

PROCES ZAJIŠTĚNÍ SEISMICKÉ ODOLNOSTI JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Václav Bouřil, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
vaclav.bouril@gmail.com

ABSTRAKT

Bezpečnost provozování jaderných elektráren je nedílnou součástí jejich užívání. Jedním ze základních jevů, který určuje návrh jaderné elektrárny a může negativně ovlivnit její bezpečnost, je seismická událost. Článek shrnuje proces zajištění seismické odolnosti jaderné elektrárny od vlastního stanovení seismického zatížení až po metody prokazování dostatečné seismické odolnosti jednotlivých systémů, konstrukcí a komponent jaderné elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Seismicita • Odolnost • Jaderná elektrárna • Kvalifikace • Spektra odezvy

ABSTRACT

Safety of nuclear power plants is an integral part of their use. One of the basic events that will determine the design of a nuclear power plant and can negatively affect its safety, is a seismic event. This paper briefly summarizes the process of ensuring seismic resistance of a nuclear power plant from the determination of seismic load to methods of proving sufficient resistance of individual systems, structures and components of the nuclear power plant.

KEYWORDS

Seismicity • Resistance • Nuclear power plant • Qualification • Response spectra

1. ÚVOD

Při provozování jaderných elektráren (JE) je provozovatel, mimo jiné, zodpovědný za jejich bezpečný provoz. Bezpečný provoz jaderné elektrárny je zajištěn, pokud ve všech stavech jaderného zařízení jsou zajištěny tzv. základní bezpečnostní funkce (ZBF). Základní bezpečnostní funkce jsou definovány v IAEA SSR-2/1 Safety of Nuclear Power Plants: Design a jsou to:

- Zabránění nekontrolovanému rozvoji štěpné reakce
- Odvod tepla z reaktoru a z použitého jaderného paliva

- Zabránění únikům radioaktivních materiálů do životního prostředí.

K zajištění základních bezpečnostních funkcí jsou JE vybaveny celou řadou technických a organizačních opatření. Technická opatření ve formě systémů, konstrukcí a komponent (SKK) jsou kategorizována dle jejich důležitosti pro naplnění výše uvedených ZBF. Dle jejich důležitosti jsou na tyto SKK následně kladeny požadavky na odolnost, protože jaderná elektrárna musí zajistit plnění ZBF i při působení vlastností a parametrů území, kde je jaderná elektrárna umístěna.

Nejdůležitější SKK jsou tzv. bezpečnostní systémy (BS), které jsou základními projektovými prostředky s vlivem na jadernou bezpečnost (tzv. vybraná zařízení), určené ke spolehlivému plnění základních bezpečnostních funkcí při projektem předpokládaných provozních stavech a základních projektových nehodách. Plnění ZBF je pro tyto stavy potvrzeno bezpečnostními analýzami.

Neplnění bezpečnostních funkcí těchto bezpečnostních systémů vede k závažným důsledkům z hlediska jaderné bezpečnosti, proto jsou na BS kladeny zvýšené požadavky z hlediska kvality, spolehlivosti, výkonnosti, odolnosti a ochrany proti vnitřním a vnějším vlivům. Odolnost a ochrana proti vnitřním a vnějším vlivům může být zajištěna vlastností vlastního bezpečnostního systému, nebo projektovým opatřením (např.: ochrana vzdáleností, separací, umístěním do odolného stavebního objektu atd.).

Funkceschopnost bezpečnostních systémů musí být zachována při všech projektem předpokládaných událostech a jejich relevantních kombinacích:

- **Zemětřesení,**
- požáry,
- extrémní klimatické vlivy,
- události, způsobené lidskou činností,
- poruchy, výpadky zařízení a nehody na JE,
- v případě výskytu jednoduché poruchy systému

Článek popisuje způsob zajištění odolnosti jaderných elektráren vůči zemětřesení.

2. STANOVENÍ SEISMICKÉHO ZADÁNÍ

Pro zajištění dostatečné seismické odolnosti jaderné elektrárny musí být v první řadě správně stanoveno seismické zatížení, které je specifické pro každé území k umístění

* Školitel: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

jaderného zdroje. Stanovení seismického zadání lze zjednodušeně rozdělit na dva základní úkoly:

- Stanovení intenzity zatížení (maximální amplituda horizontálního zrychlení)
- Stanovení průběhu seismického zatížení a jeho přizpůsobení maximální intenzitě

Tyto dvě základní úlohy jsou souborem činností zahrnujících hodnocení geologických a seismických podmínek v území k umístění jaderného zdroje, výběr souboru vhodných přírodních akceleroogramů, které byly zaznamenány v geologicky podobných podmínkách a jejich úprava na úroveň špičkového zrychlení odpovídající MVZ (Maximální výpočtové zemětřesení), nebo PZ (Projektové zemětřesení). Hodnoty MVZ a PZ vyplývají ze statistického zhodnocení vlastností lokality metodou PSHA (Probabilistic seismic hazard assesment), nebo jsou stanoveny minimální hodnotou z legislativy. Následně jsou stanovena obalová spektra odezvy, která jsou vztahena k úrovni volného terénu (free field spectra). Těmito spektry, nebo z nich generovanými simultánními akceleroagramy jsou zatěžovány stavební konstrukce JE. Následně jsou generována podlažní spektra odezvy, na která jsou posuzována technologická zařízení.

2.1. Stanovení intenzity seismického zatížení

Geologické a seismické podmínky

První úlohou při stanovování seismického zadání je stanovení seismického ohrožení na základě hodnocení lokality. Při stanovení seismického ohrožení je prvním úkolem vymezení regionu, ve kterém se bude geologické hledisko hodnotit. Následně je popsána geologická stavba regionu. Katalogy zemětřesení jsou vytvořeny z databází národní seismické sítě a evropských seismologických center. Do této skupiny patří i česká národní síť seismických stanic. Druhým zdrojem je lokální síť seismických stanic vybudovaná v lokalitě jaderného zdroje.

Při hodnocení seismicity regionu umístěné JE se používají přístupy a metody obvyklé v seismologii, jako jsou např. užívané postupy:

- registrace, dokumentace a zpracování seismologických dat (postupy pro sestavování katalogů zemětřesení, ohodnocování a verifikace zaznamenaných jevů a registraci instrumentálních jevů).
- historické seismologie např. při dokumentaci historických jevů nebo při ověřování kompletnosti katalogu.
- získávání údajů o místně specifickém útlumu seismické energie v závislosti na vzdálenosti od jejího zdroje a postupy konstruování útlumových vzorců, včetně ohodnocování nejistot.

Dále se užívají specifické metody pro odhady seismického ohrožení jaderných elektráren. Jedná se zejména o postupy použité k vymezení regionu a zaměření průzkumných a dokumentačních aktivit, postupy pro vytváření seismologické databáze a její doporučený obsah, a postupy doporučené pro konstrukci regionálního seismotektonického modelu.

Další skupinu metod tvoří matematické postupy používané při stanovení hodnoty MVZ. Tato skupina metod se v poslední době velmi dynamicky rozvíjí, zejména pravděpodobnostní přístupy, a postupně jsou zaváděny i do doporučení a manuálů Mezinárodní agentury pro mírové využívání jaderné energie (IAEA). V posledních letech jsou do praxe IAEA rovněž zaváděny postupy určování velikosti kmitavého pohybu půdy na základě modelování procesů na zlomech v průběhu prasknutí.

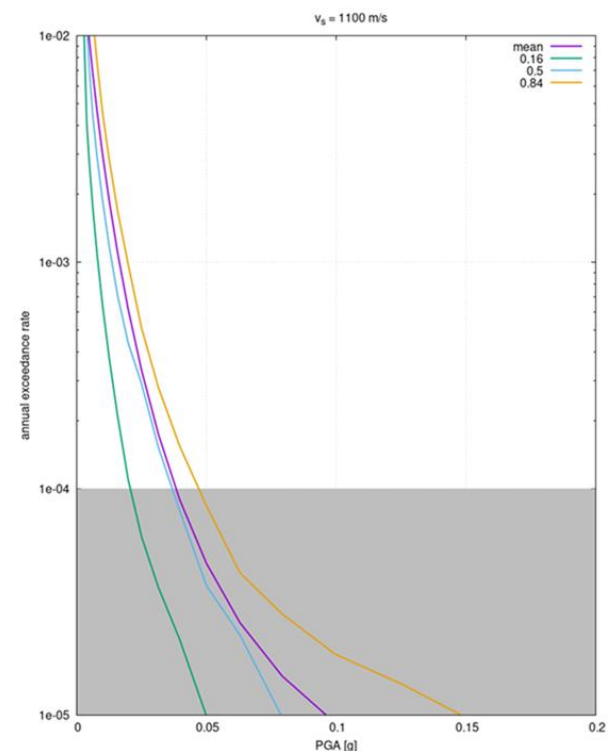
Metoda PSHA

Prvním krokem analýzy je vytvoření a zhodnocení seismotektonického modelu regionu, což zahrnuje zhodnocení výskytu zemětřesení v regionu jaderné elektrárny a vymezení zdrojových zón (zlomů, oblastí s koncentrovanou seismicitou apod.), včetně zhodnocení nejistot.

Základním zdrojem vstupních dat je katalog zemětřesení, který zahrnuje údaje o prehistorických, pre-instrumentálních (historických) a instrumentálně zaznamenaných zemětřeseních.

Při PSHA je výskyt zemětřesení považován za náhodný proces, který se řídí Poissonovým rozdělením, a ve kterém se předpokládá časová nezávislost výskytu zemětřesení. Proto pro účely PSHA musí být z katalogů vyloučeny závislé jevy, tj. předtřesy a dotřesy a slabší jevy v seismických rojích. Tato procedura se nazývá deklasterizace katalogu.

Dalším krokem analýzy je výběr útlumových vztahů (GMM - Ground Motion Model), dříve nazývaných GMPE (Ground Motion Prediction Equation), vhodných pro daný charakter podloží.



Obrázek 1: Výsledné pravděpodobnostní křivky pro amplitudu vodorovného zrychlení.

Výsledkem výpočtu jsou pravděpodobnostní křivky seismického ohrožení, které jsou znázorněny na obrázku 1. Na vodorovné ose je maximální hodnota horizontálního zrychlení seismického kmitání půdy (PGA). Na svislé ose je roční četnost výskytu takového zrychlení. Převrácené hodnoty na svislé ose lze interpretovat také jako průměrnou dobu opakování těchto pohybů (za předpokladu, že se v budoucnu nezmění seismický režim). Křivka 50 % reprezentuje střední variantu, medián, kdy polovina scénářů dává hodnotu vyšší, druhá polovina nižší. Křivka 84 % reprezentuje hodnotu, která nebude překročena s pravděpodobností 84%, a křivka 16% představuje odhad hodnoty, která naopak s pravděpodobností 84% bude překročena. Dále je zobrazen aritmetický průměr ze všech scénářů, který je vyšší než medián. To je způsobeno tím, že PGA (Peak Ground Acceleration) nabývá pouze kladných hodnot a nemůže tedy mít Gaussovo normální rozdělení. Extrémně vysoké hodnoty PGA, které přísluší malé části scénářů, pak způsobují tento rozdíl mezi průměrem a mediánem. Proto je vhodnější používat medián, pokud má být seismické ohrožení oceněno zjednodušeně pouze jedním parametrem, například hodnotami PZ a MVZ.

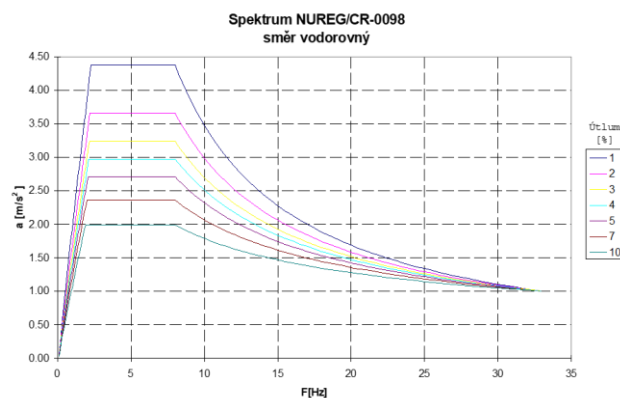
2.2. Stanovení průběhu seismického zatížení

Určení návrhového seismického buzení je možné určit výběrem souboru přírodních akcelerogramů zaznamenaných v oblastech s obdobnými geologickými podmínkami, s přibližně shodnou hloubkou ohniska, blízkou hodnotou magnituda M a s přibližně shodnou vzdáleností od předpokládaného největšího zdroje seismické aktivity od JE (vzdálenost epicentra). Volba návrhových akcelerogramů se realizuje selekcí vhodných akcelerogramů odpovídajících výše uvedeným parametrům ze světové seismické databanky a jejich přepočtem (tzn. proporcionálním vynásobením hodnot zrychlení) na úroveň špičkových zrychlení MVZ, popř. PZ.

Tabulka 1: Příklad běžně používaných přírodních akcelerogramů.

| Název | složky | maximální zrychlení [g] | počet časových kroků | délka časového kroku [s] |
|-------------------------------------|--------|-------------------------|----------------------|--------------------------|
| Carigliano, 23.11.80 18:34:54 | H1 | 0.100 | 444 | 0.030 |
| | H2 | 0.100 | 412 | |
| | V | 0.070 | 437 | |
| San Severo, 23.11.80 18:34:54 | H1 | 0.100 | 466 | 0.031 |
| | H2 | 0.100 | 430 | |
| | V | 0.070 | 404 | |
| USA, západní část 04.09.55 | H1 | 0.100 | 750 | 0.020 |
| | H2 | | 750 | |
| | V | | 750 | |
| USA, západní část 22.03.57 | H1 | 0.082 | 750 | 0.020 |
| | H2 | | 750 | |
| | V | | 750 | |
| USA, západní část 22.03.57 | H1 | 0.084 | 750 | 0.020 |
| | H2 | | 750 | |
| | V | | 750 | |

Alternativně lze užít standardizovaných spekter odezvy, publikovaných v předpise NUREG/CR-0098 pro útlum 5 %, skalní podloží a pravděpodobnost nepřevýšení 84 %. Tato spektra se upravují vynásobením hodnot zrychlení na úroveň PGA, odpovídající MVZ nebo PZ. Jednotlivá generická spektra definovaná v NUREG/CR-0098, dle uvažovaného útlumu jsou vidět na obrázku 3.



Obrázek 3: Generické spektrum NUREG/CR-0098, vodorovný směr

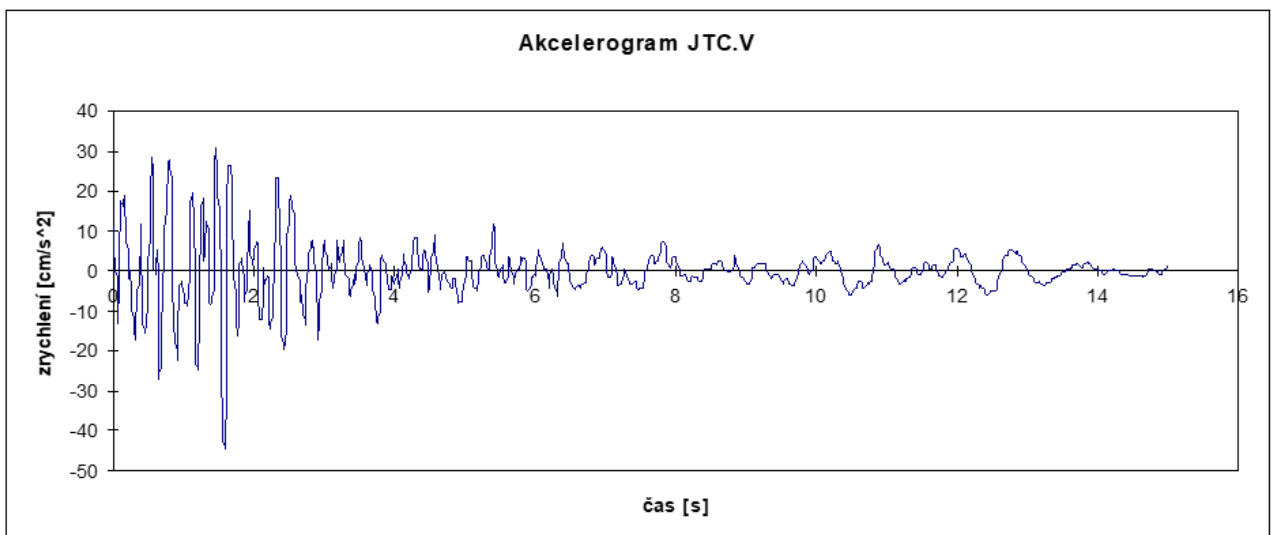
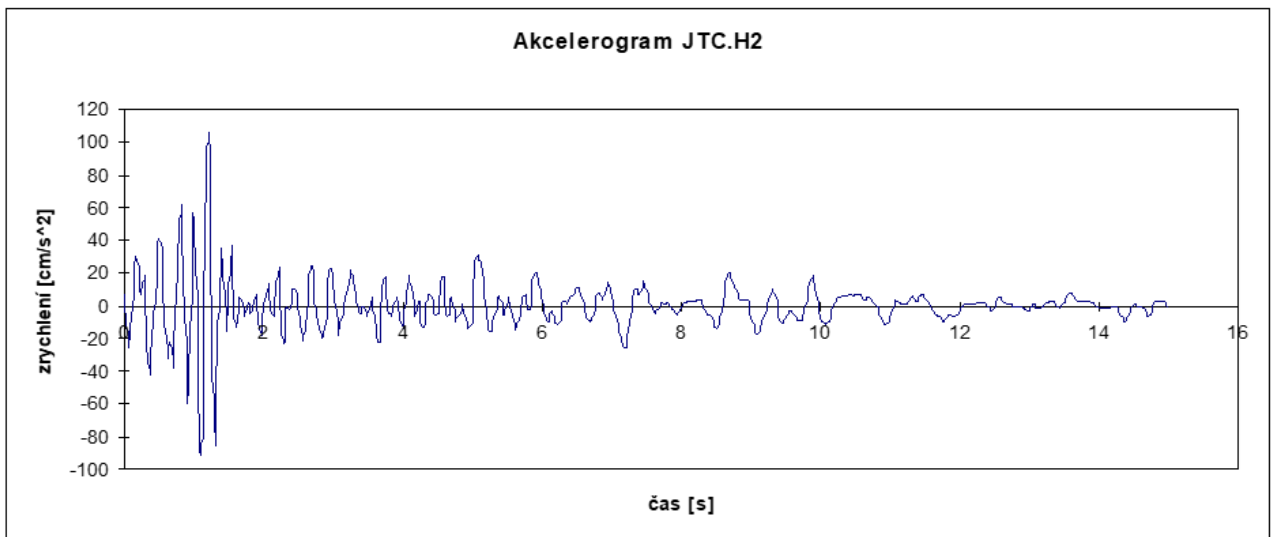
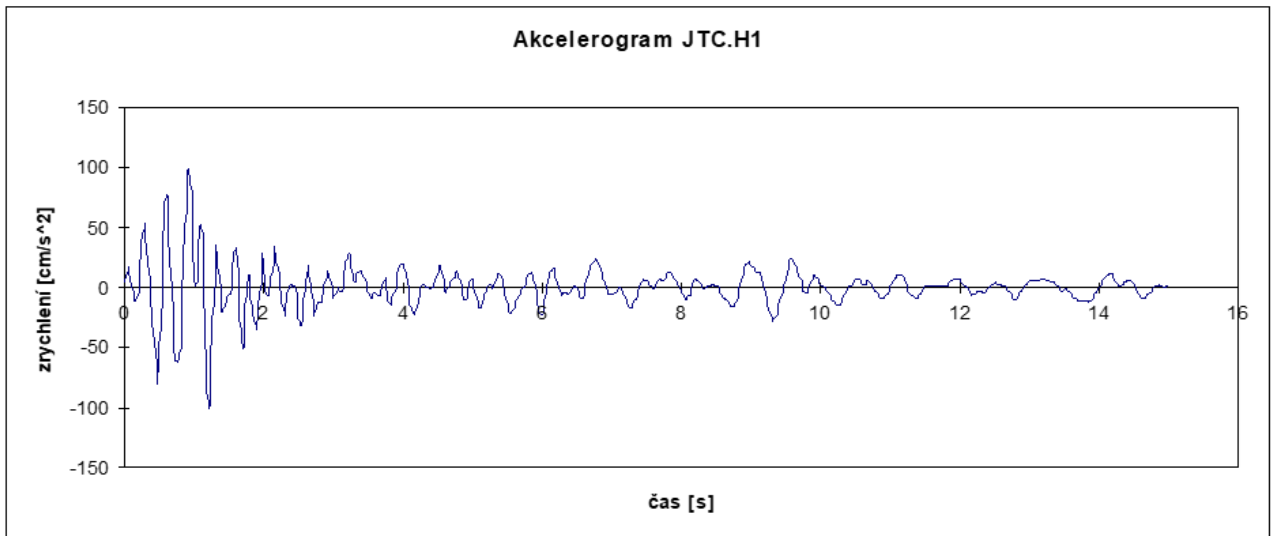
3. SEISMICKÁ KATEGORIZACE SYSTÉMŮ KONSTRUKCÍ A KOMPONENT (SKK) JE

Seismická kategorizace stavebních objektů vyplývá z kategorizace technologického zařízení.

Do 1. kategorie seismické odolnosti jsou zařazeny ty stavební konstrukce a technologická zařízení, která jsou nezbytná pro plnění základních funkcí bloku JE z hlediska jaderné bezpečnosti při seismické události až do úrovně MVZ včetně, tzn. především:

- Zajištění jaderné bezpečnosti bloku JE při a v období po seismické události, příp. účinku vnější tlakové vlny a dopadu letadla na budovu reaktoru a další vybrané stavební objekty nebo na systémy, jejichž porušení a následné vyřazení z funkce může ve svém konečném důsledku způsobit ohrožení jaderné bezpečnosti bloku JE.

1. kategorie seismické odolnosti stavebních objektů se dělí na dvě části podle toho, zda se pro daný objekt vyžaduje zachování seismické odolnosti do úrovně MVZ (Maximální výpočtové zemětřesení) nebo pouze do úrovně PZ (Projektové zemětřesení). Do druhé části 1. kategorie seismické odolnosti jsou zařazeny ty stavební konstrukce, jejichž porušení, zřícení nebo selhání při seismické události by mohlo ohrozit jiné konstrukce a zařízení 1. kategorie seismické odolnosti, nicméně jejich funkční způsobilost ani mechanická integrita nejsou z hlediska spolehlivého zajištění bezpečnostních funkcí při a v období po seismické události požadovány.



Obrázek 2: Ukázka přírodního tříšložkového akcelerogramu (USA, západní část 04.09.55)

Do první části 1. kategorie seismické odolnosti se zařazují ty konstrukce, technologické systémy a komponenty zařízení, které musí splňovat níže uvedené funkce, související se zajištěním jaderné bezpečnosti bloku JE:

- Zajištění spolehlivosti konstrukcí, technologických systémů a komponent zařízení, jejichž porušení nebo vyřazení z funkce by mohlo přímo způsobit vznik havarijních podmínek.,
- Zajištění plnění dalších funkcí při a po seismické události: bezpečné odstavení reaktoru, jeho udržení v bezpečném stavu, monitorování kritických parametrů a zajištění odvodu zbytkového tepla po specifikované době (zpravidla 72 hodin),
- Zajištění ochrany proti šíření radioaktivních látek a záření do okolí JE v mezích nejvyšších přípustných úniků, které jsou platné pro havarijní podmínky.

Do druhé části 1. kategorie seismické odolnosti se zařazují ty konstrukce, technologické systémy a komponenty zařízení, které nejsou obsaženy v první části 1. kategorie, avšak:

- Jsou součástí objektů, v nichž dochází k manipulaci s čerstvými palivovými články před jejich zavezením do reaktoru,
- Jsou součástí objektů, v nichž dochází k manipulaci s nízkou a středně radioaktivními kapalnými médii, i když je prokázáno, že případné úniky radioaktivních látek do okolního prostředí při poruchách v důsledku seismické události nepovedou k překročení limitních dávek, definovaných jako mezní pro dané území k umístění JZ.

U technologické části se 1. kategorie seismické odolnosti dále člení na tři podkategorie:

- **1a - je vyžadována seismická odolnost ve smyslu zachování plné funkční způsobilosti,**
- **1b - je vyžadována seismická odolnost ve smyslu zachování mechanické integrity (tzn. pevnosti, příp. hermetičnosti) v souladu s příslušnými pevnostními normami a předpisy; dílčí poruchy funkční způsobilosti jsou přípustné,**
- **1c - je vyžadována seismická odolnost z hlediska seismických interakcí s jinými technologickými systémy, komponentami zařízení nebo se stavební konstrukcí ve smyslu zachování stability polohy; dílčí poruchy funkční způsobilosti i mechanické integrity jsou přípustné.**

4. SEISMICKÁ KVALIFIKACE SKK – PRŮKAZY ODOLNOSTI

Pro seismickou kvalifikaci zařízení jsou akceptovatelné metody, které odpovídají požadavkům norem ČSN IEC 980, IEEE/IEC 60980-344-2020 a které lze rozdělit do čtyř skupin:

- 1) **odhad funkčního chování na základě výpočtových metod a analýz (i pro stavební objekty);**
- 2) **typová zkouška zařízení za simulovaných podmínek zemětřesení;**

- 3) kvalifikace zařízení kombinací zkoušek a analýz;
- 4) kvalifikace zařízení využitím empirických údajů a zkušeností (z reálných zemětřesení, příp. dříve provedených zkoušek apod.).

Použití jednotlivých metod, případně jejich kombinace souvisí s konkrétním řešením a situací hodnoceného zařízení nebo jeho komponent, kde rozhoduje typ, velikost, tvar a složitost. Výsledky seismické kvalifikace, získané jednou z doporučených metod, musí být zdokumentovány tak, aby poskytovaly průkaz o spolehlivosti zařízení a výkonu jejich bezpečnostních funkcí, strukturální integrity anebo stability. Článek dále rozebírá 1. a 2. skupinu, tedy kvalifikace výpočtem, nebo zkouškou.

4.1. Kvalifikace stavebních objektů výpočtovou metodou

Při návrhu stavebních konstrukcí 1. kategorie seismické odolnosti JE se používají následující metody výpočtu dynamické odezvy konstrukcí založené na lineární teorii pružnosti, pomocí nichž se určuje namáhání jednotlivých konstrukčních prvků při seismické události, cílem výpočtů je stanovit HCLPF – High Confidence on Low Probability Failure dle: (H. H. M. Hwang, 1989).

Metoda spekter odezvy

Na základě spektra odezvy pro úroveň založení lze stanovit amplitudy výchylek a silových účinků příslušejícím jednotlivým tvarům kmitání. Jsou stanovena součtová pravidla pro sčítání maximálních odezvy při uvažování více tvarů kmitání a tří globálních ortogonálních směrů pohybu. Výsledkem řešení jsou amplitudy hodnot uzlových veličin (deformací, rychlostí, zrychlení) a vnitřních sil, popř. napětí v jednotlivých prvcích výpočtového modelu.

Transientní analýza na časový průběh zrychlení základny, řešená rozkladem do vlastních kmitů

Časová analýza, na tzv. syntetické akcelerogramy, modelující časový průběh zrychlení základny třísloužkovým simultánním syntetickým signálem, který odpovídá platným seismickým zadáním je řešena pomocí pohybové diferenciální rovnice dynamické soustavy. Při použití této metody se předpokládá lineární kombinace vlastních tvarů kmitání mechanické soustavy a řeší se v postupných krocích pomocí implicitní Newmarkovy metody časové integrace. Velikost časového kroku a další řídicí parametry výpočtu se určují tak, aby tyto vyhovovaly jak kritériím numerické stability řešení, tak i z hlediska citlivosti na vlastní frekvence analyzovaného systému a na parametry působícího zatížení (frekvenční obsah, délku vzorkovacího intervalu akcelerogramů). Výsledkem řešení jsou časové průběhy uzlových veličin výpočtového modelu (deformací, rychlostí, zrychlení) a vnitřních sil, popř. napětí v jednotlivých prvcích výpočtového modelu (nosnicích, deskách apod.).

Transientní analýza na časový průběh zrychlení uzlů základny, řešená Přímou integrací pohybových rovnic v čase

Odezva na pohyb podloží zadaný časovým průběhem zrychlení základny je řešena časovou integrací pohybových

rovnice v postupných časových krocích. Velikost časového kroku a další řídicí parametry výpočtu jsou určeny tak, aby byla splněna kritéria numerické stability řešení, tak i z hlediska citlivosti na vlastní frekvence analyzovaného systému a na parametry působícího zatížení (frekvenční obsah, délku vzorkovacího intervalu akcelerogramů). Výsledkem řešení je časový průběh uzlových veličin (deformací, rychlostí, zrychlení) a vnitřních sil, popř. napětí v jednotlivých prvcích výpočtového modelu. Uvedenou výpočtovou metodou je možno řešit i problémy zahrnující materiálovou nelinearitu nebo nelinearitu okrajových podmínek (kontaktní úlohy), je však také velmi efektivní pro řešení lineárních soustav při ekvidistantním časovém kroku, neboť není třeba v tomto případě provádět inverzi soustavy v každém časovém kroku.

Metoda ekvivalentního statického zatížení

Pro složitost stavebních konstrukcí na JE není používána.

Okrajové podmínky výpočetních metod

U výpočtových metod založených na principu modální superpozice (rozklad do vlastních tvarů kmitu) se ve výpočtu odezvy musí uvažovat dostatečný počet vlastních tvarů kmitání tak, aby kumulativní hmotnost buzené mechanické soustavy byla v každém ze tří globálních směrů X, Y, Z alespoň 80 % celkové modální hmoty v příslušném směru. Tento požadavek je u větší části výpočtů dosažen za předpokladu, že ve výpočtu odezvy jsou zahrnuty buď všechny vypočtené vlastní tvary kmitání s frekvencí do 33 Hz nebo pouze významné tvary kmitání s modální hmotou větší nebo rovnou 0,5 % celkové modální hmoty alespoň v jednom ze tří globálních směrů X, Y, Z.

Pro seismické výpočty objektů 1. kategorie, prováděné pomocí transienční analýzy na časový průběh zrychlení základny metodou modální superpozice, jsou pro popis seismického buzení základny použity třísložkové simultánní syntetické akcelerogramy, jak je příkladem ukázáno na obrázku 4.

Pro každý stavební objekt 1. kategorie se provádějí celkem dva dynamické výpočty, druhý výpočet se záměnou horizontálních složek simultánního syntetického akcelerogramu. Pro posouzení spolehlivosti stavebních konstrukcí podle metodiky mezních stavů jsou uvažovány nejvyšší silové účinky, zjištěné z obou časových průběhů, popř. kombinace vnitřních sil, která způsobí nejnepříznivější stav z hlediska namáhání průřezu.

V případech, kdy je pro dynamickou analýzu účinků MVZ použita metoda spekter odezvy, jsou jako vstup použity tři prostorové složky spektra odezvy, které odpovídají příslušnému seismickému zadání.

Uvažované tlumení

Útlum při kmitání je v dynamických výpočtech využívajících modální superpozice zaveden do výpočtu jako modální viskózní s hodnotami poměrného útlumu v procentech kritického útlumu mechanické soustavy. Použití těchto hodnot v konkrétních výpočtech závisí na převládajícím typu konstrukce (materiálu, technologie provedení) a na úrovni seismické události (pro MVZ jsou vyšší než pro PZ). Většinou se používá pro všechny uvažované tvary kmitání

útlum jednotnou hodnotou, neboť objekty 1. kategorie jsou homogenní z hlediska materiálu a technologie provedení, pouze v případech, kdy je výpočtovém modelu uvažováno spolupůsobení stavby s podloží, se pro kývavé tvary stavby jako celku zavádí útlum o vyšších hodnotách.

Ve výpočtech využívajících metodu přímé integrace pohybových rovnic v čase je útlum mechanické soustavy do výpočtu zaváděn jako tzv. Rayleighův, tj matice útlumu [C] je dána jako lineární kombinace matice hmotnosti [M] a matice tuhosti [K] podle vzorce:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

kde $\alpha[M]$ je útlum úměrný matici hmotnosti a $\beta[K]$ je útlum úměrný matici tuhosti.

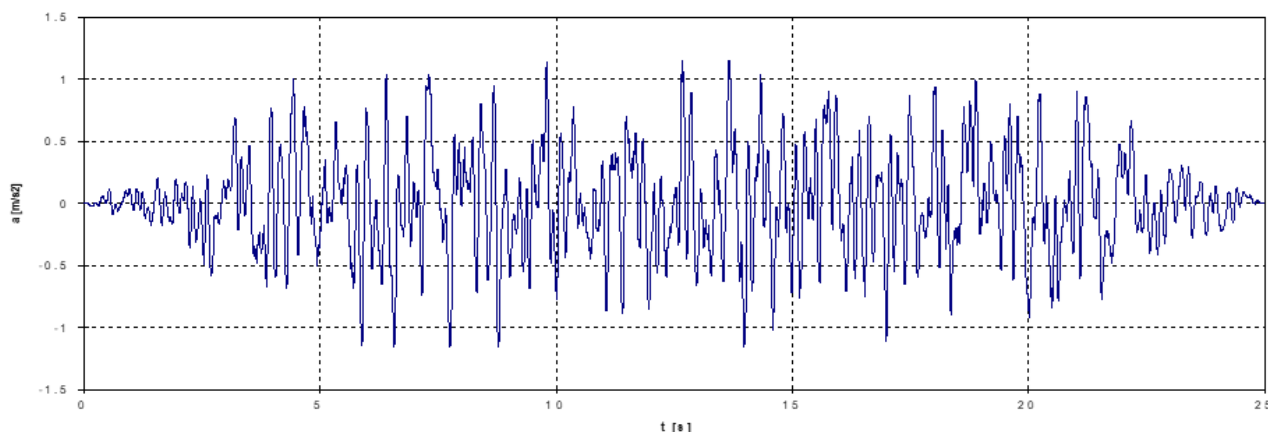
Tabulka 2: Uvažované hodnoty poměrného útlumu kmitání pro dynamické výpočty stavebních konstrukcí v % kritického útlumu.

| Druh stavební konstrukce | Úroveň zemětřesení | |
|-------------------------------|--------------------|-----|
| | PZ | MVZ |
| svařované ocelové konstrukce | 2 | 4 |
| šroubované ocelové konstrukce | 4 | 7 |
| předpjaté betonové konstrukce | 2 | 5 |
| železobetonové konstrukce | 4 | 7 |
| zděné konstrukce | 5 | 7 |

Duktilita

Stavební konstrukce jsou při seismických událostech vyšší úrovně schopné v různé míře adsorbovat určité množství energie, pokud dojde k uvedení jejich materiálu do částečného či úplného plastického stavu. K tomuto jevu dochází např. u stvků rámových příčlů se sloupy při namáhání ohybem v rovině rámu, přičemž míra duktility je určena poměrem míry deformace průřezu (zde křivosti) na mezi porušení k deformaci, při níž je v krajních vlákních průřezu nebo ve výztuži na jedné straně průřezu dosaženo meze kluzu. K pružno-plastickému chování průřezů a k adsorpci energie při dynamickém namáhání může dojít v menší míře i u jiných způsobů namáhání, avšak využití duktility se může rapidně snížit (často až na hodnotu 1.0) různými vlivy, jako např. v důsledku vyššího osového namáhání nebo jiného procenta vyztužení železobetonového průřezu. K využití duktility nedochází nikdy v případech, kdy stav napjatosti materiálu nedosáhne plastického stavu, jako zejména u prvků s možností ztráty stability (ocelové sloupy, nosníky nezajištěné proti klopení), nebo kdy porušení konstrukčního detailu lze charakterizovat jako křehké (svarové přípoje). Vzhledem k tomu, že metody výpočtu založené na lineární teorii pružnosti neumožňují tento typ chování modelovat, uvažují se vlivy duktilního chování v souladu s (N. M. Newmark, W. J. Hall 1978), jako redukce vypočtených seismických silových namáhání v kombinaci s namáháním od ostatních neseismických zatížení. Vliv duktility se explicitně neuvažuje ve výpočtech spekter odezvy zrychlení na podlažích.

Syntetický akcelerogram HOR1.TH



Obrázek 4: Ukázka horizontální složky simultánního syntetického akcelerogramu

4.2. Seismické zkoušky

Seismické zkoušky jsou obecně preferovanou metodou pro seismickou kvalifikaci složitých zařízení, kdy kvalifikace samotnou analýzou by nebyla dostatečná, nebo je-li nutné ověřit spolehlivost zařízení související s funkcemi, jež mohou selhávat při seismickém zatížení. Zařízení musí být podrobena zkouškám, při kterých jsou zároveň simulovány jejich pracovní podmínky. Seismická zkouška musí být vykonána na vzorcích vystavených vibračnímu kmitání s charakteristikami, které jsou dostatečně konzervativní vzhledem k montážním podmínkám v místě instalace zařízení během uvažované seismické události. Seismické zkoušky zařízení je třeba provést v souladu s normami IEEE/IEC 60980-344-2020.

Při stanovení podmínek zkoušky se uvažuje, bude-li zařízení používáno pro speciální jednorázové aplikace nebo uvažuje-li se s jeho širším využitím. V prvním případě může být stanovena kvalifikační zkouška a přikládán seismické buzení na základě technické specifikace zařízení, odpovídající konkrétnímu místu instalace. V druhém případě musí navržená zkouška zohledňovat generické požadavky pro seismické zkoušky dané související normou, návody, kódem atp., aby takové výsledky ověření seismické odolnosti zkušební vzorku byly přenositelné na širokou škálu použití, včetně oblastí s vyššími úrovněmi zemětřesení. Seismické zkoušky pro obecné aplikace zařízení, však mohou s sebou přinášet vyšší stupeň konzervatismu, tj. zvyšovat nároky na seismickou odolnost zkoušeného zřízení.

Zkušební vzorek zařízení je vybírán tak, aby ve všech ohledech reprezentoval kvalifikovaný typ zařízení, včetně definovaných pracovních podmínek. Modifikace a odlišnosti vzorku od typové řady zkoušených zařízení jsou přijatelné, pokud jsou splněny tyto podmínky:

Vzorky zařízení, které prošly seismickými testy, nelze v reálném provozu na bezpečnostní pozici dále.

Seismické podmínky pro SKK umístěná v objektech zařazených v I. Kategorii seismické odolnosti jsou prezentovány především vypočtenými spektry frekvenční závislosti absolutního odezvového zrychlení pro jednotlivá podlaží objektů, která představují tzv. požadovaná seismická spektra odezvy (RRS).

Zkoušky jednofrekvenčním buzením

Vhodným příkladem pro použití jednofrekvenčního buzení jsou případy, kdy se předpokládá, že zařízení bude vystaveno ustáleným vibracím s jednou dominantní frekvencí. Buzení s jedinou frekvencí je rovněž vhodné při vyšetřování vlastních frekvencí zařízení a jeho hodnot útlumu. Obecně tyto zkoušky však nejsou doporučeny pro ověřování seismické způsobilosti elektrických zařízení.

Při zkouškách podle zadaného požadovaného spektra odezvy (RRS) je vhodné, aby zkušební vlna s jedinou budící frekvencí byla nastavena na takovou jednu frekvenci a s takovou amplitudou, aby zkušební spektrum odezvy (TRS) pokrývalo významnou oblast spektrálního zrychlení (SA) v RRS. Obvykle se zkušební frekvence volí ve středu amplifikované oblasti RRS tak, aby rozšířením intervalu frekvencí na 1/3 oktávy bylo pokryto celé pásmo SA-RRS. V případě, že není RRS zcela pokryto, musí být toto dostatečně odůvodněno.

Zkoušky multifrekvenčním buzením

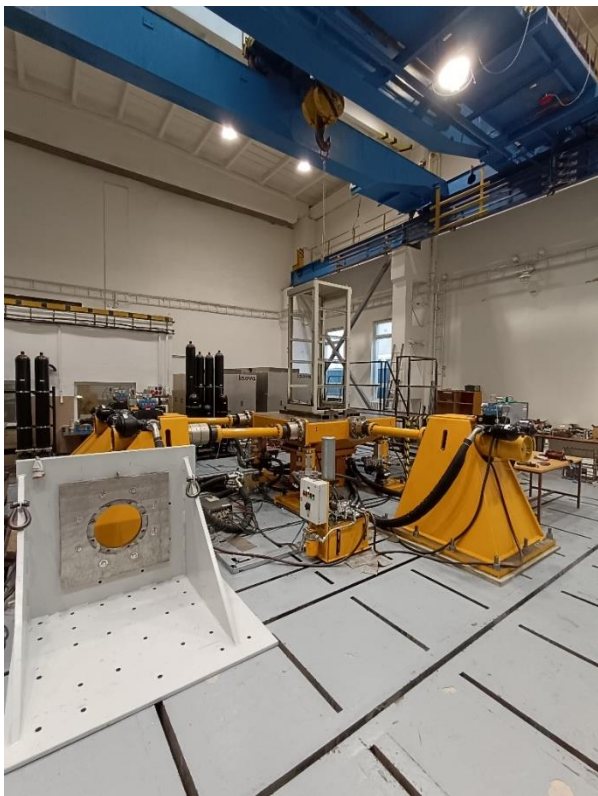
Zkoušky multifrekvenčním buzením jsou preferované pro seismické ověření způsobilosti elektrických zařízení. Při těchto zkouškách buzení se vytváří širokopásmové spektrum kmitů, které vyvolává současnou vícemodální odezvu systému s mnoha stupni volnosti. Takové simulované ořesové zatížení může indukovat funkční selhání zařízení, které se stává závislé na modální interakci kmitů dané mechanické soustavy. Multifrekvenční zkoušky nabízejí simulované průběhy velmi blízké typickým zemětřesným vibracím, aniž by byly zatížené vysokým stupněm konzervatismu.

U multifrekvenčních zkoušek se uplatňují dva přístupy:

Zkouška náhodným buzením: Typické pro tyto zkoušky je, že vstupní buzení se řídí podle vygenerovaného akcelerogramu, tj. časovým průběhem (time-history), kterým se na zkušební vzorek aplikuje spektrum kmitů s proměnou amplitudou v daném frekvenčním pásmu. Charakter zkušební spektra odpovídá reálné simulaci zemětřesných vibrací.

Zkouška komplexním sinovým buzením: Východiskem pro tyto zkoušky může být rovněž akcelerogram, tzn. časový

průběh, avšak vstupní buzení je vytvářeno syntézou komplexu odlišných úzkopásmových signálů superponovaných na nízkouřvňové širokopásmové spektrum náhodných kmitů. Tímto způsobem je vytvářeno TRS, které musí v celé šířce požadovaných frekvencí zcela a s předepsanou rezervou (10%) obalovat RRS. Tvarový průběh může být získán řadou různých technik, které mohou být použity k vygenerování kmitů, aniž by došlo k intenzivnějšímu zatížení zkušební vzorku. Jsou definována akceptační kritéria pro zkušební spektra odezvy (TRS) ve vztahu k seizmickým spektrům odezvy a vlastnostem zkoušeného zařízení



Obrázek 5: Fotografie zkušební stolice

5. ZÁVĚR

Zajištění seizmické odolnosti je klíčové pro bezpečný provoz jaderných elektráren, protože umožňuje minimalizovat rizika spojená se seizmickými událostmi. Článek podrobně popisuje komplexní proces zajištění seizmické odolnosti jaderných elektráren, se zaměřením na metodiky a postupy používané při prokazování odolnosti jednotlivých systémů, konstrukcí a komponent (SKK). Proces zahrnuje širokou škálu činností, od stanovení seizmického zatížení až po seizmickou kvalifikaci zařízení, a vyžaduje spolupráci odborníků z různých oborů.

Článek se zabývá stanovením seizmického zadání, které zahrnuje hodnocení geologických a seizmických podmínek lokality, výběr vhodných přírodních akcelorogramů a jejich úpravu na úroveň špičkového zrychlení odpovídající maximálnímu výpočtovému zemětřesení (MVZ) nebo projektovému zemětřesení (PZ). Dále se věnuje seizmické kategorizaci stavebních objektů a technologických zařízení,

kteří jsou nezbytné pro plnění základních bezpečnostních funkcí bloku z hlediska jaderné bezpečnosti.

Seismická kvalifikace zařízení je klíčovým krokem v procesu zajištění seizmické odolnosti. Tento proces zahrnuje odhad funkčního chování na základě výpočtových metod a analýz, typové zkoušky zařízení za simulovaných podmínek zemětřesení, kombinaci zkoušek a analýz, a využití empirických údajů a zkušeností. Výsledky seizmické kvalifikace musí být zdokumentovány tak, aby poskytovaly průkaz o spolehlivosti zařízení a výkonu jejich bezpečnostních funkcí, strukturální integrity anebo stability.

V budoucnosti se zaměřím na aplikaci těchto poznatků při seizmickém posouzení konkrétní stavební konstrukce reaktorové budovy jaderné elektrárny. Tento přístup umožní detailní analýzu a ověření teoretických poznatků v praxi, což přispěje k dalšímu zlepšování bezpečnosti jaderných zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS25/039/OHK1/1T/11.

Reference

- N. M. Newmark, W. J. Hall (1978), Development of Criteria for Seismic Review of Selected Nuclear Power Plants, Nathan M. Newmark Consulting Engineering Services, NUREG/CR-098
- H. H. M Hwang (1989), Determination of HCLPF value for seismic margins study, American Association for Structural Mechanics in Reactor Technology.