

**Státní úřad  
pro jadernou bezpečnost**

**jaderná  
bezpečnost**

**DOPORUČENÍ**

**MONITOROVÁNÍ A PREDIKCE  
PROUDĚNÍM URYCHLENÉ  
KOROZE V JADERNÝCH  
ELEKTRÁRNÁCH TYPU VVER**

**SÚJB  
2010**

Jaderná bezpečnost  
**ŘÍZENÍ STÁRNUTÍ ZAŘÍZENÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN**  
Vydal: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2010  
Tisk:  
Účelová publikace bez jazykové úpravy

# OBSAH

<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>4</b>
DŮVOD VYDÁNÍ.....	4
CÍL .....	4
<b>2. ZKRATKY, POJMY, DEFINICE.....</b>	<b>5</b>
ZKRATKY.....	5
DEFINICE, POJMY.....	5
<b>3. PŘEDMĚT DOPORUČENÍ A OBLAST POUŽITÍ.....</b>	<b>6</b>
<b>4. ZÁKLADNÍ BODY ÚČINNÉHO MONITOROVACÍHO A PREDIKČNÍHO PROGRAMU FAC..</b>	<b>7</b>
<b>5. PRACOVNÍ POSTUPY A DOKUMENTACE.....</b>	<b>9</b>
5.1. ŘÍDÍCÍ DOKUMENTACE .....	9
5.2. PROVÁDĚCÍ POSTUPY .....	10
5.3. OSTATNÍ DOKUMENTACE .....	10
5.4. ZÁZNAMY O VÝMĚNÁCH KOMPONENT A POTRUBNÍCH ÚSEKŮ .....	11
<b>6. ZÁKLADNÍ ÚLOHY PŘI PLNĚNÍ MPP FAC .....</b>	<b>12</b>
6.1. IDENTIFIKACE POTENCIÁLNĚ NÁCHYLNÝCH SYSTÉMŮ A TRAS.....	12
6.1.1. <i>Potenciálně citlivé systémy</i> .....	12
6.1.2. <i>Systémy vyloučené z hodnocení</i> .....	13
6.2. PREDIKČNÍ ANALÝZA.....	14
6.3. VÝBĚR KOMPONENT K INSPEKČÍM.....	14
6.4. PŘÍPRAVA A PROVÁDĚNÍ INSPEKČÍ .....	16
6.4.1. <i>Inspekční techniky</i> .....	16
6.4.2. <i>Příprava měřicího místa</i> .....	17
6.4.3. <i>Značení sítě a měřících bodů</i> .....	18
6.4.4. <i>Měření tloušťky stěny UT metodou</i> .....	19
6.4.5. <i>Měření chemického složení materiálu komponent</i> .....	19
6.5. VYHODNOCENÍ INSPEKČÍ A STANOVENÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI .....	20
<b>7. SBĚR A ARCHIVACE VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH DAT .....</b>	<b>21</b>
7.1. ROZČLENĚNÍ DAT DO SKUPIN .....	21
7.2. ZPŮSOB ARCHIVACE DAT .....	22
<b>8. DLOUHODOBÁ STRATEGIE .....</b>	<b>23</b>
8.1. ODOLNÝ MATERIÁL .....	23
8.2. CHEMIE VODY .....	24
8.3. LOKÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ZMĚNY .....	24
<b>9. ZAJIŠTĚNÍ JAKOSTI .....</b>	<b>25</b>
<b>10. ZÁVĚR.....</b>	<b>26</b>
<b>11. REFERENCE .....</b>	<b>28</b>
<b>PŘÍLOHA 1: SCHÉMA PROGRAMU MONITOROVÁNÍ A PREDIKCE PROUDĚNÍM URYCHLENÉ KOROZE (MPP FAC).....</b>	<b>29</b>
<b>PŘÍLOHA 2: SYSTÉM DOKUMENTACE PRO MPP FAC .....</b>	<b>32</b>

# 1. ÚVOD

## **DŮVOD VYDÁNÍ**

Zákon č. 18/1997 Sb. „Atomový zákon“ v § 4 odst. 3 a 7 ukládá každému, kdo provádí činnosti související s využíváním jaderné energie

- postupovat tak, aby byla přednostně zajišťována jaderná bezpečnost,
- povinnost zavést systém jakosti způsobem a v rozsahu stanoveném vyhláškou SÚJB č. 132/2008 Sb.

„Atomový zákon“ dále každému držiteli povolení k provozu jaderného zařízení ukládá dle § 18 odst. 1 písm. a) povinnost sledovat, měřit, hodnotit, ověřovat a zaznamenávat veličiny, parametry a skutečnosti důležité z hlediska jaderné bezpečnosti v rozsahu stanoveném prováděcími předpisy.

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) je ústředním orgánem státní správy, který vykonává státní správu a dozor při využívání jaderné energie a ionizujícího záření, v oblasti radiační ochrany a v oblasti jaderné, chemické a biologické ochrany.

V rámci své pravomoci a působnosti, v souladu se zásadami činnosti správních orgánů a mezinárodní praxe, vydává bezpečnostní návody a doporučení, ve kterých dále rozpracovává požadavky jaderné bezpečnosti.

## **CÍL**

Cílem tohoto dokumentu je poskytnout návod a doporučení držitelům povolení k provozu jaderného zařízení (dále jen provozovateli) na provádění dlouhodobého monitorovacího programu u potrubí potenciálně citlivých k prouděním stimulované korozi u jaderných elektráren s bloky VVER. Výsledkem úspěšného zavedení programu by měla být minimalizace poškození důležitých komponent sekundárního okruhu a snížení pravděpodobnosti porušení integrity stěn tlakových potrubních systémů sekundárního okruhu včetně důsledků z tohoto faktu vyplývajících.

## 2. ZKRATKY, POJMY, DEFINICE

### ZKRATKY

<b>FAC</b>	Koroze zrychlená prouděním média (Flow Accelerated Corrosion)
<b>JE</b>	Jaderná elektrárna
<b>MPP</b>	Monitorovací a predikční program
<b>NT</b>	Nízkotlaký
<b>PG</b>	Parogenerátor
<b>S.O.</b>	Sekundární okruh
<b>SPP</b>	Separátor páry - přihřívač
<b>VT</b>	Vysokotlaký
<b>VVER</b>	Vodo-vodní energetický reaktor, patřící do skupiny tlakovodních reaktorů (PWR – Pressurized Water Reaktor)

### DEFINICE, POJMY

#### Degradace

Okamžité nebo postupné zhoršování charakteristik/vlastností komponenty/zařízení/systému, díky čemuž se tyto komponenty/zařízení/systém stávají pro další provoz nevyhovující. V případě postupné degradace časem nebo užíváním mluvíme o stárnutí.

#### Degradační mechanismus

Způsob (forma), jakým degradace probíhá.

#### Komponenta

Část potrubního segmentu definovaná svým tvarem.

#### Monitorovací a predikční program FAC

Soubor činností nezbytných pro zjištění a predikci stavu potrubních tras podléhajících účinkům prouděním urychlené koroze.

#### Ověřovací měření (inspekce)

Měření tloušťek stěn a event. chemického složení materiálů, prováděna na skupině potrubních komponent specifikované pro daný blok/rok za účelem zpřesnění stanovení rychlosti FAC a predikce zbytkové životnosti potrubního segmentu.

#### Predikce

Odhad/stanovení rychlosti zeslabení tloušťky stěny komponent vlivem prouděním urychlené koroze a celkového úbytku či tloušťky stěny těchto komponent k určitému datu, který se provádí na základě vzájemné korelace různých faktorů, jako jsou geometrický faktor, složení materiálu, chemie vody, podmínky toku atd.

### **Predikční analýza**

Posouzení potrubních komponent trasy z hlediska jejich náchylnosti k prouděním urychlené korozi. Analýza na trase, kde dosud neproběhlo inspekční měření tloušťek stěn a výsledky vycházejí pouze z provozních dat a teorie, se nazývá tzv. první predikční analýzou. Analýza trasy, kde již bylo na vybraných komponentách provedeno měření tloušťek stěny, se nazývá tzv. zpřesněnou predikční analýzou.

### **Prouděním urychlená koroze (FAC)**

Významný degradační mechanismus potrubních komponent sekundárních okruhů jaderných elektráren i v okruzích klasických elektráren. Je to proces, při kterém je ochranná oxidická vrstva na povrchu uhlíkatých nebo nízkolegovaných ocelí odstraňována prouděním vody nebo směsí voda-pára. Na holém povrchu potrubí pak dochází k reoxidaci a proces tak kontinuálně pokračuje.

### **Rychlost FAC**

Úbytek tloušťky stěny potrubní komponenty v mm/rok zapříčiněný prouděním urychlenou korozi.

### **Segment**

Soubor na sebe navazujících potrubních komponent, pro které platí shodné nebo velmi podobné provozní podmínky, jako jsou chemie média, množství toku, teplota, obsah vlhkosti (v případě dvoufázového média) atd..

## **3. PŘEDMĚT DOPORUČENÍ A OBLAST POUŽITÍ**

Poruchy sekundárních okruhů na jaderných elektrárnách typu VVER potvrzují, že hlavním komponentám této části jaderné elektrárny je nutné věnovat náležitou pozornost. Jedním z významných degradačních faktorů z hlediska integrity a zbytkové životnosti těchto komponent je prouděním urychlená koroze (FAC). Vhodný způsob řešení problematiky prouděním urychlené koroze je zavedení a provádění dlouhodobého monitorovacího programu, jenž je souborem činností nezbytných pro zjištění a predikci stavu potrubních tras podléhajících prouděním urychlené korozi a následných opatření vedoucích k minimalizaci, popř. úplnému vyloučení poškození důležitých komponent sekundárního okruhu tímto typem koroze.

Koroze vnitřních stěn tlakových potrubních systémů je urychlována prouděním média – vodou nebo vlhkou párou. Tento korozní mechanismus, který je nazýván prouděním stimulovanou korozi (někdy nesprávně také erozní korozi), je jedním z hlavních degradačních mechanismů potrubních komponent sekundárních okruhů jaderných elektráren tlakovodního typu a závisí na spolupůsobení několika důležitých parametrů, jakými jsou např. chemie vody, materiálové složení a hydrodynamika. Dopady tohoto typu poškozování mají nepříznivé bezpečnostní a ekonomické důsledky. Na provozovaném potrubí nebo potrubní komponentě dochází vlivem působení erozně korozního mechanismu k úbytku materiálu, čímž vzniká

oblast zeslabení stěny potrubní komponenty, která může mít rozsah od jednotek do mnoha desítek procent návrhové tloušťky stěny potrubní komponenty.

Přesto, že se při konstrukci a výpočtech potrubních systémů uvažuje s tímto druhem poškození, nelze považovat problematiku erozně korozního poškození za uzavřenou. Ve většině případů nedochází k okamžitému porušení tlakového rozhraní, ale poškození probíhá pozvolna a odolnost proti ztrátě integrity se snižuje. Ke ztrátě integrity dochází až po několika letech bezchybného provozu, často při malé změně provozních parametrů. V důsledku účinků prouděním urychlené koroze došlo při provozu jaderných elektráren k řadě porušení potrubí významných z hlediska jaderné bezpečnosti, jako jsou například potrubí páry a napájecí vody.

Snaha o minimalizaci případů, kdy dochází k poškození potrubí prouděním urychlenou korozi na jaderných elektrárnách, je kombinací dvou přístupů.

Za prvé dosažení takové kombinace provozních parametrů, která vyloučí nebo významně potlačí vznik prouděním urychlené koroze. To je možné zejména u nově budovaných elektráren nebo tam, kde dochází k systémové změně umožňující změnu těchto parametrů. Takovou změnou může být například změna materiálu teplosměnných ploch tepelných výměníků nebo kondenzátorů a s ní spojená změna chemického režimu chladicího média, nebo výměna potrubní trasy s respektováním požadavků prevence prouděním urychlené koroze a zvolení vhodného materiálu u nového potrubí.

Za druhé zavedením systémových opatření, spočívajících v systematické monitorovací činnosti, spolehlivé predikci poškození a implementaci všech dosažitelných provozních zkušeností do hodnocení stavu vybraných tras. Cílem druhého přístupu je s dostatečným předstihem eliminovat možnost výskytu defektu, který by mohl vést k porušení tlakového rozhraní potrubního systému.

## 4. ZÁKLADNÍ BODY ÚČINNÉHO MONITOROVACÍHO A PREDIKČNÍHO PROGRAMU FAC

Mezi hlavní body účinného programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze patří:

- **Podpora provozovatele**, tzn. poskytnutí nezbytných finančních zdrojů na zajištění všech potřebných úkolů; určení pravomocí, patřičnou kvalifikaci školení pracovníků; zajištění potřebné komunikace a nezbytného sdílení dat a informací mezi příslušnými odděleními; zajištění průběžného sledování zkušeností s FAC i mimo vlastní elektrárnu; rozvoj a provádění dlouhodobých plánů vedoucích ke snížení poškození vlivem FAC; zajištění požadované kvality, která spočívá i v přípravě a dokumentaci postupů potřebných úkonů a provádění periodických nezávislých kontrolních hodnocení všech programů monitorování a predikce FAC; zajištění, že všechny postupy, analýzy, prediktivní modely a dokumentace jsou průběžně aktualizovány a závěrečné zprávy z odstávek jsou předkládány včas.

- **Analýzy**; V typické jaderné elektrárně existuje několik tisíc komponent, které jsou potenciálně náchylné k FAC. Bez přesných a důkladných analýz FAC, isometrických výkresů, databáze potrubí, včetně inspekci a historie výměn existuje pouze jediný způsob, jak zabránit únikům média a lomům potrubí – inspektovat každou potenciálně náchylnou komponentu během každé odstávky, což by byl ekonomicky značně náročný inspekční program. Základním cílem FAC analýz je identifikovat nejvíce náchylné komponenty a zredukovat tak počet inspekčních kontrol. Vzorek komponent k inspekci by měl být vybrán tak, aby obsahoval nejvíce náchylné komponenty a zajistil dostatečnou přesnost modelu. V úvahu je třeba vzít lokální podmínky, stáří a historii elektrárny/bloku, tloušťku stěny a rozměry potrubí, materiál, délku palivového cyklu a dosavadní průmyslové zkušenosti. Pro každou potrubní komponentu by mělo být analytickou metodou odhadnuto, jaká je míra jejího opotřebení, kdy by měla být komponenta znovu zkontrolována, opravena nebo vyměněna. Analytický model může být dále využit k dalším studiím sloužícím ke snižování nákladů, jako jsou např. změny chemie vody, změny materiálů, zvyšování výkonu, designové změny atd. Analytický model může také být silným nástrojem při vývoji dlouhodobého plánu inspekci, oprav a výměn. *Dobrymi a v praxi prověřenými analytickými nástroji jsou např. počítačové kódy CHECWORKS (EPRI), BRT-CICERO (EdF), COMSY (AREVA). V současné době připravuje svůj analytický model RAMEK také ruský ENERGOATOM.*
- **Provozní zkušenosti**; Zkoumání a začlenění provozních zkušeností do programu monitorování FAC je velmi cenným doplňkem analýz a souvisejících kontrol, zejména při identifikaci problémových oblastí, k pochopení příčin rozdílů míry poškození u některých podobných komponent, porozumění důsledkům FAC při změnách chemie vody, navýšení výkonu atd., sdílení informací o nákladech, materiálech, kvalitě dodavatelů, technice oprav a výměn, kontrolních postupech, nových přístrojích atd. *Velmi cenným přínosem v tomto směru je např. skupina CHUG při EPRI, která se problematikou FAC dlouhodobě zabývá a sdružuje velký počet provozovatelů elektráren. Doporučit lze také pravidelné konference FAC pořádané EdF nebo workshopy, které připravuje IAEA.*
- **Inspekce**; Přesnost kontrol je základem efektivního monitorovacího a predikčního programu prouděním urychlené koroze. Měření tloušťek stěn určuje rozsah poškození komponent, poskytuje údaje potřebné k určení trendu zeslabení vlivem prouděním urychlené koroze a zároveň data vedoucí k vylepšení predikčního modelu. Důkladná a přesná prohlídka několika komponent je pro program monitorování a predikce FAC mnohem prospěšnější než jen zběžná kontrola velkého počtu komponent. Dosavadní praxe nedoporučuje zaznamenávání pouze jedné minimální tloušťky zjištěné na komponentě, ale mnohem více je doporučován systematický sběr dat, který umožní opakovatelnost měření a dává prostor k určení výsledných trendů.
- **Školení a inženýrský úsudek**; Pravidelné školení příslušných zaměstnanců je nezbytným předpokladem pro úspěšný monitorovací a predikční program. Provádění správných technických rozhodnutí, od modelování až po hodnocení inspekčních dat je nedílnou složkou MPP. Je proto důležité, aby pracovníci, kteří se podílejí na programu, byli znalí provozních zkušeností, byli řádně kvalifikováni ve svých oborech, vyškoleni v problematice FAC a uměli zpracovat i potřebné vstupní informace od jiných útvarů, jako např. o chemii vody, údržbě, provozu, tepelné výkonnosti atd. Je však nutno podotknout, že ačkoli znalosti a inženýrský úsudek jsou důležitou složkou úspěšného MPP, nemohou nahradit potřebné analýzy a kontroly.



Všechny složky jsou vzájemně provázané a měly by být používány společně, nikoliv jako náhrada jedné za druhou.

- **Dlouhodobá strategie**; Dalším bodem úspěchu v programu monitorování a predikce FAC je vytvoření a realizace dlouhodobého strategického plánu, který by měl být zaměřen na snižování rychlosti FAC a inspekce nejvíce ohrožených lokalit. Monitorování komponent je rozhodující pro předcházení poruch, ale bez úsilí o snižování rychlosti opotřebením vlivem FAC by časem, s narůstajícím počtem provozních hodin, bylo nutné počet inspekčních kontrol zvýšit z důvodu zvýšeného opotřebením. Stejně jako by s narůstající provozní dobou bylo nutno zvyšovat počet oprav a výměn z důvodů narůstající pravděpodobnosti možných prasknutí a následných úniků média.

## 5. PRACOVNÍ POSTUPY A DOKUMENTACE

Doporučuje se vypracovat komplexní soubor postupů, ve kterých je definováno zavedení programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze v elektrárně, určení zodpovědnosti, provádění kontrol, hodnocení a další. Všechny tyto postupy jsou kontrolovány a dokumentovány.

### 5.1. ŘÍDÍCÍ DOKUMENTACE

Součástí této dokumentace by měl být definován celý program a určeny jednotlivé zodpovědnosti. Obsaženy by také měly být:

- vůle zabývat se dlouhodobými aspekty prevence prouděním urychlené koroze a vytvořit prostředí pro zavedení MPP, včetně organizačních a finančních opatření
- určení úkolů, které mají být provedeny (včetně prováděcích postupů) a související povinnosti
- definice základní odpovědnosti za provádění programu monitorování a predikce FAC, pravomoci pracovníků odpovědných za provádění programu a jejich organizační vazby na pracovníky údržby a další útvary, kterým vzniknou z připravených pracovních postupů povinnosti vůči MPP
- požadavky zajištění jakosti
- určení dlouhodobých cílů a strategie vedoucích ke snížení míry opotřebením vlivem prouděním urychlené koroze

Dokumentace musí být pravidelně revidována a aktualizována tak, aby v ní byly zachyceny:

- organizační změny a změny zodpovědnosti
- změny norem, zákonů a licenčních požadavků

## **5.2. PROVÁDĚCÍ POSTUPY**

Prováděcí pracovní postupy by měly být vypracovány pro každý konkrétní úkol v rámci programu monitorování a predikce FAC, nejméně však pro tento rozsah činností:

- identifikaci systémů náchylných k prouděním urychlené korozi
- provádění FAC analýzy
- výběr komponent a sestavení plánu inspekcí
- příprava a provádění inspekcí
- postup pro stanovení obsahu legujících prvků v materiálu potrubí, pokud se provádí
- vyhodnocení inspekčních dat
- hodnocení poškozených komponent
- oprava a výměna komponent či potrubních úseků, pokud to je nutné
- vyhotovení (aktualizace) plánu dalších inspekcí v příštích odstávkách

Pracovní postupy a návody musí být rovněž pravidelně revidovány a aktualizovány tak, aby reagovaly na individuální nebo organizační změny a zodpovědnosti, na změnu norem, zákonů a licenčních požadavků a vývoj nových poznatků a technologií.

## **5.3. OSTATNÍ DOKUMENTACE**

Vstupní data musí být dokumentována nejméně v rozsahu:

- axonometrické výkresy modelovaných, resp. měřených potrubních tras
- termo- a hydrodynamické veličiny popisující stav média (rychlost/množství toku, drsnost povrchu potrubí, kvalita (vlhkost) páry)
- enviromentální veličiny (teplota, pH, použité aminy)
- geometrie komponent

- materiálové parametry potrubí (druh oceli, chemické složení, mechanické vlastnosti)
- rozměrové parametry potrubí

Veškeré rozhodnutí, výsledky, protokoly měření by měly být archivovány. Dokumentace by měla navíc obsahovat citlivostní analýzu, predikční model a v neposlední řadě hodnotící zprávu z každé provozní odstávky, která bude obsahovat seznam inspektovaných komponent a zdůvodnění jejich výběru (náchylnost k prouděním urychlené korozi, provozní zkušenosti, inženýrský úsudek, trendy zeslabení atd.), výsledky inspekci, hodnocení a doporučení pro další provoz nebo doporučení k opravě či výměně.

Citlivostní analýza by měla být periodicky aktualizována a měla by zahrnovat:

- změny v systémech sekundárního okruhu včetně nastavení ventilů
- designové změny na trasách a změny materiálu potrubních komponent
- změny související se změnami výkonu výrobního bloku (teplota, tlak, průtok, entalpie)
- změny související s případnou netěsností ventilů a s úniky páry
- získané provozní zkušenosti

Aktualizace predikčního modelu by měla být provedena po každé provozní odstávce a měla by zahrnovat:

- výsledky inspekci provedené během poslední odstávky
- výměny komponent
- chemii vody, provozní podmínky, změny geometrie (design) a změny výkonu výrobního bloku

Rovněž je doporučováno, aby citlivostní analýza, predikční model, výběr inspekčních lokalit, hodnocení komponent, hodnotící zpráva z odstávky a veškerá další dokumentace související s hodnocením prošla nezávislou kontrolou.

#### **5.4. ZÁZNAMY O VÝMĚNÁCH KOMPONENT A POTRUBNÍCH ÚSEKŮ**

Z hlediska hodnocení jsou velmi důležité záznamy o výměnách komponent, které byly v minulosti provedeny, neboť predikce míry opotřebení i zbytkové životnosti souvisí s datem, kdy byla komponenta dána do provozu a s počtem provozních hodin. Informace o těchto výměnách by měly být zahrnuty do predikčního modelu a pokud možno také vyznačeny na

isometrických výkresech používaných pro potřeby monitorovacího a predikčního programu prouděním urychlené koroze.

## **6. ZÁKLADNÍ ÚLOHY PŘI PLNĚNÍ MPP FAC**

### **6.1. IDENTIFIKACE POTENCIÁLNĚ NÁCHYLNÝCH SYSTÉMŮ A TRAS**

#### **6.1.1. Potenciálně citlivé systémy**

Na základě přijatých kritérií je potřebné určit, které systémy je nutné považovat za citlivé k prouděním stimulované korozi a vést seznam těchto systémů. Určení těchto systémů vychází z následujících podkladů:

- zkušenost provozovatele doložená záznamy. Provozovatel vede záznamy o všech událostech, které mohou mít vztah k prouděním stimulované korozi. Za tyto události je nutné pokládat zejména
  - všechny případy úniků média v důsledku FAC,
  - všechny případy porušení komponent v důsledku FAC,
  - všechna naměřená zeslabení komponent, kde je tloušťka stěny menší než 70 % nominální tloušťky stěny komponenty,
  - známé zkušenosti s poškozením vlivem FAC nebo významným ztenčením tloušťky stěny potrubí z jiných elektráren typu VVER, provozovaných za analogických podmínek, zejména chemického režimu vody v sekundárním okruhu a zkušenosti jiných provozovatelů.
- z hlediska zkušeností s výskytem prouděním urychlené koroze na systémech sekundárního okruhu lze za potenciálně nejcitlivější považovat systémy:
  - napájecí vody
  - odběrů turbogenerátoru, zejména z VT dílu
  - vytápění separátorů páry-přihřívače
  - nízkoteplotní a vysokoteplotní regenerace
  - separátoru vlhkosti a předeřevu páry
  - potrubí odvodnění nízkotlakých a vysokotlakých ohříváků

- odluhů parogenerátorů
  - kondenzátní vody
- z hlediska bezpečnosti a důsledků případného porušení integrity komponent na jejich okolí to jsou především:
- potrubí napájecí vody
  - potrubí ostré páry
  - potrubí VT odběrů

### 6.1.2. Systémy vyloučené z hodnocení

Některé systémy nebo jejich části lze z dalšího hodnocení vyloučit z důvodu jejich relativně nízké náchylnosti k prouděním urychlené korozi. Na základě množství laboratorních dat a provozních zkušeností lze z hodnocení vyloučit:

- *systemy nebo jejich části, které jsou vyrobeny z nerezové nebo nízkolegované oceli s minimálním obsahem 1.25% Cr.* Vyjmout z hodnocení lze však pouze trasy, kde z takto odolného materiálu vůči prouděním urychlené korozi jsou vyrobeny všechny potrubní komponenty. Pokud se na trase nacházejí některé komponenty, které jsou z uhlíkaté oceli, potom nemohou být z hodnocení vyjmuty, ale naopak, jsou považovány za vysoce náchylné a musí být analyzovány. Hrozí zde totiž nebezpečí tzv. „entrance efektu“, kdy komponenty z méně odolného materiálu, které se nacházejí ve směru toku za komponentami z vysoce odolného materiálu, podléhají vlivům prouděním urychlené koroze ve zvýšené míře. Nutné je také upozornit na to, že materiály s vysokým obsahem chrómu, které jsou odolné vůči prouděním urychlené korozi, mohou být náchylné k jiným druhům poškození, jako je např. kavitace nebo eroze způsobená nárazem kapalných částic (*liquid impingement erosion*). Pokud tedy není mechanismus poškození jasně identifikován, vyměněné komponenty by měly zůstat v monitorovacím a inspekčním programu;
- *systemy, kde podíl kapalné složky ve dvoufázovém médiu je nižší než 0.01%, tj. trasy s přehřátou párou.* Nicméně některé dosavadní zkušenosti ukazují, že v některých systémech s přehřátou párou se za určitých okolností, mimo běžných provozních podmínek nebo při sníženém výkonu, může vyskytnout zvýšený obsah vlhkosti a proto by jistý rozsah monitorování měl být zachován;
- *systemy nebo jejich části s tokem jednofázového média, kde je teplota nižší než 90°C.* Je nutné však upozornit, že v těchto systémech se mohou vyskytnout jiné druhy poškození, jako je např. kavitace;
- *systemy nebo jejich části bez toku média nebo které pracují méně než 2% provozního času elektrárny.*

S výjimkou systému z materiálu s vysokým obsahem chrómu nelze zcela určit prahové hodnoty pro vyloučení vzniku prouděním urychlené koroze, ale většinou vzájemnou kombinací přispívají k významnému zeslabení jejího vlivu. Rozhodnutí o vyjmutí systému nebo jeho části z inspekčního programu by proto mělo být podloženo kvalifikovaným posouzením ze všech uvedených hledisek a být součástí základního dokumentu pro hodnocení prouděním urychlené koroze na elektrárně.

Systémy nebo jejich části by neměly být z hodnocení vyjmuty pouze na základě nízkého tlaku. Tlak nemá vliv na působení prouděním urychlené koroze, má pouze vliv na úroveň, kdy by mohlo dojít k poškození. Poškození v nízkotlakých systémech může mít velice významné důsledky pro provoz.

Systémy nebo jejich části, které byly vyřazeny z hodnocení na základě výše popsaných kritérií, jsou méně náchylné vůči působení FAC, nelze však u nich vyloučit jiné korozní a degradační mechanismy, mezi které patří např. kavitace, eroze srážkou kapalných částic (*liquid impingement erosion*), korozní praskání (*stress corrosion cracking – SCC*) nebo eroze pevnými částicemi (*solid particle erosion*). Tyto degradační mechanismy však nejsou součástí programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze a tohoto dokumentu a musí být hodnoceny odděleně.

## **6.2. PREDIKČNÍ ANALÝZA**

Efektivní program opatření proti prouděním urychlené korozi musí být postaven na schopnosti predikovat zeslabení v částech sekundárního okruhu na delší období provozu. Provozovatel jaderné elektrárny musí mít k dispozici způsob, jak odhadnout vývoj FAC degradace, resp. čerpání životnosti komponent. Na základě této predikce jsou určována opatření, tj. měření, výměna nebo oprava komponent s vyčerpanou životností a celková strategie postupu ve vztahu k provozním podmínkám.

K provedení takovéto predikce je možné vytvořit výpočtový model pro konkrétní systém sekundárního okruhu elektrárny, u kterého bude popsán způsob provedení analýzy s určením rozsahu parametrů potřebných pro analýzu, citlivost modelu a způsob, jak byly jednotlivé hodnoty parametrů získány. Dále pak způsob, jak je model podpořen experimentálním hodnocením při parametrech analogických provozním parametrům komponent a materiálů sekundárního okruhu, jak jsou do modelu vložena data z inspekci, a jak tato data vylepšují model a způsob ověření modelu.

Jiným a patrně výhodnějším způsobem je použití již ověřeného počítačového programu pro predikci poškození jako je např. CHECWORKS, BRT-CICERO nebo COMSY, jež jsou využívány na celé řadě elektráren ve světě a existuje dobrá korelace mezi výsledky predikce a měřeními na konkrétních komponentách.

## **6.3. VÝBĚR KOMPONENT K INSPEKČÍM**

Inspekcemi rozumíme měření tloušťky stěny potrubní komponenty pomocí nedestruktivní metody (např. ultrazvuku) na síti bodů pokrývajících její povrch.

Výběr inspekčních míst by měl splňovat tyto základní požadavky:

- ve výběru musí být zastoupeny komponenty ze všech systémů sekundárního okruhu, které byly určeny jako citlivé k erozní korozi
- výběr musí být dostatečně objektivizován. Jako zdroj informací k výběru komponent slouží:
  - modelování ověřeným počítačovým programem (CHECWORKS, BRT-CICERO, COMSY) nebo predikce podle vlastního, nezávisle ověřeného modelu. Tímto způsobem je vybráno přibližně 50 - 70 % komponent výběru.
  - zkušenosti provozovatele se systémem, zejména s již indikovanými zeslabeními, úniky média nebo lomy komponent. Vychází z dokumentace zkušeností, která je vedena provozovatelem. Tímto způsobem je vybráno přibližně 20 - 30 % komponent výběru.
  - inženýrský úsudek. I když jde o nejméně objektivní metodu, její zařazení je vhodné, protože zohledňuje veškeré podmínky provozu. Tímto způsobem by nemělo být vybráno víc než 10 % komponent pro inspekce.
- ve výběru by měly být zastoupeny všechny geometrie komponent, které se vyskytují v posuzovaných systémech
- do výběrových kritérií by měly být zahrnuty také zkušenosti jiných provozovatelů, zejména z analogických jaderných elektráren. Dále je nutné definovat způsob, jak tuto informaci zahrnout do procesu rozhodování.
- pro výběr komponent je potřebné připravit podrobná kritéria, která budou zohledňovat:
  - nutnost potřeby měření těch komponent, které leží na podobných trasách v místech s již prokázanou degradací vlivem prouděním urychlené koroze,
  - celkový počet komponent kontrolovaných v odstávce. Provozovatel zdůvodní počet vybraných komponent na základě stavu systému, existence výchozích dat, zkušeností a doporučení,
  - v jakém vztahu je měření na poškozené, respektive vyměněné komponentě k sousedním komponentám.

Počet měření na jedné potrubní trase by neměl být menší než 25% všech komponent trasy, nejméně však 5 komponent, pro trasy:

- s dvoufázovým médiem
- s tlakem vyšším než 3 MPa, byl-li potvrzen predikovaný výskyt FAC měřeními na komponentách této trasy, zejména na trasách napájecí vody, ostré páry a odběrů
- s pozitivním záznamem výskytu porušení integrity z důvodu FAC.

U všech ostatních potrubních tras vybraných pro Monitorovací a predikční program by minimální počet měření na trasu neměl být nižší než 15% všech komponent trasy, nejméně však 4 komponenty. Trasou se rozumí část potrubí sekundárního okruhu se stejnými provozními podmínkami (teplota, tlak, entalpie, vlhkost páry).

Při výběru komponent k inspekcím je také nezbytné brát na zřetel, zda se jedná:

- o poprvé měřené trasy
- o trasy s opakovaným měřením
- o trasy s neznámými nebo nepřesně definovanými provozními podmínkami.

## **6.4. PŘÍPRAVA A PROVÁDĚNÍ INSPEKČÍ**

Rozsah měření na komponentě by měl být definován tak, aby bylo možné:

- přijmout rozhodnutí, je-li komponenta schopna dalšího provozu, případně jak dlouho je schopná provozu do vyčerpání životnosti (dosažení akceptovatelné tloušťky),
- vylepšení predikčního modelu buď ve formě počítačového programu, nebo jiného schváleného postupu.

Měření tlouštěk stěn je rutinním procesem a změření značného množství bodů v síti může vést k výskytu chyb, které se projeví, podle doposud získaných zkušeností, významnými odchylkami. Pokud by tyto odchylky nebyly vyloučeny, vnesly by do hodnocení a následně do změněného modelu hrubou chybu, která vždy ovlivní predikce poškození neměřených komponent. S ohledem k charakteru těchto chyb jde většinou o vyšší míru konservatismu než je nutné a důsledkem pak je větší počet kontrol během dalších odstávek. Hrubé chyby lze eliminovat přímo, malé rozdíly v naměřených hodnotách musí být vyhodnoceny statistickými metodami.

Některé druhy komponent, jako jsou např. T-kusy, příruby, kolena a ohyby, mají nerovnoměrnou tloušťku stěny z důvodů výrobní technologie, např. ovality. Navržené postupy proto musí respektovat i eliminaci těchto rozdílů a to tak, aby nemohly vnést do hodnocení významnou míru konzervatismu.

### **6.4.1. Inspekční techniky**

Inspekci potrubních komponent lze provádět použitím ultrazvukové techniky (UT), radiografie (RT) nebo vizuálním pozorováním. Ultrazvuková technika i radiografická metoda mohou být použity při stanovení míry poškození, ale UT metoda poskytuje kompletnější data při hodnocení zůstatkové tloušťky potrubí větších průměrů. Radiografická metoda se naopak více využívá při hodnocení potrubí malých průměrů (do průměru 50 mm) a také svarů,



komponent s nerovnoměrným povrchem, jako jsou např. ventily nebo průtokové trysky a nátrubky. Další výhodou RT metody je široké pokrytí a poskytnutí vizuálních informací o ztenčení stěny komponenty. Navíc lze RT metodu použít i za provozu, bez nutnosti odstranění izolace. Ačkoliv RT metoda na jedné straně může přinést úspory nákladů i času na provádění inspekce, na straně druhé může zase tyto náklady zvýšit a čas odstávky prodloužit díky komplikacím při plnění jiných úkolů z důvodu radiačních požadavků a bezpečnosti pracovníků. Proto se v naprosté většině případů při inspekčních prohlídkách používá měření UT metodou spojené s elektronickým záznamem dat.

Vizuální kontroly se nejčastěji používají při prohlídkách ventilů a jiných armatur a také při kontrolách potrubí velmi velkých průměrů (např. 900-1500 mm), jako je např. potrubí páry vedoucí z vysokotlaké části turbíny do separátorů páry-přihříváčů a dále pak z těchto přihříváčů do nízkotlaké části turbíny. Tyto vizuální kontroly se provádějí zevnitř potrubí. Doplňkově, při podezření na větší úbytky tloušťky stěny potrubí, se pak provádí měření ultrazvukem, kdy je možno měřit jak vně, tak i zevnitř potrubí.

Inspekční proces UT metodou spočívá v měření tloušťky stěny komponenty v průsečkových bodech měřicí sítě, která je nanesena na komponentě. Pokud získaná data naznačují významné ztenčování, měla by být měřicí síť v dané lokalitě zmenšena (zkrácena vzdálenost mezi průsečíky sítě) a měření provedeno tak, aby byl identifikován rozsah a hloubka defektu.

Získaná inspekční data jsou dále využita třemi způsoby:

1. k zjištění, zda u komponenty dochází k opotřebení a k určení lokality, kde k tomuto zeslabení dochází v největší míře,
2. k zjištění rozsahu a hloubky zeslabení,
3. k zjištění rychlosti a trendu zeslabování.

#### **6.4.2. Příprava měřicího místa**

Příprava měřicího místa sestává z odizolování komponenty, jejího základního očištění, nanesení pracovní sítě, vybroušení ploch pracovní sítě do požadované kvality a konečného označení měřících bodů.

Rozsah sejmutí izolace se liší dle tvaru komponenty. U rozměrově dlouhých přímých částí musí být odhalena část v délce minimálně dvou průměrů potrubí, u krátkých přímých částí se provádí odizolování celého přímého úseku. V případě, že se na začátku přímé části nachází svar (pro krátké přímé části též na konci komponenty), musí být odhaleno i okolí tohoto svaru tak, aby k němu byl dobrý přístup z obou stran. Pravidlo o přístupnosti ke svarům platí také pro ostatní tvary potrubí (kolena, t-kusy, atd.). Kolena a ohyby je třeba odizolovat od začátku zaoblení po jeho konec. Potrubí ve tvaru T musí být odizolována v rozměru dvou průměrů potrubí na každou stranu od osy odbočky. Pro redukce a expanze platí totéž, co pro přímé části. Plocha měřené komponenty se očistí vhodným způsobem od hrubých nečistot, např. prachu, barvy, rzi, zbytků skelné vaty, atd.

Na očištěný povrch se nanese pracovní síť pro vyznačení měřících bodů. Pro rozměření pracovní sítě se použijí speciální šablony ve tvaru pásky s vyznačenými body ve vzdálenosti 1/12 obvodu potrubí. K vyznačení se použije psací prostředek, který je na daném podkladu dobře viditelný. Pokud je síť nanášena na část potrubí bez povrchových nerovností a znečištění (např. nová, vyměněná část potrubí), není třeba tento úsek mechanicky čistit a místo pracovní sítě se nanáší přímo konečná měřící síť.

Kvalita povrchu kontrolovaného místa je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících přesnost měření tloušťky. Vyznačené průsečíky ortogonální pracovní sítě (křížky označená místa) se mechanicky očistí tak, aby byly z plochy cca 2x2 cm každého průsečíku odstraněny nerovnosti způsobené povrchovou korozí, usazeninami či jinými nečistotami, popř. nánosem barvy. Povrch není nutné čistit na úroveň neoxidovaného (vyleštěného) kovu, ale jen do stavu, který zajistí dostatečnou akustickou vazbu mezi měřící sondou a ultrazvukovým přístrojem a přitom nebude zbytečně odebírán základní materiál potrubí.

### **6.4.3. Značení sítě a měřících bodů**

Konečná měřící síť se vyznačuje na upravený povrch do středu očištěných ploch a jednotlivé měřící body mají tvar křížků. Síť se nanáší permanentní teplovzdornou a otěruvzdornou barvou prostřednictvím fixu (např. PaintMarker). Je důležité dbát na dostatečnou viditelnost a čitelnost zaznačených křížků, neboť vyznačený rastr by měl na potrubí zůstat zachován i pro opakované inspekce. V případě opakovaného měření na komponentě je nezbytné použít stejnou síť, co se týče rozměrů, polohy a orientace. Zvláštní důraz je potřebné přitom dát na správnou orientaci sítě, neboť pootočení sítě by znemožnilo použití srovnávací metody.

Pokud je měření na komponentě prováděno opakovaně a nedosahuje-li kvalita povrchu již v minulosti měřeného místa požadovaných parametrů, dočišťuje se povrch do požadované kvality buď pomocí ocelového kartáče, jemným brusným papírem nebo elektrickou bruskou s leštícím kotoučem. Dočištění se provádí velmi šetrně a vždy jen do stavu, který zabezpečí kvalitní vazbu mezi sondou a tloušťkoměrem tak, aby se zamezilo dalšímu neopodstatněnému odebírání základního materiálu potrubí. Je také nutné dbát na synchronizaci původní poškozené a nové opravené sítě pro zajištění porovnatelnosti měřených bodů.

Dosavadní zkušenosti ukazují, že je velmi obtížné předpovědět, ve kterém místě na komponentě se projeví největší zeslabení. Aby bylo zajištěno, že lokalita s největší mírou opotřebení bude detekována, musí měřící síť plně pokrýt inspektovanou tvarovou komponentu (kolena, t-kusy, expanze, redukce atd.). Plně pokrývající síť je také dobrým základem budoucí inspekce a hodnocení komponenty. U přímých částí je doporučeno nanést měřící síť nejméně do vzdálenosti tří průměrů potrubí za tvarovou komponentou nebo svarem.

#### 6.4.4. Měření tloušťky stěny UT metodou

Měření na potrubích ultrazvukovou metodou se provádí zařízením, které splňuje následující požadavky:

- parametry ultrazvukového přístroje a příslušenství umožňují měření s citlivostí nejméně 3% při měřených tloušťkách v rozmezí 5 - 20 mm a s citlivostí lepší než 10% při tloušťkách pod 2 mm.
- je kalibrováno pro měření. Kalibrace se provádí pravidelně před zahájením a ukončením měření tak, aby se zabránilo chybám měření způsobených nesprávným nastavením přístroje.
- má možnost automatického ukládání dat do interní paměti a následného exportu naměřených dat v patřičného formátu do počítače.
- je k dispozici nejméně ve dvou exemplářích z důvodu zamezení výpadku sběru dat z důvodu poruchy.

Měření se provádí v definované a předem připravené síti. Měření začíná v bodě, popsaném jako „počátek souřadné soustavy“, a pokračuje po povrchkách ve směru toku a obvodových kružnicích ve směru hodinových ručiček, tj. po vyčerpání všech bodů povrchky pokračuje měření na další povrchce ve zmíněném směru.

Pracovníci provádějící měření mají pro každou komponentu k dispozici tzv. signální hodnotu tloušťky. Jestliže je změřená tloušťka menší než signální (nebo významně se jí blíží) v jednom nebo několika bodech, upozorní na to příslušného zodpovědného pracovníka. Taková komponenta nesmí být znovu zaizolována, dokud není přijato rozhodnutí o jejím dalším provozu. V každém případě se při výskytu této okolnosti přistoupí k podrobnému měření okolí bodu s tloušťkou menší než signální. Toto měření se provede rastrovým snímáním tloušťky. Data z tohoto doplňkového měření jsou zapsána do zvláštního souboru. Po každém měření jsou naměřená data hodnocena na přítomnost významných odchylek jak ve směru větších, tak menších tlouštěk. V případě podezření na výskyt hrubé chyby měření je měření v daném místě zopakováno.

#### 6.4.5. Měření chemického složení materiálu komponent

Je doporučováno spolu s inspekčním měřením tloušťky stěny komponent provádět současně i měření obsahu legujících prvků v materiálu, zejména pak chromu, mědi a molybdenu. Tyto prvky mají významný vliv na rychlost prouděním urychlené koroze a tudíž i vliv na přesnost predikce.

Bez znalosti složení je nutno ve výpočtu použít nejnižší obsah těchto prvků, který je pro danou ocel garantován normou a může být i nulový. To pak vede ke značně konzervativním výsledkům. Je proto vhodné využít přístupu k volnému povrchu komponent v průběhu měření tloušťky stěny a změřit (při prvním měření na komponentě) také její chemické složení. Jako vhodné se ukazuje použití emisní spektroskopie z odjiskřeného povrchu komponenty nebo použití rentgenofluoresenčního (XRF) analyzátoru.

Povrch musí být očištěn od veškerých oxidů a mastnoty. Před samotným měřením je třeba vyzkoušet správné nastavení přístroje na kontrolních vzorcích a v případě neshody provést re-kalibraci, která zajistí dosažení správných výsledků. Měření se provádí na každé části potrubí oddělené svary, tedy např. na segmentových kolenech se zjistí složení na všech jednotlivých segmentech. Měření každé části se skládá ze tří odběrů, přičemž výsledný obsah jednotlivých prvků je průměrem z těchto tří odběrů. K provedení měření se pořizuje náčrt a zápis o provedeném měření.

## **6.5. VYHODNOCENÍ INSPEKČÍ A STANOVENÍ ZBYTKOVÉ ŽIVOTNOSTI**

Měření tloušťek na každé komponentě musí být vyhodnoceno zejména s ohledem na určení:

- minimální tloušťky a její porovnání s kritériální tloušťkou. Na základě tohoto porovnání je potřebné určit dobu do další kontroly resp. další provozovatelnost komponenty.
- rozsah defektu (ztenčení) pro případnou pevnostní analýzu.

Měření komponenty bude vyhodnoceno tak, aby bylo možné stanovit pro danou komponentu

- odhad rychlosti prouděním urychlené koroze
- odhad doby do dosažení akceptovatelné tloušťky

Proces hodnocení může být komplikován několika faktory:

- nejsou známy počáteční (předprovozní) tloušťky nebo nebyla stanovena tzv. „základní“ data
- různost tloušťek podél axiální osy i podél obvodu
- nepřesnosti při nedestruktivním (NDE) měření
- možné konstrukční nerovnosti
- chybně zaznamenaná data nebo chyby způsobené při přenosu z přístroje do PC
- překážky bránící provedení měření v celé síti (špatný přístup, izolace, pružinové závěsy atd.)

Inženýrským úsudkem a použitím vhodné metody hodnocení by dopad těchto problémových faktorů měl být minimalizován.

Na základě sběru a vložení vstupních dat do programu je vytvořen model a vyhotovena tzv. první predikční analýza udávající především náchylnost jednotlivých komponent k poškozování vlivem prouděním urychlené koroze. Periodickým doplňováním dat měřených přímo na komponentách (tloušťky stěny a chemické složení) je sledován vývoj prouděním urychlené koroze v čase a vyhotovovány zpřesněné predikční analýzy, kde hlavními výstupy jsou rychlost úbytků tloušťky stěny komponenty a doba do dosažení její akceptovatelné hodnoty, tj. zbytková životnost a to jak pro inspektované, tak i pro neinspektované komponenty.

## **7. SBĚR A ARCHIVACE VSTUPNÍCH A VÝSTUPNÍCH DAT**

V systému prací podporujících program monitorování a predikce prouděním urychlené koroze je sběr dat východiskem pro další činnosti, zejména:

- vytvoření termodynamického a chemického modelu sekundárního okruhu
- principiální výběr tras, které budou v predikčním modelu prouděním urychlené koroze zahrnuty
- tvorbu predikčního modelu
- hodnocení přípustnosti komponent pro další provoz

Vzhledem k tomu, že využití výpočetního kódu klade nároky zejména na kvalitu vstupních dat, je nutné definovat jednotlivé vstupní parametry, způsob jejich získávání, ověření a požadavky na jejich přesnost. Provozovatel by měl navíc zabezpečit přehlednou archivaci vstupních dat, výsledků měření a predikcí jak na elektrárně, tak i u externích kooperací, zejména ve vztahu k budování predikčních modelů. Databáze výsledků slouží k určení komponenty k dalšímu provozu, jejímu vyřazení nebo definuje dobu do dalšího měření.

### **7.1. ROZČLENĚNÍ DAT DO SKUPIN**

Systém rozdělení vstupních dat do skupin, který je základem také pro jejich archivaci, je založen na principech, se kterými pracují různé počítačové programy zabývající se monitorováním, hodnocením a predikcí poškození způsobeného prouděním urychlenou korozí. Důvodem je to, že většina dat by měla vyhovovat požadavkům těchto programů, které

jsou nástrojem pro modelování a predikci tohoto druhu poškození. Systém sekundárního okruhu jaderné elektrárny je z tohoto hlediska rozdělen na skupiny, které reprezentují:

- výrobní blok
- výkon reaktoru a termo- a hydrodynamická data sekundárního okruhu
- chemický režim bloku za sledované období
- provoz a odstávky bloku
- trasu, která vymezuje logický podsystém sekundárního okruhu daný spojnici mezi důležitými zařízeními SO (např. potrubí jednoho odběru VT části turbíny nebo potrubí napájecí vody parogenerátoru). Ve specifických případech (malý počet komponent) může tento pojem splýnout s pojmem „segment“
- segment, pod kterým se rozumí potrubní úsek s homogenními termodynamickými a chemickými charakteristikami
- komponentu, kterou je část segmentu vymezena zpravidla spojovacími svary a vyznačující se jedinou geometrickou klasifikací podle uživatelského manuálu příslušného počítačového programu
- inspekční data
- výsledky modelování

## **7.2. ZPŮSOB ARCHIVACE DAT**

Vstupní i výstupní data jsou archivována tak, aby respektovala uvedené členění. Data musí být uchovávána nejméně dvěma různými způsoby, přičemž jedním z nich by měl vždy být způsob archivace „na papíře“. Druhým způsobem může být například archív vedený v elektronické formě. V případě, že jsou data uchovávána více způsoby, na různých nosičích, je primárním zdrojem vždy archív vedený na papíře. Všechna data tam uvedená musí být verifikována pracovníkem odpovědným za provádění hodnocení prouděním urychlené koroze v elektrárně.

Kromě provozovatele archivuje data také organizace provádějící modelování a organizace měřící tloušťky komponent v rozsahu plynoucím z jejich podílu na hodnocení.

## 8. DLOUHODOBÁ STRATEGIE

Cílem programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze by nemělo být pouhé zjištění současného stavu a provádění inspekcí, ale také snaha o snižování náchylnosti potrubních komponent k tomuto druhu degradačního mechanismu a optimalizace procesu plánování inspekcí. Je žádoucí, aby celý proces byl optimalizován tak, aby docházelo současně jak ke snižování počtu inspekcí, tak i ke snižování pravděpodobnosti nebezpečí prasknutí a ztráty integrity. Proto je doporučováno vypracování dlouhodobé strategie.

Jedním z možných přístupů je nahrazení pouze těch komponent, které vykazují největší opotřebení. Ten přístup je vyhovující, pokud je opotřebení úzce lokalizováno. Jedná se většinou o lokality za ventily nebo clonami. Ve většině případů však opotřebení bývá rozšířeno v celém systému, neboť tok a chemie vody působí v celé trase a je jen otázkou času, kdy jednotlivé potrubní komponenty a zařízení budou muset být také vyměněny. Přístup „od výměny k výměně“ je možná méně nákladný krátkodobě, ale z hlediska dlouhodobého není obecně příliš efektivní. Navíc některé dosavadní zkušenosti ukazují, že může dojít k nečekaným selháním u komponent, u kterých byla naplánována výměna v pozdějším termínu.

Proto je doporučováno, aby v zájmu dosažení dlouhodobých cílů, tj. snížení nákladů a zvyšování bezpečnosti, byla přijata strategie systematického snižování rychlosti prouděním urychlené koroze v systémech sekundárního okruhu elektrárny. Vedou k tomu tři možnosti:

1. Lepší, odolnější materiál
2. Lepší chemické režimy
3. Lokální konstrukční změny

Použití odolného materiálu může redukovat rychlost poškození až k nulovým hodnotám, v závislosti na lokalitě a daném systému sekundárního okruhu mohou změny v chemickém režimu snížit rychlost prouděním urychlené koroze až desetkrát a v konkrétních oblastech mohou ke zlepšení přispět i konstrukční změny.

### 8.1. ODOLNÝ MATERIÁL

Mnoha experimentálními pracemi i zkušenostmi bylo prokázáno, že na rychlost prouděním urychlené koroze mají vliv zejména chróm, měď a molybden, přičemž především obsah chrómu je klíčový. Jeho vliv se příznivě uplatňuje především na zpevnění oxidické vrstvy na povrchu potrubí, ke snížení její porozity a na změnách korozního potenciálu.

Náhrada uhlíkatých ocelí za oceli chróm-molybdenové nebo za materiál s vložkou z nerez ocelí vede ke značnému zmírnění škod způsobených prouděním urychlenou korozí po dobu životnosti elektrárny. Další z možností je zajištění, aby všechny měněné komponenty z uhlíkaté oceli obsahovaly minimálně 0.1% Cr.

Změny materiálu mohou být uplatněny v celých systémech, např. vysokotlaké odběry, nebo mohou být provedeny opravy ve zvlášť k poškození náchylných oblastech. V druhém případě je však třeba věnovat zvýšenou pozornost nebezpečí možného výskytu tzv. „entrance efektu“, tj. k zrychlenému zeslabování tloušťky potrubí z „horšího“ materiálu, které bezprostředně navazuje na materiál „lepší“. Upozornit je třeba také na tu skutečnost, že náhrada materiálu automaticky neznamená snižování rychlosti poškození, pokud degradační mechanismy jsou jiné než tokem urychlená koroze. Například je-li poškození způsobováno kavitací.

## **8.2. CHEMIE VODY**

Obecně závisí tokem urychlená koroze na řadě parametrů. Parametry typu rychlosti proudění, geometrie potrubí (průměr, oblouky, kolena, T-kusy), teploty a entalpie proudícího média, obsah kapalné fáze ve dvoufázové směsi voda/pára atd. jsou dány koncepcí bloku, projektem je také předepsán materiál potrubí, který je kromě dodatečných úprav (výměna za ušlechtlejší, plátování) rovněž neměnný. Jediné parametry, které lze měnit ve stávajícím zařízení, a tím výrazně snižovat poškození vlivem prouděním urychlené koroze, jsou chemické parametry média.

Změny v chemických režimech jsou přitažlivé především tím, že mohou snížit rychlost poškození globálně v celém systému sekundárního okruhu a pomáhají snižovat rychlost transportu železa v okruhu, v důsledku čehož je zpomaleno i zanášení parogenerátorů a prodloužení životnosti ionexů při demineralizaci. Je však nutno poznamenat, že úpravy chemického režimu rychlost poškození pouze zpomalují a tloušťku stěny poškozeného potrubí neobnovují. Inspekční prohlídky proto musí i nadále pokračovat.

Chemické veličiny, které ovlivňují rychlost prouděním urychlené koroze jsou:

- obsah kyslíku (resp. redox potenciál)
- alkalita vyjádřená jako studené pH - (měřená nebo počítaná hodnota pH při 25 °C)
- alkalita vyjádřená jako horké pH( $t$ ) – (počítaná hodnota pH při teplotě  $t$  °C).

## **8.3. LOKÁLNÍ KONSTRUKČNÍ ZMĚNY**

Obecně lze říci, že vliv konstrukčních změn na redukci rychlosti poškození vlivem prouděním urychlené koroze je menší, než u změn materiálových a při úpravách chemického režimu. Například při změně průměru potrubí z 300 mm na 350 mm dojde ke snížení rychlosti prouděním urychlené koroze pouze o přibližně 20%. Existují však případy, kdy konstrukční změny mohou být více účinné:

- zvýšení průměru potrubí vede ke snížení rychlosti poškození u regulačních ventilů. Ty jsou obvykle navrženy tak, že při průtoku těmito ventily obvykle dojde ke snížení průměru základního potrubí o 60%, což má za následek zvýšení rychlosti toku média. Takto lokálně zvýšená rychlost je velmi často příčinou poškození potrubí ve směru toku za ventilem. Rekonstrukce systému regulačních



ventilů, která povede ke snížení lokální rychlosti proudění a ke snížení turbulencí, tak může výrazně snížit rychlost poškozování prouděním urychlenou korozi.

- v případě potrubních tras s dvoufázovým médiem (vlhkou parou) může být rychlost poškozování vlivem prouděním urychlené koroze snížena lokálním poklesem vlhkosti. Toho lze dosáhnout jednak úpravami vedoucími k lepší účinnosti stávajících separátorů vlhkosti nebo instalací dodatečných zařízení separace vlhkosti, čímž se dosáhne menšího množství kapek vody narážejících na stěnu následných potrubních komponent a zařízení. To vede k výraznému snížení poškození vlivem prouděním urychlené koroze, např. u potrubí od separátorů páry k nízkotlaké turbíně nebo ohříváků napájecí vody.

## 9. ZAJIŠTĚNÍ JAKOSTI

Veškeré činnosti spojené s realizací těchto návrhů a doporučení musí být prováděny podle předem zpracovaného programu zajištění jakosti. Tento program musí být v souladu s principy zajišťování jakosti jaderné elektrárny. Hlavní požadavky:

- zajištění pracovních postupů, kontrola prováděných činností
- zabezpečení nezávislé kontroly vkládání a vyhodnocování vstupních dat všech činností souvisejících s monitorovacím a predikčním programem
- vytvoření systému, který včas odhalí nedostatky v pracovních postupech a činnostech
- vytvoření vhodné organizační struktury pro zajištění kontroly
- definování vztahu programu zajištění jakosti pro monitorovací a predikční program k dokumentům o zajištění jakosti elektrárny
- zabezpečení pravidelných auditů pro posouzení aplikace kontroly jakosti v monitorovacím a predikčním programu

## 10. ZÁVĚR

Cílem Programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze z hlediska bezpečnosti provozu jaderné elektrárny je s akceptovatelnou pravděpodobností zabezpečit, že nedojde v průběhu jejího provozu ke ztrátě integrity tlakového potrubí sekundárního okruhu významného z hlediska jaderné bezpečnosti. Pro splnění tohoto cíle je potřebné, aby v rámci realizace MPP byly vytvořeny dostatečné předpoklady pro realizaci následných základních úkolů:

- identifikaci systémů náchylných k prouděním urychlené korozi
- určení (predikci) rychlosti prouděním urychlené koroze na dané komponentě
- identifikaci potrubních komponent pro inspekce a použití vhodných inspekčních metod
- analýzu naměřených dat včetně jejich archivace
- zabezpečení základních dat před začátkem provozu elektrárny; v případě nedostatku těchto dat postupovat náhradním způsobem spočívajícím na příklad ve zjištění skutečného stavu a dostupných provozních informací jako vstupu pro první - náhradní hodnocení
- na základě hodnotících kritérií provést vyhodnocení integrity potrubí a jeho zbytkové životnosti do dalšího měření včetně doporučení na opravu, případně výměnu degradované části potrubí.

V základním schématu činností, které jsou neoddělitelnou součástí monitorovacího a predikčního programu, musí být zabezpečeno:

- definování programu monitorování a predikce pro konkrétní podmínky každého bloku jaderné elektrárny
- identifikace podsystémů sekundárního okruhu náchylných k poškození vlivem prouděním urychlené koroze
- kvalifikovaný způsob rozhodování o rozsahu inspekcí
- predikce poškození
- provedení inspekcí v rozsahu nutném pro potvrzení predikcí a identifikaci poškozených komponent
- způsob vyhodnocení naměřených dat
- rozhodovací kritéria pro další provoz měřené komponenty
- kontrolovatelný systém dokumentace.

Výše uváděné práce jsou minimálním rozsahem pro zavedení efektivního programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze. Tento program může být dále doplňován o další části, které zefektivní údržbu a provoz.

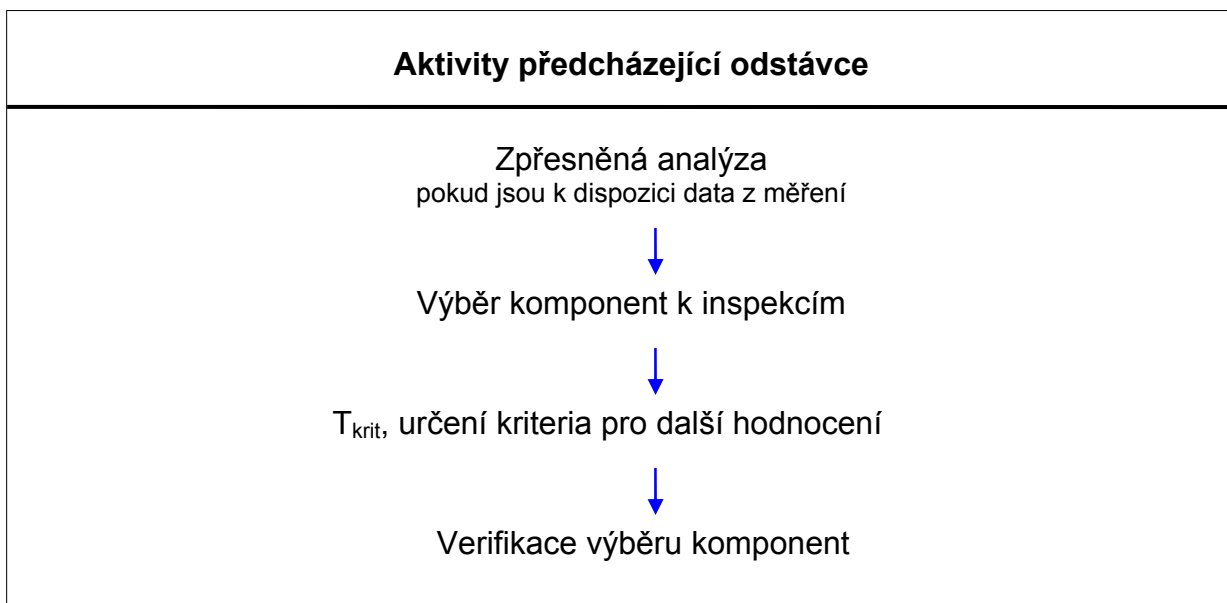
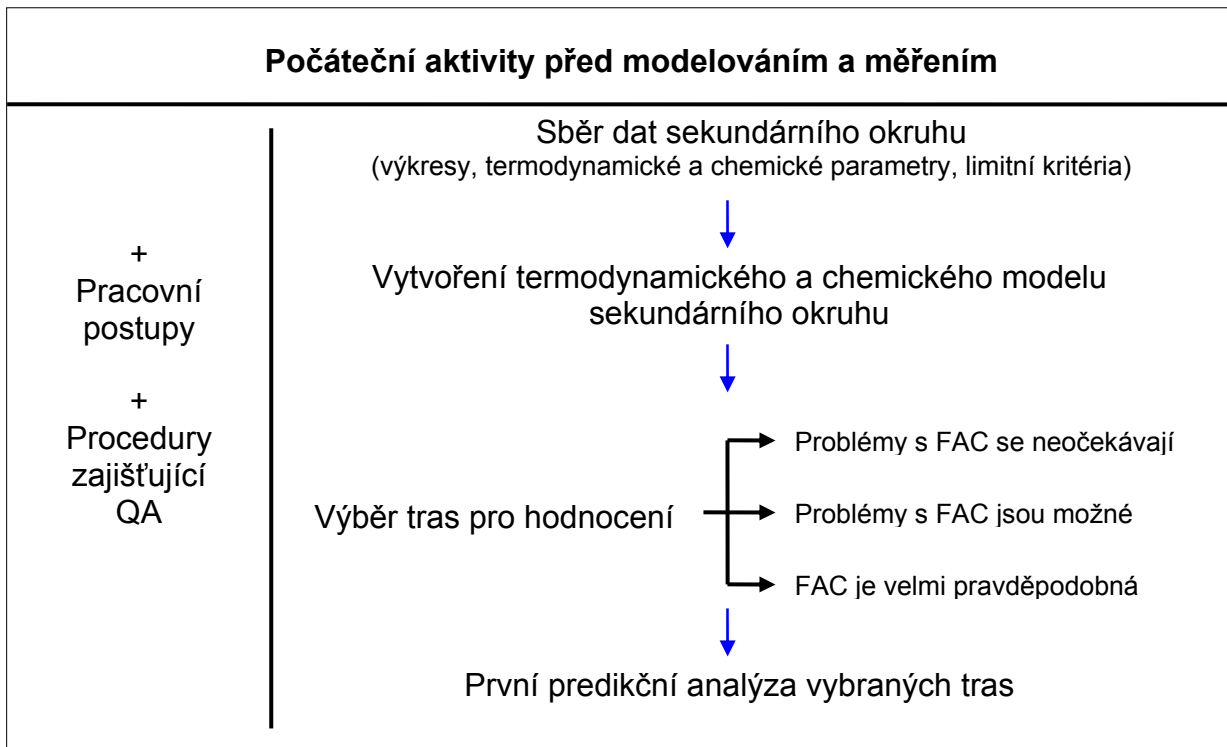
Zejména kombinací lepších chemických režimů s použitím více odolných materiálů lze výrazně snížit poškození vlivem prouděním urychlené koroze. Provozovatel elektrárny by měl pečlivě posoudit tyto možnosti jak z technického, tak i z finančního hlediska a rozhodnout, jak nejvhodněji důsledky způsobené tímto druhem poškození zmírnit.

Odpovědnost za provádění monitorovacího a predikčního programu má provozovatel elektrárny. Je prospěšné vytvořit takové organizační podmínky, kde jsou jednoznačně dány odpovědnosti a vazby pracovníků vykonávajících tento program na další organizační útvary, případně organizace. Vhodné také je specifikovat povinnosti jiných útvarů ve vztahu k programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze.

## 11. REFERENCE

- [1] Zákon č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů.
- [2] Vyhláška SÚJB č. 132/2008 Sb., o systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem a jejich zařazení do bezpečnostních tříd.
- [3] Material Degradation and Related Managerial Issues of Nuclear Power Plants, Proceedings of a Technical Meeting IAEA, Vienna, February 2005
- [4] Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program, NSAC-202L-R3, EPRI, May 2006
- [5] Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, B. Chexal et al, EPRI, 1998, EPRI TR-106611-R1
- [6] NRC Inspection Manual, „Inspection of Erosion-Corrosion/Flow-Accelerated Corrosion Monitoring Programs“, Inspection Procedure 49001, December 1998
- [7] CHECWORKS User Group (CHUG) Positron Paper 1 „Guidelines for Interviewing Plant Personnel within a Flow-Accelerated Corrosion Program“, Altran Corporation Technical Report 95217-TR-01, August 1996
- [8] Engineering Program Guide, Flow-Accelerated Corrosion (FAC), Institute of Nuclear Power Operations, 2005

## Příloha 1: Schéma Programu monitorování a predikce prouděním urychlené koroze (MPP FAC)





## Aktivity po odstávce

Stanovení integrity  
inspektovaných komponent



Technická zpráva

Doporučení  
pro další provoz

Výběr inspekcí  
pro další odstávku

## Příloha 2: Systém dokumentace pro MPP FAC

