



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

FAKTORY LIMITUJÍCÍ ŽIVOTNOST JADERNÝCH ELEKTRÁREN S TLAKOVODNÍMI REAKTORY

FACTORS LIMITING LIFE TIME OF NUCLEAR POWER PLANTS
WITH PRESSURIZED-WATER REACTORS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Robert Křivánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

BRNO 2017

Klíčová slova

Dlouhodobý provoz; jaderná bezpečnost; jaderné elektrárny; komponenty; stavby; řízení stárnutí; SALTO mise.

Keywords

Ageing management; components; long term operation; nuclear power plant; nuclear safety; structures; SALTO missions.

Oponenti: prof. Ing. Kolat Pavel DrSc.; Ervin Liszka, M. Sc.

Datum obhajoby: únor 2018

Rukopis disertační práce je uložen na Energetickém ústavu Fakulty strojního inženýrství, VUT Brno.

ISBN (80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
2 MOTIVACE.....	6
3 SHRUTÍ.....	9
4 CÍLE PRÁCE.....	18
5 LITERATURA.....	19
6 AUTOROVO CV.....	23
7 ABSTRAKT.....	24

1 ÚVOD

V současné době je ve světě v provozu 448 jaderných reaktorů, z toho je 288 v provozu déle než 30 roků a 87 dokonce déle než 40 roků (stav v září 2017, zdroj: www.iaea.org/pris). Původní projektová životnost těchto reaktorových bloků je 30 až 40 roků, ovšem většina z nich prodloužila nebo se chystá prodloužit svoji životnost na 50 až 60 roků. V poslední době se začínají některé země zabývat úvahami o prodloužení doby provozu na 80 i více roků.

Cílem práce je analýza stavu připravenosti jaderných elektráren (JE) na dlouhodobý provoz (LTO z anglického Long Term Operation) na základě výsledků SALTO peer review servisu IAEA, analýza nejvýznamnějších poruch, havárií a provozních zkušeností s reaktory typu PWR/VVER se zaměřením na případy způsobené stárnutím zařízení a identifikace hlavních zařízení, staveb a komponent limitujících životnost elektráren s reaktory typu PWR/VVER a možných opatření pro zajištění jejich požadované životnosti.

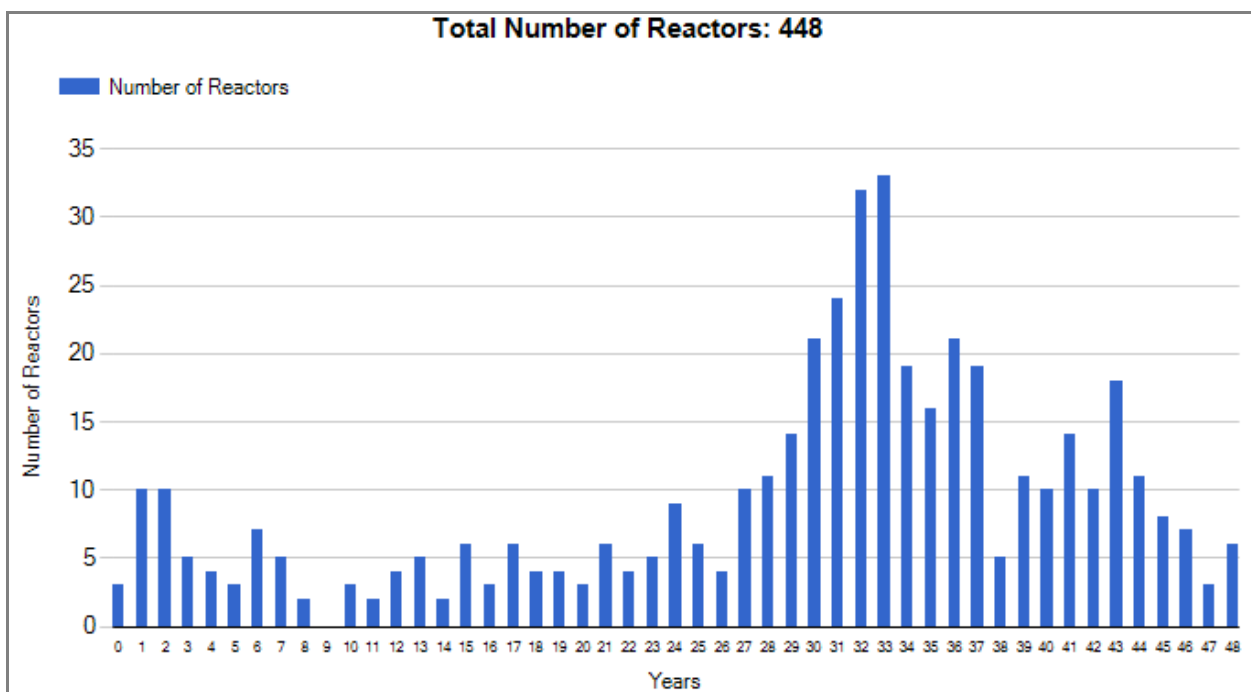
Potenciálně mezi ně patří životnost nevyměnitelných nebo těžce vyměnitelných komponent (jako např. tlaková nádoba reaktoru (TNR), primární potrubí, železobetonová konstrukce reaktorové budovy, systémy kabeláže), ale i neschopnost bloku nebo stěžejních bezpečnostních systémů vyhovět zvyšujícím se požadavkům na bezpečnost nebo zajištění udržitelnosti a provozuschopnosti některých zastaralých systémů.

2 MOTIVACE

Dlouhodobý provoz (LTO – z anglického long term operation) jaderné elektrárny (JE) může být definován jako provoz za časový rámec stanovený například licenčním obdobím, designem, normami, licencí a/nebo předpisy, který je odůvodněn posouzením bezpečnosti se zřetelem na procesy a charakteristiky systémů, konstrukcí a komponent (SKK) omezující jejich životnost. Bezpečný LTO je založen na zkušenostech a výsledcích v oblastech jako jsou programy řízeného stárnutí (PŘS), dalších provozních programů relevantních pro LTO, analýz stárnutí s časově omezenými předpoklady (TLAA – z anglického time limited ageing analysis) a obnova licence k provozu. Ostatní činnosti, včetně periodického hodnocení bezpečnosti, aktuální licenční báze a modifikace zařízení, jsou rovněž významné pro LTO. Efektivní PŘS jsou klíčovými prvky pro bezpečný a spolehlivý provoz JE v průběhu původně plánovaného časového rámce provozu a po dobu LTO.

Většina členských zemí IAEA, které provozují JE, mají předpisy, které omezují komerční provoz energetických reaktorů na stanovené časové období nebo které vyžadují komplexní posouzení bezpečnosti provozu v určitých intervalech. Původní doba licencovaného provozu reaktorů je založena především na ekonomických úvahách spíše než na omezení jaderných technologií nebo skutečných konstrukčních materiálů.

V posledních desetiletích klade narůstající počet zemí velký důraz na pokračování provozu JE za původně předpokládaný časový rámec (typicky 30 až 40 let). Řada zemí zvažuje LTO JE na 50 až 60 roků. Některé země již nyní připravují legislativu umožňující provoz na 80 i více roků.



Obr. 1 Stáří energetických jaderných reaktorů (zdroj: www.iaea.org/pris) - stav září 2017

Kvalitní projekt a vysoká kvalita výstavby jsou předpoklady pro bezpečné JE. Nicméně, bezpečnost elektrárny závisí v konečném důsledku na schopnostech a svědomitosti obsluhujícího personálu a na programech, procesech a pracovních metodách. To platí rovněž pro všechny

činnosti související s LTO. Mnoho problémů, kterým čelí osoby odpovědné za zajištění bezpečného provozu JE, jsou podobné po celém světě.

Tyto výzvy by se dali rozdělit na:

1. Technické;
2. Bezpečnostní;
3. Ekonomické – konkurenční zdroje energie, náklady na zabezpečení spolehlivého a bezpečného provozu;
4. Politické – politické zájmy vládnoucích vrstev;
5. Společenské – akceptovatelnost veřejnosti, zájem o práci v oboru.

Ekonomickými, politickými a společenskými výzvami pro LTO JE se tato práce bude zabývat jen okrajově. K technickým a bezpečnostním výzvám patří zejména:

1. Principy a rozsah činností pro zajištění LTO;
2. Identifikace nevyměnitelných nebo velmi obtížně vyměnitelných (tj. s extrémně vysokými náklady na výměnu nebo bezpečnostními či zdravotními riziky) zařízení a konstrukcí;
3. Identifikace degradačních mechanismů a dopadu stárnutí, které se mohou objevit s narůstajícím stářím SKK;
4. Určení, které SKK a příslušné funkce musí být specificky přezkoumány pro LTO;
5. Kritéria a návody pro prokázání, že dopady stárnutí budou řízeny po dobu LTO, včetně posouzení fyzického stavu SKK a stávajících programů;
6. Návody pro identifikaci bezpečnostních analýz, které používají časově omezené předpoklady (TLAA), které musí být přehodnoceny pro LTO;
7. Identifikace bezpečnostních vylepšení, které musí být provedeny k zajištění provozu JE i po původně určeném časovém rámci, pro které byly navrženy nebo licencovány;
8. Určení limitujících faktorů (technických a bezpečnostních, ale i ekonomických, politických, sociálních atd.) pro provoz dané JE;
9. Určení nejvhodnější doby pro odstavení JE z provozu.

IAEA začala vyvíjet standardy týkající se stárnutí zařízení již v roce 1990. Následně byla publikována řada bezpečnostních zpráv a návodů, které poskytují obecné metodické pokyny, stejně jako zvláštní pokyny pro vybrané hlavní komponenty a konstrukce JE. Podrobné návody pro specifické programy pro řízení stávajícím i potenciálních dopadů stárnutí a degradačních mechanismů SKK, které pomáhají provozním organizacím a regulačním orgánům v určení technických základů a praktických pokynů pro řízení stárnutí mechanických, elektrických a SKŘ (systémy kontroly a řízení) komponentů a staveb JE důležitých z hlediska bezpečnosti, jsou v kontinuálním vývoji v rámci programu IGALL [1] a dalších dokumentů. IGALL poskytuje také společný, mezinárodně uznávaný základ toho, co představuje efektivní programy pro řízení stárnutí; základní znalosti o řízení stárnutí pro návrh nových JE, revizi návrhů, přehodnocení TLAA a přehled dostupných informací o řízení stárnutí SKK.

Systematické řízení stárnutí zajišťuje dostupnost bezpečnostních funkcí po celou dobu životnosti elektrárny a vyřazování z provozu, při zohlednění změn, které nastanou s časem a použitím. To vyžaduje řešení jak fyzického stárnutí SKK, které má za následek degradaci jejich výkonnostních charakteristik, a zastarávání SKK, tj. jejich zastarávání ve srovnání s nejnovějšími technologiemi, normami a předpisy. Efektivní řízení stárnutí SKK po celou dobu životnosti vyžaduje použití systematického přístupu k řízení stárnutí, který poskytuje rámec pro koordinaci všech programů a činností souvisejících s pochopením, detekcí, sledováním, kontrolou a zmírňováním příznaků stárnutí zařízení nebo staveb, včetně údržby, kontroly v provozu, testování a sledování, stejně jako provozních a technických podpůrných programů (včetně analýzy příznaků stárnutí a mechanismů degradace) a externích programů, jako je výzkum a vývoj.

V současné době se snahy na národní i mezinárodní úrovni zaměřují na zajištění bezpečného LTO JE. Zatím se ovšem nikdo systematicky nezabývá výzkumem, výpočty a analýzou technických faktorů, které budou omezovat celkovou dobu provozu JE z technického a bezpečnostního hlediska, a povedou ke konečnému odstavení elektráren. Neexistuje mezinárodní (ani národní) konsensus limitující maximální dobu provozu JE obecně, ani jednotlivých typů reaktorů. V současnosti jsou důvodem trvalého odstavení provozovaných bloků důvody politické, ekonomické nebo důvody spojené s haváriemi nebo významnějšími poruchami. Systematický přístup k určení limitujících faktorů provozu z technického a bezpečnostního hlediska zatím chybí.

3 SHRnutí

Na základě výsledků SALTO peer review servisu IAEA byla provedena analýza hlavních nedostatků a opatření JE v připravenosti na bezpečný LTO se zaměřením na témata, jejichž hlubší znalost je důležitá pro budoucí přesnější určení technických faktorů limitujících životnost jaderných elektráren.

Z výsledků SALTO peer review servisu by se mohlo zdát, že není příliš mnoho problémů v souvislosti se stárnutím nebo zastaráváním hlavních nevyměnitelných nebo těžce vyměnitelných komponent a stavebních konstrukcí. Je to ale dáno z velké části tím, že je SALTO peer review servis zaměřen spíše na identifikování systémových nedostatků v oblasti řízení stárnutí SKK a připravenosti na bezpečný LTO. Existují sice i nálezy o nedostacích spojených s konkrétními komponentami a stavebními konstrukcemi, ale většinou takovéto nálezy slouží jako podpůrné fakty pro definování nalezu na vyšší úrovni, tj. nálezy programové, procedurní, systémové apod.

Jak je podrobně diskutováno v kapitole 4.5.1 disertační práce, ve fázi přípravy na prodloužení doby provozu lze hlavní problémy rozdělit do pěti kategorií:

1. Nedostatečné vstupní údaje pro demonstraci připravenosti na bezpečný LTO;
2. Nedostatečné prokázání toho, že bezpečnostní SKK budou plnit svou bezpečnostní funkci během zamýšleného období LTO;
3. Neúplné nebo chybějící PŘS a další programy pro řízení fyzického stárnutí bezpečnostních SKK;
4. Nekompletní nebo chybějící program kvalifikace zařízení (EQ);
5. Nedostatečné informace pro prodloužení platnosti TLAA.

Nejdůležitější technická nápravná opatření ve fázi přípravy bezpečného LTO JE jsou potom zejména:

- Rekonstrukce projektové dokumentace (jako základní součást řízení konfigurace a modifikací a zdroje TLAA);
- Zlepšení identifikačního systému SKK včetně kabelů a trasování kabelů, komponentů SKŘ, průchodek a potrubí;
- Zlepšení správy dat pro řízení stárnutí a hodnocení LTO (nedostupné záznamy o provozní historii SKK, rozptýlené výsledky testů, inspekcí a sledování);
- Vylepšení programu kvalifikace zařízení.

Samostatně jsou v kapitole 4.5.2 disertační práce diskutovány hlavní nedostatky a opatření JE v oblasti řízení stárnutí SKK. Jedná se o nedostatky spojené se systematickým vývojem, implementací, přezkoumáváním a zlepšováním řízení stárnutí v JE. Ty je potřeba řešit i v případě, že JE neuvažuje o LTO, ale zároveň tvoří základ pro demonstraci připravenosti na bezpečný LTO. Tyto problémy lze rozdělit do tří kategorií:

1. Stanovení rozsahu SKK;
2. Přezkum řízení stárnutí (AMR);

3. Programy řízení stárnutí (PŘS).

Nejdůležitější technická nápravná opatření týkající se řízení stárnutí jsou:

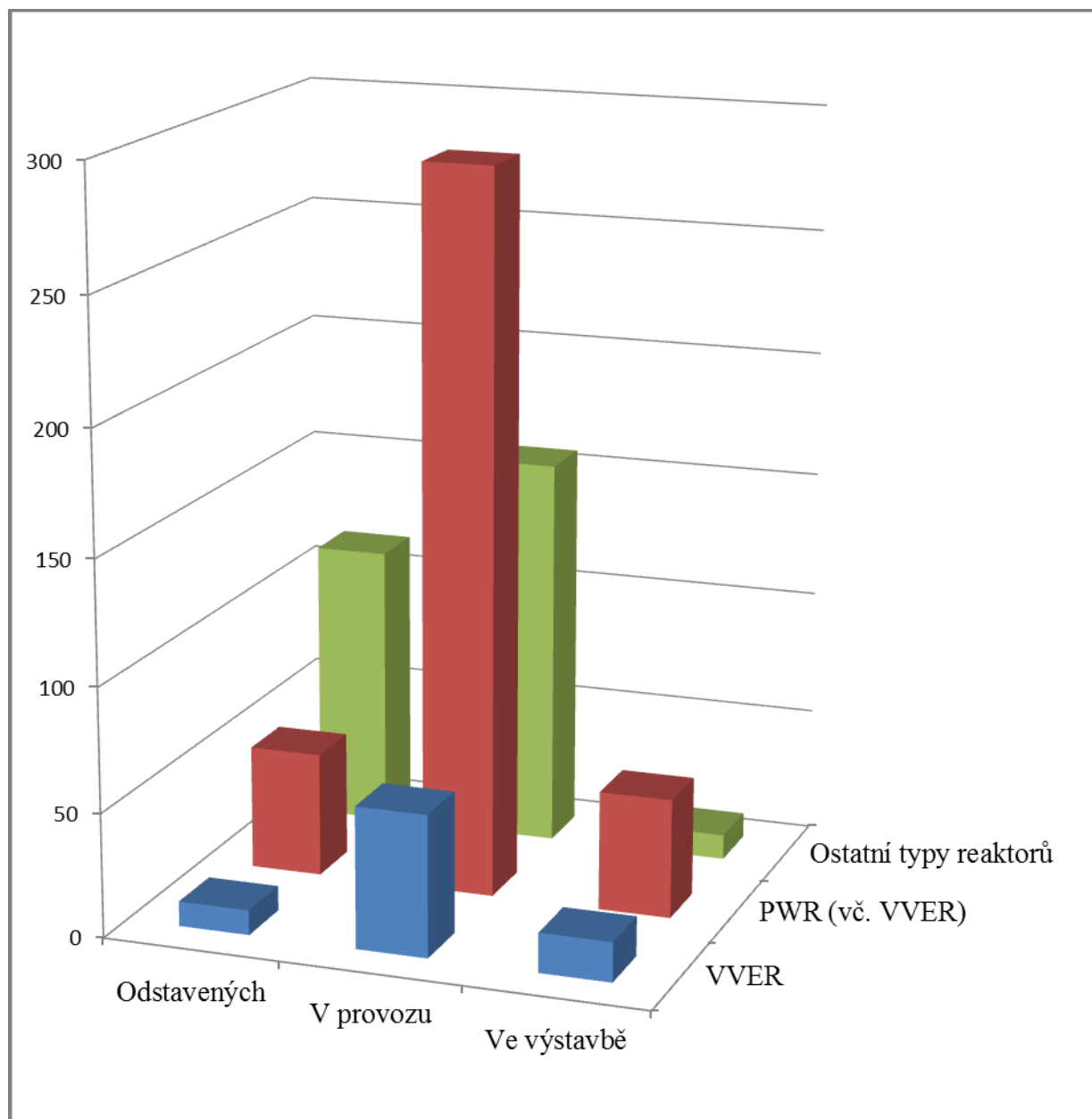
- Zavedení procesu systematického stanovení rozsahu ("scoping") pro identifikaci SKK podléhajících řízení stárnutí;
- Provádění AMR pro SKK v oblasti působnosti s cílem zajistit a prokázat, že stárnutí bude účinně řízeno;
- Vývoj, implementace, přezkoumání a zdokonalení PŘS pro efektivní řízení identifikovaných efektů stárnutí.

Reaktory typu PWR/VVER se jeví jako nejúspěšnější design energetických jaderných elektráren. To dokazují i stávající statistiky. Dle databáze IAEA PRIS (zdroj: www.iaea.org/pris) k srpnu 2017 bylo trvale v provozu 290 JE s reaktory PWR/VVER, což je cca 65 % z celkového počtu 447 JE v provozu. Oproti tomu bylo permanentně odstavených pouze 50 JE s reaktory PWR/VVER, tedy pouze cca 30 % z celkového počtu 164 trvale odstavených JE. Ve výstavbě bylo v srpnu 2017 celkem 48 JE s reaktory PWR/VVER, tedy cca 83 % ze všech 58 JE ve výstavbě. Tato statistika ukazuje na dobrý design a spolehlivost JE s reaktory PWR/VVER a na jejich dobré vyhlídky do budoucnosti.

Pokud se blíže podíváme na JE s reaktory typu VVER, je v současné době v provozu 57 JE s reaktory VVER v Arménii (1), Bulharsku (2), České Republice (6), Číně (2), Finsku (2), Maďarsku (4), Indii (2), Iránu (1), Rusku (18), Slovensku (4) a Ukrajině (15). Ve výstavbě je v současnosti 16 JE s reaktory VVER v Bělorusku (2), Číně (2), Indii (1), Rusku (7), Slovensku (2) a Ukrajině (2). Odstavených JE s VVER reaktory je celkem 10. Jsou to 1. blok Arménské JE typu VVER V-270 odstavený v roce 1989 po silném zemětřesení. Hlavní důvod trvalého odstavení tohoto bloku ovšem není poškození bloku vlivem zemětřesení, ale komplikovaná politická a ekonomická situace v Arménii po rozpadu Sovětského Svazu. Samostatná Arménie nedokázala provést všechny potřebné kontroly, výpočty a průkazy po zemětřesení po celou řadu let a posléze se zaměřila na zprovoznění 2. bloku JE. To se povedlo až v roce 1994 za použití části zařízení z 1. bloku jako náhradních dílů. Tím se stal první blok neprovozuschopný. Dále jsou to první tři bloky JE Novovoronež v Rusku, uvedené do provozu v letech 1964, 1969 a 1971. Šlo o nejstarší prototypy VVER reaktoru VVER V-120 a VVER V-179 s poměrně nízkým výkonem (197 MW, 336 MW a 385 MW), které byly odstaveny hlavně z ekonomických důvodů a částečně z důvodu neekonomičnosti investic potřebných pro uvedení do souladu s moderními bezpečnostními požadavky. Blok 1 a 2 JE Jaslovské Bohunice na Slovensku a bloky 1-4 JE Kozloduj v Bulharsku byly odstaveny v letech 2002 až 2008 i přes rozsáhlé modernizace na politický nátlak EU jako podmínka pro vstup do EU (viz obr. 2).

Pro účely další diskuze budeme porovnávat faktory limitující životnost elektráren s reaktory typu PWR/VVER při provozu 40, 60 a 80 roků. Nejstarší provozované reaktory jsou v současnosti v provozu 48 roku (viz obr. 1 – stav v září 2017). Většina z nich je právě typu PWR. Žádný jiný energetický reaktor doposud nebyl v provozu delší dobu. Pokud tedy chceme shrnout skutečné důvody pro trvalé odstavení JE z provozu, máme skutečné údaje pouze pro provoz 40 roků u části JE.

Jak již bylo diskutováno v předchozích kapitolách, při provozu JE s reaktory typu PWR/VVER **po dobu 40 roků** nebo méně, patří mezi hlavní důvody odstavení, důvody ekonomické a politické. Z reaktorů typu PWR/VVER nebyl v období do 40 roků provozu včetně odstaven žádný reaktor z čistě technických důvodů jako vyčerpání životnosti, havárie nebo poruchy. Z reaktorů PWR by do této kategorie mohla částečně patřit pouze JE Crystal River 3 v USA odstavena po 36 letech provozu (viz kapitola 6.2.4 disertační práce). Zde však byla jako hlavní příčina špatně provedena modifikace a následně poškození kontejnmentu.



Obr. 2 Podíl reaktorů typu PWR a VVER na celkovém počtu energetických jaderných reaktorů (zdroj: www.iaea.org/pris) - stav srpen 2017

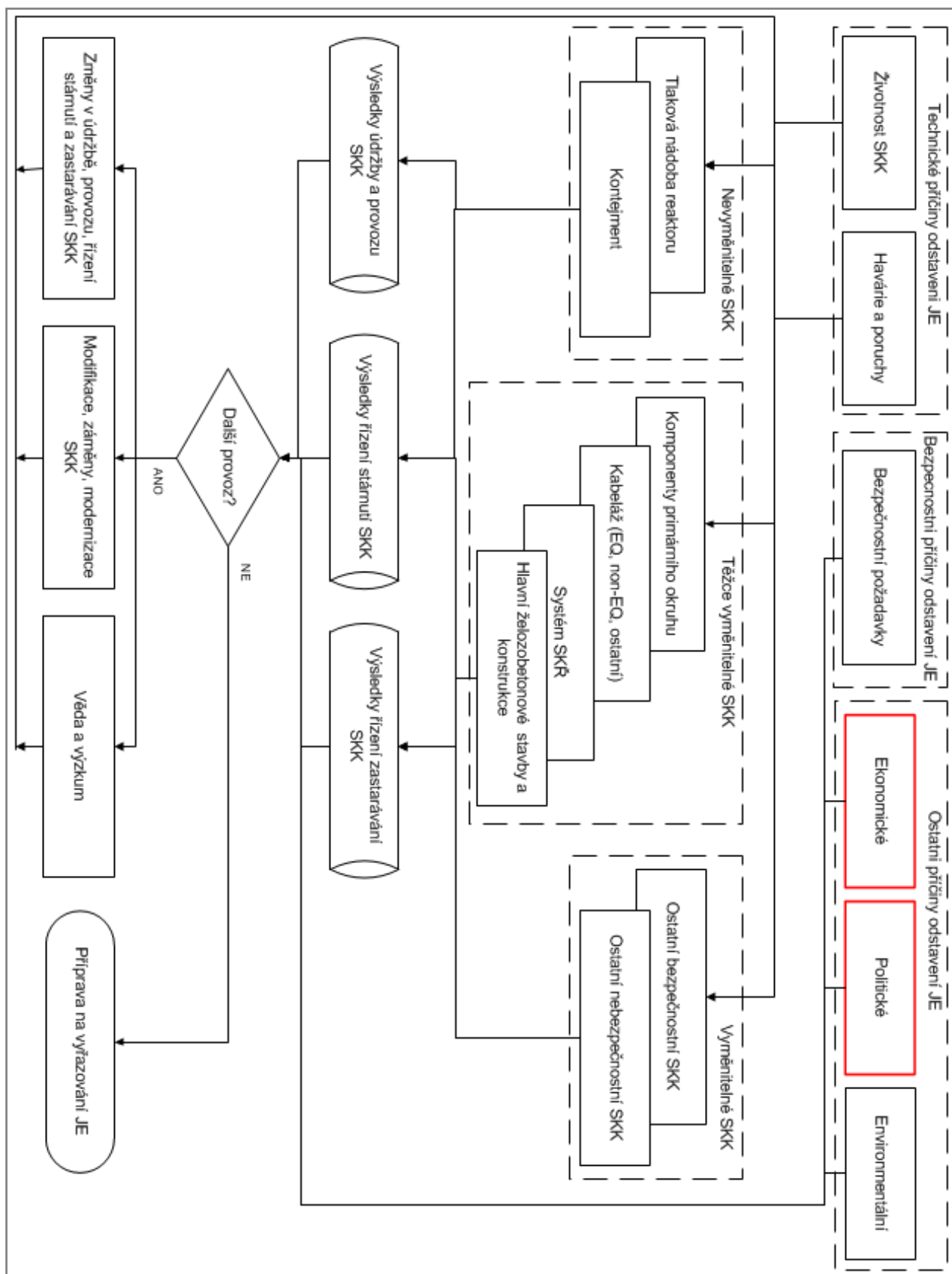
Dále je potřeba zmínit i 2. blok JE Three Mile Island v USA, uvedeny do provozu v dubnu 1978 a trvale odstaveny v březnu 1979 po havárii s tavením jádra aktivní zóny. Šlo o nejvýznamnější havárii v historii komerčního využívání jaderné energie v USA, klasifikované stupněm INES (International Nuclear Event Scale) 5 ze 7 jako havárie s širšími následky. Havárie

zачala poruchou na sekundárním systém, následovanou zaseknutím pojišťovacích ventilu na kompenzátoru objemu v otevřené poloze, což způsobilo značný unik chladiva primárního okruhu do kontejnmentu. Následný rozsah havárie a následky tohoto poměrně jednoduchého stavu byl ale způsoben především chybou operátoru, kteří neindikovali situaci jako havárii se ztrátou primárního chladiva z důvodu nedostatečného tréninku a lidským faktorům jako interakce mezi člověkem a zařízením (špatná interpretace signalizace hladiny v kompenzátoru objemu na blokové dozorně). Tuto havárii tedy řadíme spíše mezi havárie způsobené lidským faktorem než degradaci nebo selháním zařízení.

Příčiny trvalého odstavení JE jsou schematicky popsány na obr. 3. Jak bylo diskutováno v kapitole 6.3.2 disertační práce, je možno příčiny odstavení JE rozdělit na technické, bezpečnostní a ostatní. Technické příčiny odstavení JE, které jsou hlavním předmětem této práce, se týkají zařízení JE. To můžeme rozdělit na zařízení nevyměnitelné, těžce vyměnitelné a vyměnitelné (viz kapitola 6.3.3 disertační práce). Ze zařízení nevyměnitelného se dále zaměříme na TNR a kontejnment, u zařízení těžce vyměnitelného na komponenty primárního okruhu, kabeláž, systém SKR a hlavní železobetonové stavby a konstrukce. Pro kompletnost potom doplníme vyměnitelná SKK, a to ostatní bezpečnostní a nebezpečnostní SKK, které nemají příliš významný vliv na rozhodování o trvalém odstavení JE (viz kapitola 6.3.3 disertační práce). Všechna tato zařízení jsou vyžadují údržbu, je u nich dle potřeby řízeno jejich stárnutí a zastarávání. Ze všech těchto procesů jsou významné výstupy, které ve formě databází, analýz a zpráv slouží jako podklad pro rozhodování o dalším provozu JE.

Do rozhodovacího kroku o dalším provozu JE tedy vstupují tyto informace o stavu SKK jako provozní historie, historie poruch, havárií a údržby, výsledky a predikce životnosti SKK, stav zastarávání SKK a predikce. Dále do rozhodovacího kroku vstupují další faktory jako bezpečnostní příčiny, ekonomické příčiny, politické a environmentální příčiny odstavení JE (viz kapitola 6.3.2 disertační práce). Tento rozhodovací proces probíhá v různých zemích v různém časovém úseku provozu JE, s různou periodicitou a s různým časovým horizontem do budoucnosti (viz kapitola 6.3.1 disertační práce). Pro reaktory PWR/VVER je nejčastější americký model původní projektové životnosti 40 roku s prodloužením provozu vždy o 20 let, tedy na 60 roků a později na 80 roků. Tento model tedy použijeme jako základní v této kapitole. Je třeba ale říci, že reaktory VVER 440 mají původní projektovou životnost 30 roků, a proto probíhá první prodloužení jejich životnosti již po 30 letech provozu. Pro všechny ale platí, že se pro konečné rozhodnutí musí zvážit všechny faktory dohromady. Tento proces často nazýváme studie proveditelnosti LTO (anglicky též feasibility study).

Výsledkem této studie může být rozhodnutí o trvalém odstavení. S tím souvisí určení časového harmonogramu přípravy na trvalé odstavení a dále potom samotného vyřazování JE z provozu. Případné rozhodnutí o dalším provozu JE je doprovázeno dalšími podrobnými studiemi a rozhodnutími o potřebných modifikacích, záměnách a modernizacích SKK, potřebných změnách v údržbě, provozu, řízení stárnutí a zastarávání SKK a potřebných aktivitách ve vědě a výzkumu pro odstranění neznámých faktorů a vlivů.



Obr. 3 Potencionální faktory limitující životnost JE s reaktory PWR/VVER při provozu 40 roků

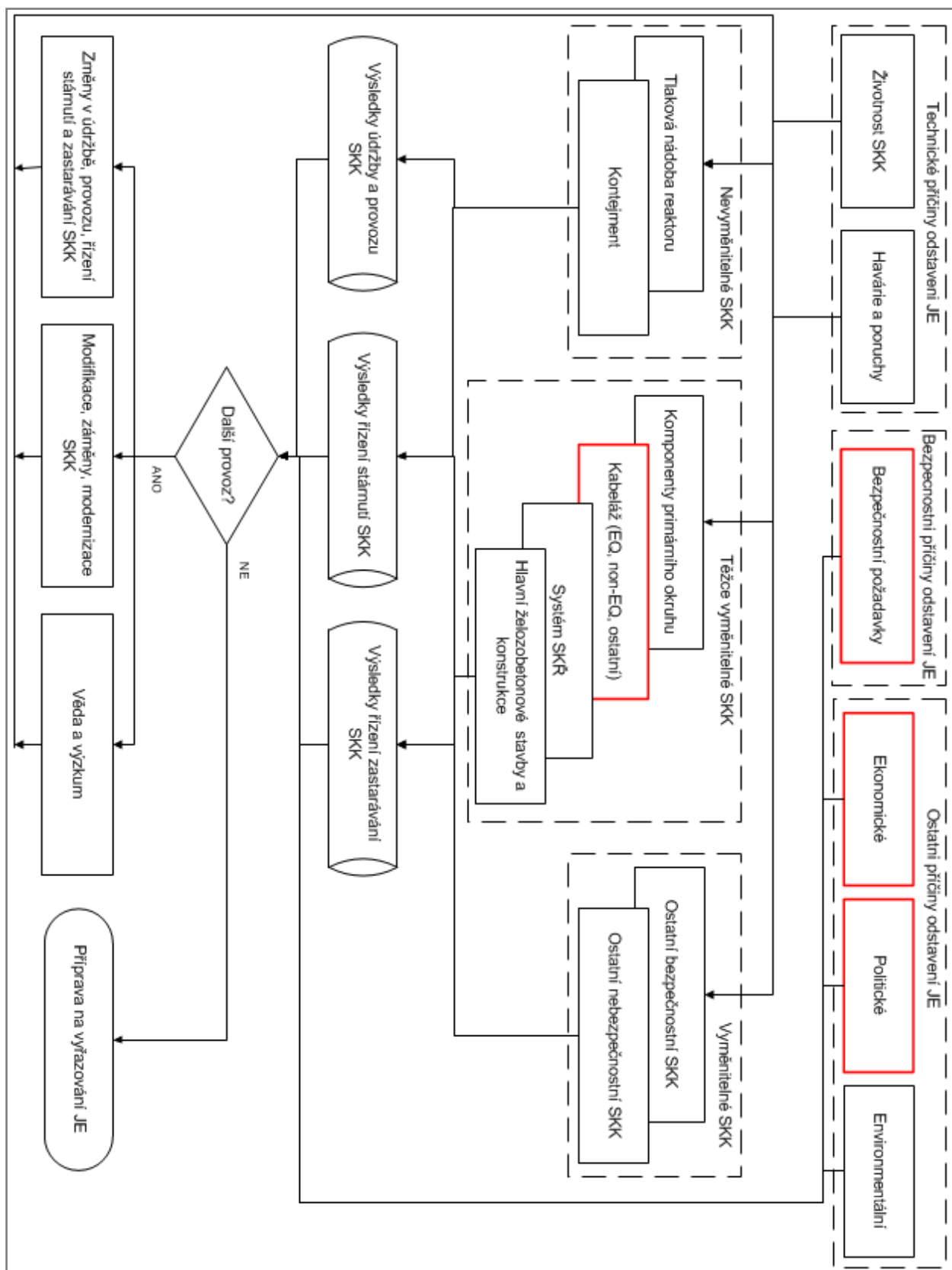
Tento proces je schématicky popsán na obr. 3. Zároveň jsou zde červenou barvou zvýrazněny typické příčiny odstavení JE v období do 40 roků provozu včetně. Jak již bylo dříve diskutováno,

patří mezi hlavní důvody odstavení JE s reaktory PWR/VVER před nebo po 40 letech důvody ekonomické a politické.

V případě prodloužení doby provozu JE s reaktory PWR/VVER **na 60 roků** samozřejmě zůstávají důležité ekonomické a politické příčiny, ovšem nabývají významu také bezpečnostní příčiny a požadavky. Jak bylo diskutováno v kapitole 6.3.2 disertační práce, bezpečnostní požadavky na JE se obvykle zvyšují z důvodu Periodického hodnocení bezpečnosti s periodicitou každých deset roků a také jako následek významných havárií typu JE Černobyl na Ukrajině v roce 1986 nebo JE Fukushima-Daiichi v Japonsku v roce 2011.

Co se týče technických příčin odstavení JE, nejsou zatím evidovány významné poruchy nebo havárie JE s reaktory PWR/VVER, které by vedly k odstavení JE (viz kapitola 6.2.4 disertační práce). Z hlediska stárnutí a končící životnosti SKK se pro provoz 60 roků také nejeví žádné jednoznačné překážky (viz kapitola 6.3.3 disertační práce). Za zmínku stojí zřejmě jenom problém kabelových systémů. Jak bylo detailně diskutováno v kapitole 6.3.3 disertační práce, zejména pro JE s reaktory VVER byly často použity nevhodné kabely (např. s izolací z PVC), jejichž životnost je v prostředí JE omezena. Kvalifikace kabelů je často nedořešena. Nepřesná nebo chybějící identifikace kabelů a jejich trasování a použití značného množství typu a výrobců kabelů znesnadňuje řízení jejich životnosti. A v neposlední radě použití protipožárních pěn a nátěrů neumožňuje výměnu kus po kus. Tento problém je v současnosti nedořešen v řadě JE s reaktory VVER.

Naplnění požadavků na zvýšení bezpečnosti často souvisí se značnými finančními náklady. V kombinaci s hrozbou potřeby záměny kabeláže a záměny SKŘ (z důvodu technologického zastarávání), politickou nejistotou a ekonomickým tlakem (z důvodu podpory obnovitelných zdrojů energie, daní na používání jaderné energie, nízké ceny elektřiny) může docházet a i občas již dochází (viz kapitola 6.3.2 disertační práce) k odstavování JE s reaktory PWR/VVER před dosažením 60 roků provozu. Tento proces je schematicky popsán na obr. 4. Zároveň jsou zde červenou barvou zvýrazněny potencionální příčiny odstavení JE v období do 60 roků provozu včetně.

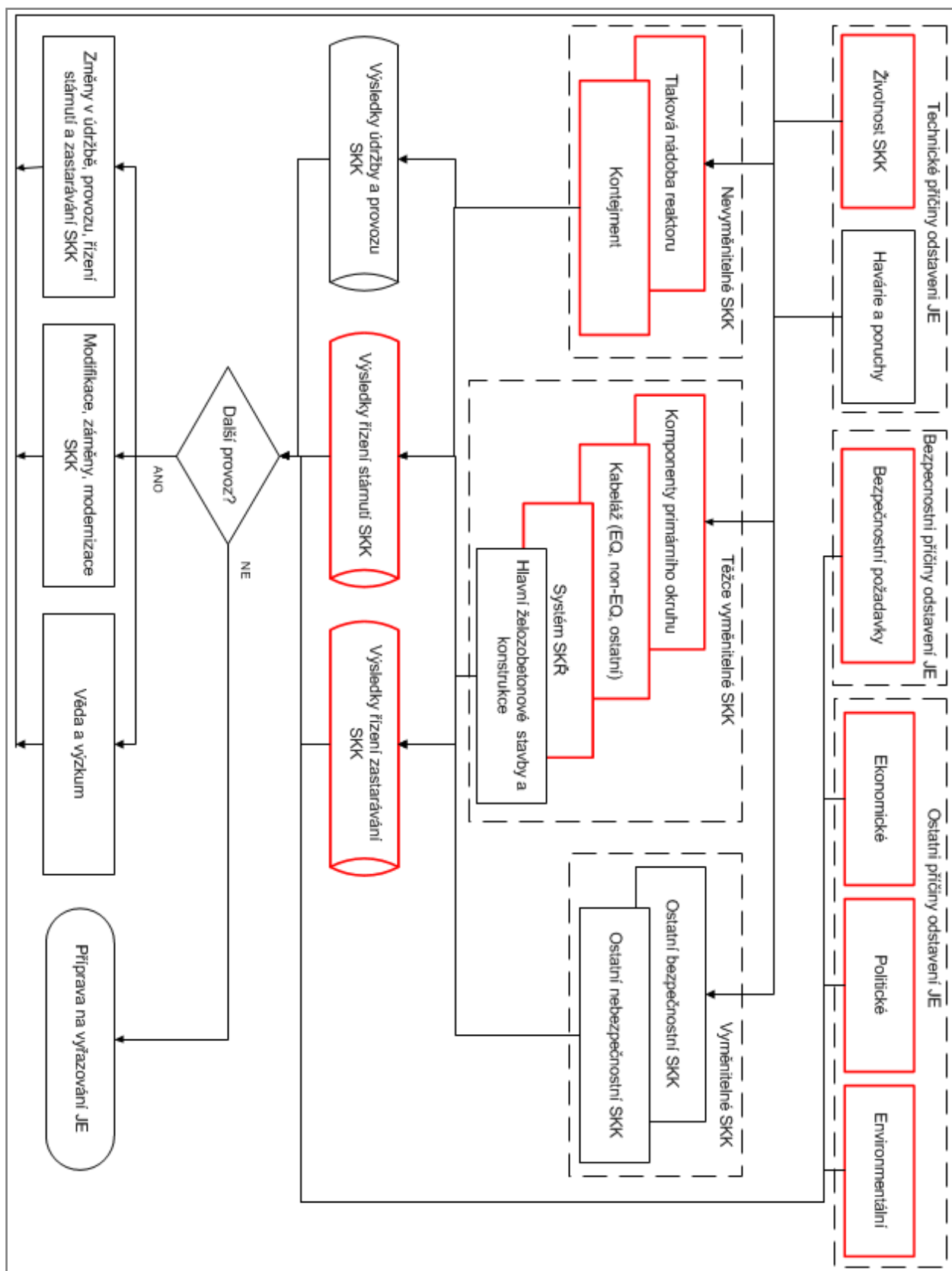


Obr. 4 Potencionální faktory limitující životnost JE s reaktory PWR/VVER při provozu 60 roků

Provoz JE **po dobu 80 roků** je v současné době ve stádiu příprav legislativy, vědecké a technické báze. Když se nejprve podíváme na jiné typy reaktorů než PWR/VVER, i zde probíhají činnosti na významné prodloužení doby provozu 60 let. Např. reaktory typu CANDU již mají schválenou a částečně i provedenou komplexní obnovu bloku, která umožní prodloužení doby provozu osmi bloků JE Bruce a čtyř bloků JE Darlington až na 76 roků. Také JE Olkiluoto ve Finsku se dvěma bloky BWR, které jsou v současnosti v provozu téměř 40 let, již plánuje a připravuje elektrárnu na možnost prodloužení provozu na 80 roků.

U JE s reaktory PWR/VVER v případě potencionálních příčin odstavení JE z ekonomických, politických a bezpečnostních důvodů, přibudou také environmentální důvody (viz kapitola 6.3.2 disertační práce). Zvýší se ale také význam končící životnosti hlavního SKK. Jak je podrobně diskutováno v kapitole 6.3.3 disertační práce, bude třeba provést ještě celá řada činností pro zajištění a prokázání dostatečné životnosti nevyměnitelných SKK, zejména TNR a kontejnmentu. Životnost TNR může být problematická pro celou řadu bloků PWR/VVER. V případě těžce vyměnitelných SKK bude nutné zcela jistě řešit u některých JE záměnu SKŘ za plně digitální. To zatím naráží na legislativní problémy v celé řadě zemí (např. v USA a Kanadě) a bude se muset řešit. Dále bude nutno vyřešit problematiku úplné nebo částečné záměny kabeláže u některých JE, zvláště typu VVER. Z komponent primárního okruhu bude potřeba věnovat největší pozornost VČR a primárnímu potrubí (viz kapitola 6.3.3 disertační práce).

Rozhodování o případném prodloužení provozu JE na 80 roků bude komplexní problém, který bude potřeba řešit pro každý blok individuálně. Kromě faktorů ekonomických, politických, environmentálních a bezpečnostních však při rozhodování budou mít (na rozdíl od provozu do 60 let) zásadní roli i faktory technické, zejména končící životnost SKK nebo neschopnost prokázat dostatečné bezpečnostní rezervy SKK. Tento proces je schématicky popsán na obr. 5. Zároveň jsou zde červenou barvou zvýrazněny potencionální příčiny odstavení JE v období do 80 roků provozu včetně.



Obr. 5 Potencionální faktory limitující životnost JE s reaktory PWR/VVER při provozu 80 roků

4 CÍLE PRÁCE

Následující body shrnují cíle této práce:

- Analýza stavu připravenosti jaderných elektráren na LTO na základě výsledků SALTO peer review servisu IAEA;
- Analýza nejvýznamnějších poruch, havárií a provozních zkušeností s reaktory typu PWR/VVER se zaměřením na případy způsobené stárnutím zařízení;
- Identifikace hlavních zařízení, staveb a komponent limitujících životnost elektráren s reaktory typu PWR/VVER a možných opatření pro zajištění jejich požadované životnosti.

5 LITERATURA

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned. SRS No. 82, IAEA, Vienna (2015)
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Final Report of the Programme on Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors, IAEA, Vienna (2007)
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants. SRS No. 57, IAEA, Vienna (2008)
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.12, IAEA, Vienna (2009)
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Specific Safety Requirements No. SSR-2/1, Rev.1, IAEA, Vienna (2016)
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation, Specific Safety Requirements No. SSR-2/2, Rev.1, IAEA, Vienna (2016)
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-48, IAEA, Vienna (2017)
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-25, IAEA, Vienna (2013)
- [9] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report, Final Report, NUREG-1801 Rev. 2, USNRC, Washington D.C. (2010)
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Approaches to Ageing Management for Nuclear Power Plants: International Generic Ageing Lessons Learned (IGALL) Final Report, TECDOC-1736, Vienna (2014)
- [11] R. Krivanek, IAEA International Generic Ageing Lessons Learned Programme Phase 1 Results, Nuclear Engineering and Design, NED8185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.11.046>, (2015)
- [12] R. Krivanek, Ageing: clarifying lessons learned, Nuclear Engineering International, (August 2015)
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, SALTO Peer Review Guidelines, Guidelines for Peer Review of Safety Aspects of Long Term Operation of Nuclear Power Plants, IAEA Services Series No. 26, Vienna (2014)
- [14] R. Krivanek, Long term operation of nuclear power plants – IAEA SALTO peer review service and its results, Nuclear Engineering and Design, NED8070, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.021>, (2014)
- [15] R. Krivanek, A peer review for long term operation, Nuclear Engineering International, (July 2014)
- [16] R. Krivanek, R. Havel, Long term operation of nuclear power plants – IAEA SALTO missions observations and trends, Nuclear Engineering and Design, NED8805, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.021>, (2016)

- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing, Safety Report Series No. 3, IAEA, Vienna (1998)
- [18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Facilities and Activities, Safety Requirements No. GS-R-3, IAEA, Vienna (2006).
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Management system for Facilities and Activities, Safety Guide No. GS-G-3.1, IAEA, Vienna (2006)
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Operating Organization for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-2.4, IAEA, Vienna (2001)
- [21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management System for Nuclear Installations, Safety Guide No. GS-G-3.5, IAEA, Vienna (2009)
- [22] R. Krivanek, J. Fiedler, Main corrective measures in an early phase of nuclear power plants' preparation for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design, NED9185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.002>, (2017)
- [23] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Title 10 Code of Federal Regulations Part 54, Requirements for Renewal of Operating Licenses for Nuclear Power Plants, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, USNRC, Washington D.C.
- [24] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Title 10 Code of Federal Regulations Part 50.65, Requirements for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, USNRC, Washington D.C.
- [25] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Title 10 Code of Federal Regulations Part 50.55a, Codes and Standards, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, USNRC, Washington D.C.
- [26] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Title 10 Code of Federal Regulations Part 50.49, Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants, Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, USNRC, Washington D.C.
- [27] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Appendix B to Title 10 Code of Federal Regulations Part 50, Quality Assurance Criteria for Nuclear Power Plants and Fuel Reprocessing Plants
- [28] R. Krivanek, J. Fiedler, Main deficiencies and corrective measures of nuclear power plants in ageing management for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design, NED9377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.035>, (2017)
- [29] ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ, Normativně technická dokumentace A.S.I., Hodnocení zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER, Sekce IV, NTD ASI – IV – 2013, (2014)
- [30] Kopec, B. a kol.: Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, ISBN 978-80-7204-591-4, CERM Brno (2008)
- [31] VUT Brno, Bakalárska Práce Radek Simeček, Moderní Metody v Nedestruktivním Zkoušení Pomocí Ultrazvuku, Brno (2011)

- [32] Materiály firmy Testima na www.testima.eu
- [33] Materiály firmy Starmans na www.starmans.cz
- [34] Materiály na serveru Nedestruktivní kontrola v průmyslu - www.ndt.cz
- [35] Materiály na serveru Tripol - www.3pol.cz
- [36] Materiály na serveru Konstrukce - www.konstrukce.cz
- [37] Materiály a prezentace firmy ÚJV Řež
- [38] Materiály a prezentace firmy Doosan
- [39] Materiály a prezentace firmy Laborelec
- [40] SNETP, Strategic Research and Innovation Agenda, SRIA (2013)
- [41] ENERGY POWER RESEARCH INSTITUTE, 3002000628, EPRI Materials Degradation Matrix, Revision 3, Charlotte (2013)
- [42] Wilson, P.D., The Nuclear Fuel Cycle, OUP (1996)
- [43] Materiály OECD/NEA na serveru www.world-nuclear.org
- [44] National Report on „Stress Tests“, NPP Dukovany and NPP Temelín Czech Republic, Evaluation of Safety and Safety Margins in the light of the accident of the NPP Fukushima, State Office for Nuclear Safety, Czech Republic (2011)
- [45] Technical and Economic Aspects of Load Following with Nuclear Power Plants, OECD Nuclear Energy Agency, (June 2011)
- [46] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Highlights from Incident Reporting System (IRS) for Operating Experience (IRS) for Events in 1996 – 2013
- [47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IRS Topical Study, Analysis of Cracking and Corrosion Issues in the Reactor Coolant System (2005)
- [48] European Commission Joint Research Centre (EU JRC), SPNR/CLEAR/11 11 001 Rev. 00, Topical Study Ageing Related Events (2011).
- [49] European Commission Joint Research Centre (EU JRC), NRSA/CLEAR/14 01 003 Rev. 01, Topical Study Events related to Leaks and Cracks of the Reactor Coolant Pressure Boundary (2014)
- [50] European Commission Joint Research Centre (EU JRC), NRSA/CLEAR/15 07 004 Rev. 00, Topical Study Events Related to Maintenance at Nuclear Power Plants (2015)
- [51] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT/ NUCLEAR ENERGY AGENCYcODAP Topical Report „FAC of Carbon Steel and Low Alloy Steel PipingFlow Accelerated Corrosion (FAC) of Carbon Steel and Low Alloy Steel Piping in Commercial Nuclear Power Plants, NEA/CSNI/R(2014)6 (2014)
- [52] Japan Atomic Energy Agency, Interimu Report by Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations, (2011)
- [53] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, NRC INFORMATION NOTICE 2011-20: CONCRETE DEGRADATION BY ALKALI-SILICA REACTION (2011)
- [54] ADAMS Accession No. ML12142A053, Concrete Crack within Shield Building Temporary Access Opening,” Condition Report (CR) No. 2011-03346, Revision 1 (2012)
- [55] ADAMS Accession No. ML12173A023, Davis-Besse Inspection Report 05000346-46-12-009 (2012)
- [56] ENERGY RESEARCH POWER INSTITUTE, NUREG/CR-7153, Vol. 1, ORNL/TM-

- 2013/532, Expanded Materials Degradation Assessment (EMDA), Volume 1: Executive Summary of EMDA Process and Results (2014)
- [57] ENERGY RESEARCH POWER INSTITUTE, NUREG/CR-7153, Vol. 3 ORNL/TM-2013/532, Expanded Materials Degradation Assessment (EMDA) Volume 3: Aging of Reactor Pressure Vessels (2014)
- [58] ENERGY RESEARCH POWER INSTITUTE, NUREG/CR-7153, Vol. 2, ORNL/TM-2013/532, Expanded Materials Degradation Assessment (EMDA), Volume 2: Aging of Core Internals and Piping Systems (2014)
- [59] ENERGY RESEARCH POWER INSTITUTE, NUREG/CR-7153, Vol. 5, ORNL/TM-2013/532, Expanded Materials, Degradation Assessment (EMDA), Volume 5: Aging of Cables and Cable Systems (2014)
- [60] U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, “Energy,” Part 50 (10 CFR 50), Office of the Federal Register (2013)
- [61] ASME, “Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components,” Section XI, Appendix, Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), American Society of Mechanical Engineers, New York (1995)
- [62] ADAMS Accession No. ML003740284, NRC, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, Regulatory Guide 1.99, Revision 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1988)
- [63] ENERGY RESEARCH POWER INSTITUTE, NUREG/CR-7153, Vol. 4, ORNL/TM-2013/532, Expanded Materials Degradation Assessment (EMDA), Volume 4: Aging of Concrete and Civil Structures (2014)

6 AUTOROVO CV

Ing. Robert Křivánek

Vzdělání:

1994-1996	KŠVS ČEZ Brno – kurz Beta pro řídicí personál jaderných elektráren
1992-1993	Sandwell College, Birmingham, UK, Finance, marketing and management, Diploma in international management
1988-1994	VUT Brno, fakulta strojní, katedra tepelné a jaderné stroje a zařízení, promován v červenci 1994, obdržel titul Ing., cena děkana za vynikající studijní výsledky

Pracovní zkušenosti:

2012 -	International Atomic Energy Agency (IAEA) Vídeň – projektový manažer pro dlouhodobý provoz jaderných elektráren
2007 – 2012	Vedoucí oddělení řízení životnosti a LTO pro jaderné elektrárny ČEZ Manažer projektu LTO jaderné elektrárny Dukovany
2001 - 2007	Vedoucí skupiny projektová báze pro jaderné elektrárny ČEZ
1994 - 2001	Operátor sekundárního okruhu a reaktoru jaderné elektrárny Dukovany

Publikační činnost:

- R. Krivanek, Long term operation of nuclear power plants – IAEA SALTO peer review service and its results, Nuclear Engineering and Design, NED8070, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.021>, (2014)
- R. Krivanek, A peer review for long term operation, Nuclear Engineering International, (July 2014)
- R. Krivanek, IAEA International Generic Ageing Lessons Learned Programme Phase 1 Results, Nuclear Engineering and Design, NED8185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.11.046>, (2015)
- R. Krivanek, Ageing: clarifying lessons learned, Nuclear Engineering International, (August 2015)
- R. Krivanek, R. Havel, Long term operation of nuclear power plants – IAEA SALTO missions observations and trends, Nuclear Engineering and Design, NED8805, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.021>, (2016)
- R. Krivanek, J. Fiedler, Main corrective measures in an early phase of nuclear power plants' preparation for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design, NED9185, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.03.002>, (2017)
- R. Krivanek, J. Fiedler, Main deficiencies and corrective measures of nuclear power plants in ageing management for safe long term operation, Nuclear Engineering and Design, NED9377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.07.035>, (2017)

7 ABSTRAKT

Cílem práce je analýza stavu připravenosti jaderných elektráren (JE) na dlouhodobý provoz (LTO z anglického Long Term Operation) na základě výsledků SALTO (Safety Aspects of Long Term Operation) peer review servisu IAEA, analýza nejvýznamnějších poruch, havárií a provozních zkušeností s reaktory typu PWR/VVER se zaměřením na případy způsobené stárnutím zařízení a identifikace hlavních staveb a komponent limitujících životnost elektráren s reaktory typu PWR/VVER a možných opatření pro zajištění jejich požadované životnosti.

Na základě výsledků SALTO peer review servisu IAEA byla provedena analýza hlavních nedostatků a opatření JE v připravenosti na bezpečný LTO se zaměřením na témata, jejichž hlubší znalost je důležitá pro budoucí přesnější určení technických faktorů limitujících životnost jaderných elektráren. Hlavní nedostatky a opatření ve fázi přípravy na prodloužení doby provozu a nejdůležitější technická nápravná opatření jsou shrnuty v kapitole 4.5 disertační práce. Samostatně jsou zde diskutovány hlavní nedostatky a nejdůležitější technická nápravná opatření v oblasti řízení stárnutí staveb a komponent.

Historie závažných poruch a provozních zkušeností elektráren s reaktory typu PWR/VVER z hlediska stárnutí staveb a komponent je analyzována v kapitole 6.2 disertační práce. Výsledkem je statistická analýza událostí spojených se stárnutím, přehled nejvýznamnějších poruch reaktorů PWR/VVER s vlivem na jejich životnost, statistický přehled a diskuze nejvýznamnějších degračních mechanismů a další důležité poznatky z historie závažných poruch a provozních zkušeností.

V kapitole 6.3 disertační práce je provedena analýza faktorů limitujících provoz jaderných elektráren s reaktory typu PWR/VVER se zaměřením na stavby a komponenty potencionálně limitující životnost elektráren s reaktory typu PWR/VVER a možná opatření pro zajištění jejich požadované životnosti.

Závěrem jsou shrnuty hlavní důvody odstavení JE (skutečné a potencionální) při provozu po dobu 40, 60 a 80 roků a opatření pro zajištění jejich požadované životnosti.

Abstract

The aim of the thesis is to analyze the state of preparedness of nuclear power plants (NPP) for long term operation (LTO) based on the IAEA SALTO (Safety Aspects of Long Term Operation) peer review service, analysis of the most significant failures, accidents and operational experience with type reactors PWR/VVER focusing on cases caused by equipment ageing and identification of major structures and components limiting life time of PWR/VVER-type nuclear power plants, and possible measures to ensure their required service life.

Based on the results of the IAEA SALTO peer review service, an analysis of the main deficiencies and measures of NPPs in preparation for a safe LTO was performed, focusing on topics whose deeper knowledge is important for the future more precise determination of technical factors limiting the lifetime of NPPs. The main deficiencies and measures in the preparatory phase for LTO and the most important technical measures are summarized in chapter 4.5 of doctoral thesis. The main deficiencies and the most important technical corrective measures in the area of ageing management of structures and components are discussed separately.

The history of major failures and operational experience of nuclear power plants with PWR/VVER reactors from the point of view of ageing of structures and components is analyzed in chapter 6.2 of doctoral thesis. The result is a statistic analysis of ageing-related events, an overview of the most significant PWR/VVER reactor failures with an impact on their service life, a statistical overview and discussion of the most important degradation mechanisms, and other important findings from the history of major failures and operational experience.

Chapter 6.3 of doctoral thesis analyzes factors limiting the operation of nuclear power plants with PWR/VVER reactors with focus on structures and components potentially limiting the life of PWR/VVER reactors and possible measures to ensure their required life.

In conclusion, the main reasons of permanent shut down of NPPs (actual and potential) for 40, 60 and 80 years of operation and the measures to ensure their required life are summarized.