost na dodavatelích paliva (v porovnání s distribucí plynu) a nízký vliv ceny paliva na koncovou cenu v porovnání s elektrárnami, jejichž palivem je uhlí, plyn nebo topný olej. Množství obohaceného uranu potřebného k výrobě stejného množství energie je pak o několik řádů nižší oproti ostatním surovinám. Na stejné množství energie, která by byla v JE vyrobena z 35 tun obohaceného uranu, by byla potřeba množství 2 000 000 tun černého, 5 000 000 tun hnědého uhlí nebo 1 500 000 tun topného oleje.

Díky tomu, že náklady za jaderné palivo tvoří v celkové ceně nákladů cca 10 – 20%, se náklady JE za palivo stávají v porovnání s náklady za uhlí, plyn či topný olej relativně zanedbatelnou částí ceny energie. U uhelných elektráren tvoří cena paliva 60% ceny, u elektrárny na zemní plyn je to až 80%. Díky tomu se jeví jaderná elektrárna prakticky imunní vůči zdražení paliva, pokud by vůbec samotné zdražení nastalo. Při zdražení paliva o 300% se v případě jaderné elektrárny zvedají náklady z 1 Kč/kWh na zhruba 1,50 Kč/kWh, avšak pokud ke stejnému zdražení dojde u černouhelné elektrárny, výsledná cena za kWh se zvedá z 1,60 na 4,50 Kč, což by byl obrovský problém. [4, 13, 15]

5.3 Ekonomický vliv odstávky

Základním ekonomickým vzorcem odstávky JETE je 1 hodina odstávky = 1 milion Kč. Vyplývalo to z faktu, že každou hodinu, ve které je 1 výrobní blok JETE v odstávce, by bylo vyrobeno 1000 MWh energie a velkoobchodní cena jedné MWh byla 1000 Kč. Ta se však za poslední roky poměrně zvyšuje, v roce 2011 dosahovala i 1600 Kč/MWh. Za jeden den odstávky tedy elektrárna přijde o více než 30 milionů korun.

Ještě horší je ekonomická bilance, pokud se jedná o neplánovanou odstávku a síť na ni není připravená. Pak náklady rostou ještě více, jelikož dochází k tomu, že bývá naplánovaná odstávka jiných elektráren a elektrická energie musí být vyráběna z dražších zdrojů nebo nakupována ze zahraničí. K tomu samozřejmě dochází, i přestože je ČR pokládána za vývozce elektrické energie, názorně to lze vidět z obrázku 5.4. [4, 13]



Obr. 5.4 – Poměr vývozu a dovozu elektřiny v ČR [13]

Ve snaze celé elektrizační soustavy tedy je, aby byla doba odstávek co nejkratší a aby se odstávky prováděly co nejvíce na základě jejich plánu. Plánovaná délka odstávek pro rok 2012 je celkem 101 dní pro oba výrobní bloky. Pokud by se podařilo zkrátit délku odstávky na úroveň JEDU, kde všechny 4 bloky stojí dohromady 180 dní, 1 tedy průměrně pouze 45 dní, zisk by se JETE zvýšil ročně o 3 – 5 miliardy Kč. [9]

6 Optimalizace vlastní spotřeby jaderné elektrárny

V devadesátých letech minulého století se v České republice oproti předchozí době změnil mimo jiné i přístup k provozování elektráren, a to včetně jaderných. Vedle co největší bezpečnosti, které lze při uvážení všech hledisek rozumně dosáhnout, se stále větší význam přikládá optimálnímu ekonomickému využití. Hlavními cíly optimalizace provozu jaderných zařízení, z kterých vyplívají současné výzkumně-vývojové práce, jsou:

- dosažení maximální účinnosti provozu,
- maximalizaci doby provozu mezi nezbytnými odstávkami,
- minimalizaci vlivu způsobu provozu energetického zařízení na životnost jeho jednotlivých komponent,
- zvýšení kvality regulace (odstranění driftů, zmenšení překmitů regulovaných veličin atd.).

Tyto hlavní cíle jsou částečně zpracovávány a řešeny pomocí informačních a řídicích systémů (IŘS) zaváděných již v průběhu devadesátých let. Především zvýšení kvality regulace bylo podmíněno vývojem přímo v oblasti těchto IŘS. Jejich hlavními funkcemi je detailní sběr dat, analýza pomocí stále složitějších a propracovanějších algoritmů a následné rozhodování. [16]

V oblasti sekundární části jaderných elektráren je optimalizace zaměřena na zvýšení výkonnosti dílčích celků. Hlavními prvky, na které je upřena pozornost, jsou:

- turbogenerátor s regenerací,
- kondenzátor a chladicího okruh kondenzátoru.

6.1 Ekonomická stránka optimalizace

Jelikož vlastní spotřeba spotřebuje, jak již bylo zmíněno, přibližně 5% produkovaného výkonu, což činí zhruba 50 MW, bylo by její snížení velice pozitivní nejen z hlediska ekonomického, ale i ekologického. Z pohledu ekonoma je každý vyrobený MW prodán za průměrně 1500 Kč.

Pokud by byl nalezen způsob, jak snížit vlastní spotřebu o deset procent z 5 na 4 %, vyrobily by oba bloky JETE namísto 13 913 GWh (produkce roku 2011) až 14 059 GWh.

Rozdíl těchto dvou hodnot je 146 GW, což představuje úsporu nákladů bezmála 220 000 000 Kč ročně. Z tohoto vyplývá, že by se potenciální investice do optimalizace vlastní spotřeby velice rychle vrátily, pokud by se jednalo byt' o pouhé snížení vlastní spotřeby o 1 procento. Tak značné snížení vlastní spotřeby se však v dohledné době v praxi nepředpokládá, jako reálná úspora se jeví spíše desetiný procenta. Největší pozornost se klade na hydraulické systémy zahrnující hlavní čerpadla a pumpy jak na I., tak II. O. a pneumatické systémy, kterými jsou ostatní ventilátory a kompresory, a to z důvodu jejich vysokého příkonu. [9, 16]

6.2 Optimalizace vlastní spotřeby

Možností optimalizace vlastní spotřeby se zabývá pouze několik společností, jelikož to vyžaduje detailní znalosti z oboru jaderné energetiky. Výsledky studií přinášejí hlavní body, které by mohly úsporu přinášet. Jsou to:

1) Systémy pro optimalizaci elektrických pohonů spotřebičů

Jelikož bývají hydraulické i pneumatické systémy velmi složitě regulovatelné, snižuje se při potřebě regulace významně jejich účinnost. To limituje celou elektrárnu, a pokud by se podařilo pohony těchto spotřebičů dynamičtěji regulovat za pomoci expertních informačních a řídicích systémů, přineslo by to značné zefektivnění a úsporu. Tyto systémy jsou však stále ve fázi vývoje. Je ale pravdou, že optimalizace řídicích systémů v jiných oblastech již byla na JETE aplikována a vedla k zefektivnění provozu.

2) Investice do nových pohonů spotřebičů

Vedle investic do systému řízení těchto pohonů existují i studie investic do samotných pohonů hydraulických a pneumatických systémů. Probíhá výzkum a vývoj nových speciálních pohonů a aktuátorů.

3) Investice do nových spotřebičů

Dalším uvažovaným bodem ve spojitosti s možným snížením spotřeby vlastní spotřeby je investice do nových spotřebičů, které by mohly pracovat s vyšší účinností i většími výkony. Klíčová však neustále zůstává spolehlivost a bezpečnost těchto zařízení, která se nesmí na úkor větší účinnosti snižovat. Hlavní nevýhodou pořízení nových

spotřebičů jsou však mnohem vyšší pořizovací ceny oproti implementaci řídicích systémů a zároveň zkušební doby těchto zařízení, které často prodlužují odstávku.

4) Aplikace získaných znalostí i v jiných oblastech

Pokud se podaří provést snížení vlastní spotřeby na JETE bude pravděpodobně možné alespoň některé z praktických poznatků sdílet s JEDU i ostatními tepelnými elektrárnami nebo dalšími sférami průmyslu. Zároveň by mohla lepší schopnost regulace těchto spotřebičů vézt k efektivnější regulaci výkonu jaderné elektrárny, což by v budoucnu mohlo napomoci elektrizační soustavě tvořené obnovitelnými zdroji. [3, 4, 16]

6.3 Průběh metody pro optimalizaci zařízení

Pro optimalizaci provozu elektráren existují speciální metody související s nástroji a postupy pro zajištění realizace příslušných řešení. Tyto metody se dělí na tři základní dílčí části:

1) Analytická část

Tato část slouží k identifikaci stavu zařízení a jedná se o soubor softwarových modulů sloužících k operativní analýze ze záznamů provozních údajů zařízení. Tyto analýzy následně vedou k sestavení matematických modelů, s jejichž pomocí je vytvářena syntéza a jsou hledány cesty k optimalizaci.

2) Syntetická část

Na základě znalostí nashromážděných analýzou je postavena syntetická část. Ta slouží k navrhování různých optimalizačních opatření, které vedou k požadovanému zlepšení ukazatelů výkonnosti.

3) Implementační část

Třetí částí metod je implementace předchozích dvou částí. Je založena na programových nástrojích a slouží k zavádění nejlepších optimalizačních opatření navržených při syntéze. Zároveň je úkolem i integrace těchto výsledných opatření do IŘS.

6.3.1 Matematické modely optimalizačních metod

Jelikož programy dovedou pracovat pouze s daty v přesně definované formě ve tvaru algoritmů, musí být všechny informace, jakými jsou například výrobní procesy nebo vstupní a výstupní veličiny těchto procesů, převedeny do matematických modelů. Tyto

matematické modely jsou základním nástrojem optimalizačních metod a jsou založeny na třech pilířích.

Prvním pilířem je deterministický popis technických procesů, které se ve výrobním zařízení objevují, druhým jsou experimentálně zjištěné závislosti mezi sledovanými veličinami a posledním pilířem, na kterém jsou matematické modely postaveny, jsou modely založené na použití neuronových sítí.

Příkladem matematických modelů u jaderné elektrárny jsou např.:

- komplexní model turbíny s regenerací a kondenzací páry jako celek
 - vstupy: množství a parametry páry, nastavení regeneračních ohříváků, parametry chladicí vody
 - výstupy: výkon, účinnost
- jednotlivé modely dílčích částí turbíny, kondenzátoru, chladících věží

6.3.2 Realizace optimalizačního řešení

Celkový proces optimalizace zařízení trvá v závislosti na objemu změn v rámci měsíců až let. Soubor finálních služeb a dodávka optimalizačního řešení se obvykle skládá z:

- předběžného vyhodnocení stavu provozu na základě projektové dokumentace a měřených údajů,
- návrhů na optimalizaci a zvolení konkrétního řešení,
- samotného průběhu tvorby a ladění optimalizační metody,
- dodávky řešení a jeho integrace do informační infrastruktury provozovatele,
- školení,
- finálního naladění.

Realizovaná optimalizační řešení vytváří potenciál pro zlepšení efektivity a hospodárnosti provozu výrobních energetických zařízení. Tato zlepšení mají tedy přínos nejen pro samotného provozovatele ale i pro životní prostředí. Investice za optimalizaci systému kontroly a řízení jsou však v porovnání s náklady v případě nákupu nových zařízení mnohem menší.

Závěr

Prvním bodem této práce měla být základní koncepce bezpečného provozu. Nejprve bylo promluveno o původu jaderných elektráren nacházejících se na území České republiky, byly zmíněny jejich typy včetně vlastností a všech realizovaných reaktorů společnosti OKB Gidropress, která se o výstavbu elektráren v Dukovanech i Temelíně podílela.

V následující kapitole se přistoupilo k základní koncepci bezpečného provozu jaderné elektrárny. Byly rozpracovány základní pojmy související s jadernou bezpečností a režimy provozu jaderné elektrárny. Vysvětlily se rozdíly mezi normálním, abnormálním a havarijním stavem včetně popisu praktických situací, při kterých jsou tyto stavy ohlášeny. Také byly popsány vlastnosti projektu jaderných zařízení, jako jsou redundance, diverzita a hlavně ochrana do hloubky. Posledním bodem v této kapitole bylo seznámení s kritickými bezpečnostními stromy, které jsou důležitou indikací pro bezpečný provoz jaderného bloku a systematickým prostředkem pro vyhodnocování bezpečnosti a případné určování postupů k jejímu obnovení. Tímto byl splněn bod ohledně koncepce bezpečného provozu.

Třetí kapitolou byla analýza abnormálních a havarijních stavů Temelínského bloku VVER-1000. Bylo rozebráno 5 základních typových situací, které mohou dostat výrobní blok do abnormálního popřípadě havarijního stavu. Byla zároveň zpracována maximální projektová havárie LOCA včetně analýzy jejího průběhu a postupu jejího zvládnutí. Následně byl proveden rozbor stupnice INES a zhodnocení událostí na elektrárně Temelín z hlediska této stupnice ve srovnání jednak s průměrem Francouzských jaderných elektráren a také s elektrárnou Dukovany. Z těchto srovnání vyplývá, že jaderná elektrárna Temelín se sice zejména v posledních letech opravdu přiblížila jak francouzskému průměru, tak výsledkům elektrárny Dukovany, avšak do roku 2008 byl počet hlášených událostí INES 1 a INES 2 nadprůměrně častý. Pozitivním zjištěním však je, že nejvyšší stupeň události, který se na elektrárně za celou dobu jejího provozu objevil je právě INES 2. Touto kapitolou byla splněna první část druhého bodu zadání, nejen jeho druhou částí se zabývá kapitola 4.

Úkolem čtvrté kapitoly byla analýza vlastní spotřeby. Nejprve byl podán detailní rozbor elektrických zdrojů napájení vlastní spotřeby. Byly analyzovány zdroje napájení pracovní, rezervní i nouzové, přehledně byly rozlišeny na elektrickém schématu v obrázku 4.2 a byly popsány zařízení realizující dodávku pomocí jednotlivých

napájecích cest. Dále bylo přistoupeno ke konkrétním spotřebičům vlastní spotřeby, ty byly rozděleny do jednotlivých kategorií dle jejich důležitosti na havarijní dochlazování bloku a následně jim byly přiřazeny konkrétní systémy napájení. Další velmi důležitou součástí této kapitoly bylo popsání režimů napájení těchto spotřebičů, jejich rozdělení na celkem 5 různých režimů a přiřazení ke konkrétním napájecím cestám. Tak by doplněn druhý bod zadání.

Tato kapitola dále pokračovala studií přechodu na vlastní spotřebu v konkrétních situacích, což je téma odpovídající třetímu bodu zadání. Nejprve byly analyzovány základní typové situace (viz kapitola 3.1.1) od havárie se ztrátou chladiva až po povodně z hlediska přechodu na vlastní spotřebu ve smyslu zdrojů, spotřebičů i režimů napájení. Poté bylo z tohoto pohledu zpracováno odstavování a opětné najíždění bloku, které je mnohem častější než předchozí typové situace.

Pátá kapitola byla ekonomickým zhodnocením jaderné elektrárny Temelín a doplnila tím třetí bod zadání. Obsahovala rozbor instalovaného výkonu a bilanci výroby elektrické energie, ze které byly potvrzeny předpoklady. Naprosto rozdílnou roli v elektrizační soustavě mají elektrárny fotovoltaické s větrnými a pak jaderné. První dva zmíněné typy i přesto, že jejich instalovaný výkon činí 10,8% z celkových 20249,96 MW, mají roční podíl v produkci pouhé 3,1%. Naproti tomu elektrárny jaderné mají podíl v roční výrobě 33%, i když jejich instalovaný výkon je jen 19,6%. Následoval rozbor ceny jaderného paliva, především z pohledu ovlivnění ceny elektřiny, kdy bylo zjištěno, že oproti dalším tepelným elektrárnám jsou jaderné relativně nezávislé na zdražení uranu.

Posledním bodem zadání této diplomové práce byl návrh možností optimalizace vlastní spotřeby elektrárny Temelín. Hlavní možnosti teoretické optimalizace vlastní spotřeby byly zjištěny a zpracovány v poslední kapitole 6, kde se jako nejpříjemnější jeví expertní řídicí systémy především pro elektrické pohony spotřebičů popřípadě investice do nových efektivnějších spotřebičů, které však nesmí mít lepší výkon na úkor nižší bezpečnosti.

Jaderná energetika musí být po nehodě ve Fukušimě neustále sledována. Nyní je tato pozornost upřena především k vlastní spotřebě, o čemž svědčí i množství stress-testů probíhajících na elektrárnách po celém světě. Vlastní spotřeba je tedy důležitá jak z technologického a ekonomického, tak především bezpečnostního hlediska.

Seznam tabulek

Tab. 1.1 – Seznam reaktorů VVER ve světě	14
Tab. 2.1 – Provázanost kritických bezp. funkcí s fyzickými bariérami	24
Tab. 5.1 – Instalovaný výkon základních typů elektráren v ČR	45
Tab. 5.2 – Vyrobený výkon v ČR za rok 2011	46

Seznam obrázků

Obr. 1.1 – Vývoj reaktorů VVER.....	13
Obr. 1.2 – Vývoj faktoru využití obou bloků JETE v letech 2005-2010	16
Obr. 2.1 – Metody zálohování 3 x 100% a 4 x 50%.....	20
Obr. 2.2 – Fyzické bariéry ochrany do hloubky	21
Obr. 2.3 – Kombinace fyzických bariér a obranných úrovní.....	23
Obr. 3.1 – Mezinárodní stupnice jaderných událostí INES	30
Obr. 3.2 – Události INES 0 a INES 1 na blocích 1 a 2 JETE v letech 2005-2010.....	31
Obr. 3.3 – Události INES 0 a INES 1 na blocích 1-4 JEDU v letech 2005-2010	31
Obr. 4.1 – Vyvedení výkonu výrobního bloku na JETE	32
Obr. 4.2 – Rozdělení zdrojů napájení VS	34
Obr. 4.3 – Systémy napájení spotřebičů VS.....	38
Obr. 4.4 – Provázanost zdrojů ZN III/I s ZN I a ZN III/II s ZN II	39
Obr. 4.5 – Napájení VS bez pracovních a rezervních zdrojů napájení.....	43
Obr. 5.1 – Instalovaný výkon v ČR k 31. 12. 2011.....	46
Obr. 5.2 – Vyrobený výkon za rok 2011.....	46
Obr. 5.3 – Náklady na výrobu 1 kWh elektrické energie v Kč.....	47
Obr. 5.4 – Poměr vývozu a dovozu elektřiny v ČR.....	49

Seznam použité literatury

- [1] KLIK, František. *Jaderná energetika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2550-0.
- [2] *Bezpečnost jaderné energie*. Praha: Úřad pro jadernou bezpečnost ČR, 1993. ISSN 1210-7085.
- [3] ČEZ. *Interní školící materiály: Likvidace abnormálních a mimořádných stavů JE VVER 1000*. Brno, 2003.
- [4] KRIVIT, Steven B. *Nuclear energy encyclopedia: science, technology, and applications*. Hoboken, N. J.: Wiley, 2011. ISBN 978-111-8043-486.
- [5] ČESKO. Zákon č. 18 ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 1997, částka 5, s. 82-106. Dostupný také z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=2996>.
- URL:
- [6] OKB Hidropress [online]. 2007 [cit. 2011-11-17]. Dostupné z: <http://www.gidropress.podolsk.ru/en/>
- [7] BÖCK, H. *Module 04 WWER/ VVER* [online]. Vídeň, 2007. 23 s. Referát. Technická univerzita Vídeň. Dostupné z: http://www.ati.ac.at/fileadmin/files/research_areas/ssnm/nmkt/04_WWER_Overview.pdf
- [8] *Power reactor information system* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <http://www.iaea.org/programmes/a2/>
- [9] *Jaderné elektrárny ČEZ* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrany-cez.html>

- [10] *Česká nukleární společnost* [online]. 2006 [cit. 2011-11-21]. Dukovanský palivový cyklus byl v roce 2005 zase o krok lepší. Dostupné z:
<http://www.csvts.cz/cns/news06/060109d.htm>
- [11] *Jaderná bezpečnost* [online]. 2010 [cit. 2012-01-30]. Dostupné z:
<http://www.jaderna-bezpecnost.cz/>
- [12] Bezpečnost JE Temelín. *Skupina ČEZ* [online]. 2011 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z:
<http://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/12.html>
- [13] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Roční zpráva o provozu ES ČR 2010*. Jihlava, 2011 [cit. 2012-03-09]. Dostupné z:
http://www.eru.cz/dias-browse_articles.php?parentId=130&deep=off&type=
- [14] *U.S. Energy Information Administration* [online]. 2010 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://www.eia.gov/>
- [15] *Portál Atominfo.cz* [online]. 2010 [cit. 2012-04-23]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/>
- [16] Moderní trendy v optimalizaci provozu elektráren a tepláren. *Automa* [online]. 2007 [cit. 2012-05-03]. Dostupné z:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33897
- [17] *Pro Atom Web* [online]. 2007 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z:
<http://proatom.luksoft.cz/>
- [18] *Ústav jaderného výzkumu* [online]. 2011 [cit. 2012-05-04]. Dostupné z:
<http://www.nri.cz/web/ujv>
- [19] *World Nuclear Association* [online]. 2006 [cit. 2012-03-01]. Dostupné z:
<http://world-nuclear.org/info/>