

Faculty of Electrical Engineering
Regional Innovation Centre for Electrical Engineering

Dynamická odolnost vybraných komponent frekvenčního měniče INVERT 7L s vodním chlazením

Pracoviště: Energetika a průmyslové systémy,
RICE, ZČU v Plzni
Číslo dokumentu: 22190 – 030 – 2018
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Miroslav Byrtus, Ph.D.,
Ing. Martin Sirový, Ph.D.
Hlavní řešitel: Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
Počet stran: 19
Datum vydání: 18. 12. 2018
Oborové zařazení: BI – Akustika a kmity

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum
elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Miroslav Byrtus, Ph.D.
tel. 377634170
mbyrtus@rice.zcu.cz

Tento dokument vznikl s finanční podporou TAČR
v rámci projektu č. TE01020455.

Anotace

Předložená zpráva obsahuje předběžné výsledky výpočtového hodnocení seismické odolnosti střídače frekvenčního měniče INVERT 7L.

Klíčová slova

kmitání, seismicita, vibrace, výpočtové modelování, akceptační kritéria

Název zprávy v anglickém jazyce / Report title

Vibration adequacy of chosen components of frequency converter INVERT 7L with water cooling

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

The report contains preliminary results of computational assessment of seismic adequacy of a chosen part of frequency converter INVERT 7L.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

vibration, seismicity, computational modelling, limit cases, vibration testing

Seznam symbolů a zkratek

Obsah

1	ÚVOD	5
2	POSTUP KVALIFIKACE ZAŘÍZENÍ.....	6
2.1	POPIS ZAŘÍZENÍ.....	6
2.2	VÝPOČTOVÝ MODEL.....	6
3	ZATÍŽENÍ	8
3.1	PROVOZNÍ ZATÍŽENÍ - NORMÁLNÍ PROVOZNÍ PODMÍNKY (NPP)	8
3.2	SEISMICKÉ ZATÍŽENÍ (MVZ)	8
3.3	KOMBINACE ZATÍŽENÍ	9
4	VÝBĚR MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ SEISMICKÉHO PORUŠENÍ	9
5	APLIKOVANÉ METODY	9
6	APLIKOVANÁ AKCEPTAČNÍ KRITÉRIA.....	10
6.1	ÚNOSNOST RÁMU VNITŘNÍ ČÁSTI - LOKÁLNÍ REDUKOVANÁ NAPĚTÍ V TĚLESE ZAŘÍZENÍ STN EN 1993-1-1 (EUROKÓD 3) .	10
6.2	KRITÉRIUM PRO SPOJOVACÍ ŠROUBY PODLE STN EN 1993 (EUROKÓD 3)	10
7	VÝPOČTOVÝ MODEL.....	11
8	VÝPOČET SEISMICKÉ ODOLNOSTI	12
8.1	VÝSLEDKY MODÁLNÍ ANALÝZY	12
8.2	VYHODNOCENÍ KRITICKÝCH MÍST KONSTRUKCE DLE AKCEPTAČNÍCH KRITÉRIÍ	14
8.2.1	<i>Vyhodnocení napětí v konstrukci.....</i>	<i>14</i>
8.2.2	<i>Vyhodnocení spojovacích šroubů</i>	<i>15</i>
8.2.2.1	S1 – spojovací šrouby nosného rámu	16
8.2.2.2	S2 – spojovací šrouby mezi nosným rámem a kondenzátory	16
9	ZÁVĚR	17

1 Úvod

Předložená výzkumná zpráva se věnuje výpočtovému stanovení vibrační odezvy vnitřní vestavby frekvenčního měniče INVERT 7L s vodním chlazením vyvinutého ve společnosti ČKD ELEKTRONIKA. Frekvenční měnič se skládá z několika modulů. Zde byl výrobcem pro provedení analýz vytipován modul střídače.

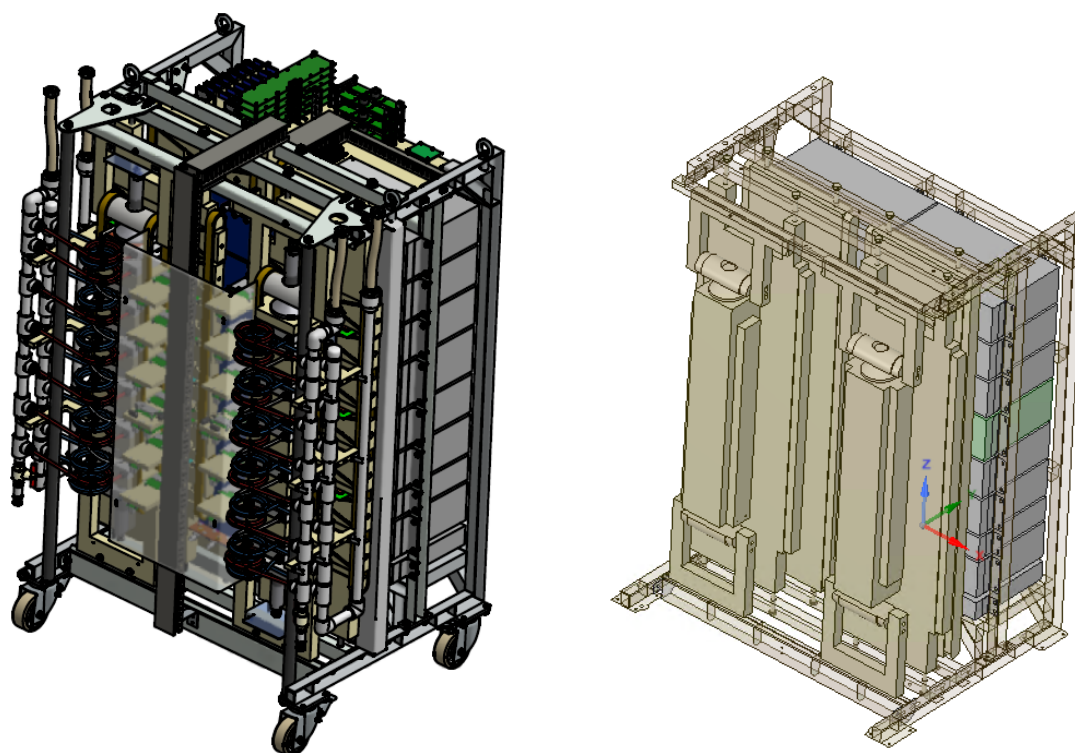
2 Postup kvalifikace zařízení

2.1 Popis zařízení

Předmětem výpočtového hodnocení je frekvenční měnič výrobce ČKD ELEKTROTECHNIKA, který se skládá z několika modulů. Zde byl výrobcem pro provedení analýz vytipován modul střídače, který je součástí uvedeného frekvenčního měniče, viz Obr 1.1.

Jedná se o strukturálně relativně složité zařízení, které obsahuje jak strojní části konstrukce, tak prvky zahrnující výkonovou část (IGBT modulu a sendvičové konstrukce).

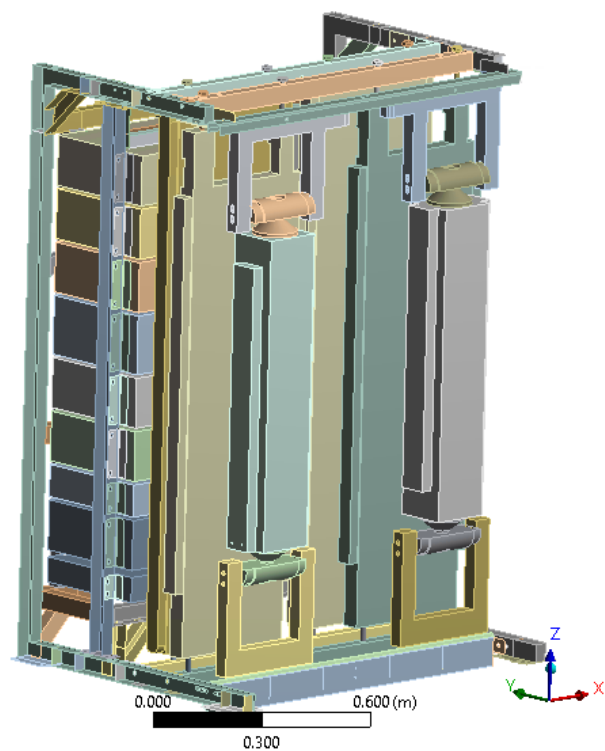
Veškeré výpočtové simulace tedy byly provedeny na zjednodušeném modelu výsuvné části, která je uvedena na Obr. 1.1.



Obr. 2.1 Geometrický model výsuvné části: původní (vlevo) a zjednodušený model (vpravo).

2.2 Výpočtový model

Pro provedení požadovaných výpočtů byla při tvorbě výpočtového modulu provedena řada konzervativních zjednodušení konstrukce ve smyslu zanedbání zejména elektronických součástí a různých elektrických propojení, která na výsledné dynamické chování konstrukce mají zanedbatelný vliv. Dále byly ve výpočtovém modelu zanedbány veškeré části související s vodním chlazením modulu, tj. rozvody chladiva. Tepelné výměníky jsou součástí IGBT modulů, které jsou v modelu uvažovány. Naopak jako klíčové se z pohledu dynamického chování jeví rám nosné konstrukce a pak sada kondenzátorů, jejichž hmotnost významně přispívá k celkové hmotnosti, a pak sendvičové konstrukce včetně IGBT modulů. Výpočtový model je zobrazen na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Geometrický model výsuvné části: původní (vlevo) a zjednodušený model (vpravo).

3 Zatížení

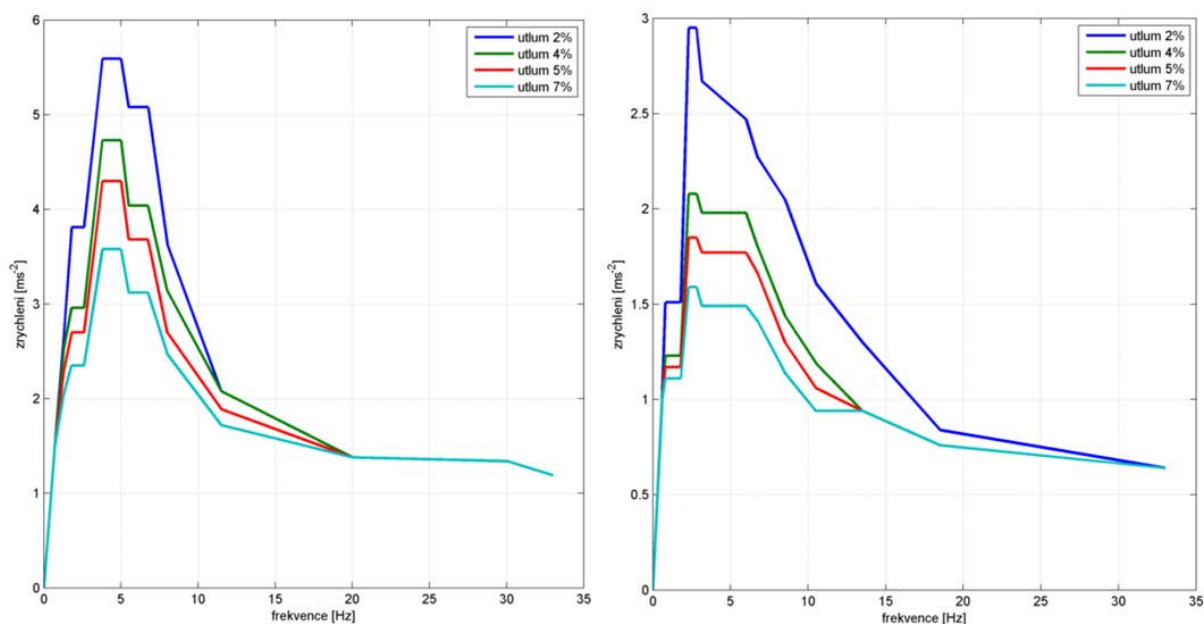
3.1 Provozní zatížení - normální provozní podmínky (NPP)

Bylo uvažováno následující provozní zatížení:

- zatížení vlastní tíhou.

3.2 Seismické zatížení (MVZ)

Seismické zatížení je dáno spektry odezvy zrychlení. Aplikovaná spektra odezvy pro horizontální a vertikální směr buzení jsou uvedena na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Zadání kinematického buzení ve formě spektrogramů zrychlení v horizontálním směru (vlevo) a ve vertikálním směru (vpravo).

Poznámka: Jako alternativa zůstává tvar spektra dle Bellcore GR-63-CORE (metodika pro rozvaděčové skříně), které bude dále použito jako výchozí spektrum pro výpočtové stanovení kapacity zařízení.

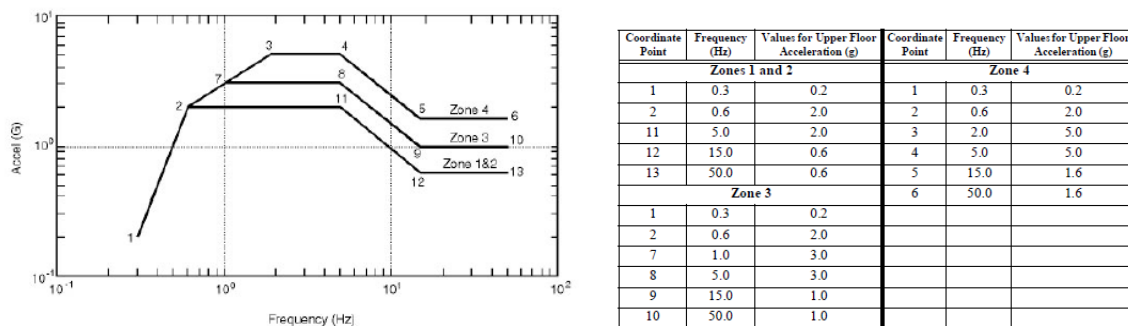


Figure 5-15. Required Response Spectra

Obr. 3.2 Zadání kinematického buzení ve formě spektrogramů dle dokumentu Bellcore GR-63-CORE.

3.3 Kombinace zatížení

Pro výpočet je uvažována kombinace zatížení uvedená v Tab 3.1.

Kombinace	Provozní zatížení (NPP)	Seizmické zatížení (MVZ)
1	1,00	$\pm 1,00$

Tab 3.1 Vyhodnocení výsledného redukovaného napětí v kritických místech

4 Výběr možných způsobů seizmického porušení

Jako možný způsob porušení se uvažuje:

- překročení únosnosti v konstrukčních prvcích (nosný rám, šroubové spoje),
- napětí v konstrukci,
- vedení vodního chlazení - neřešeno,
- spoje výkonových součástí – neřešeno,
- elektronika - neřešeno.

5 Aplikované metody

Pro výpočet odezvy na daná zatížení byly aplikovány tyto metody

- ekvivalentní statická analýza,
- modální analýza,
- metoda spektra odezvy.

6 Aplikovaná akceptační kritéria

6.1 Únosnost rámu vnitřní části - lokální redukováná napětí v tělese zařízení STN EN 1993-1-1 (Eurokód 3)

Podle dokumentu STN EN 1993-1-1 (Eurokód 3) [1] výsledná redukováná napětí musí splňovat následující akceptační kritérium

$$\sigma \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa},$$

kde

- σ vypočtené redukováné místní napětí (von Mises),
 f_{yk} charakteristická mez kluzu materiálu při provozní teplotě,
 γ_{M1} dílčí součinitel spolehlivosti materiálu.

6.2 Kritérium pro spojovací šrouby podle STN EN 1993 (Eurokód 3)

Šrouby namáhané kombinací tahu a smyku musí dle STN 1993-1-8 Tab. 3.4 splňovat následující akceptační kritérium

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,$$

kde

- $F_{v,Ed}$ návrhová smyková síla ve šroubu,
 $F_{v,Rd}$ návrhová únosnost ve smyku šroubu,
 $F_{t,Ed}$ návrhová tahová síla ve šroubu,
 $F_{t,Rd}$ návrhová tahová únosnost.

Návrhová únosnost ve smyku šroubu $F_{v,Rd}$ a návrhová tahová únosnost šroubu $F_{t,Rd}$ jsou dle [1] definovány následovně

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_S}{\gamma_{M2}},$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_S}{\gamma_{M2}},$$

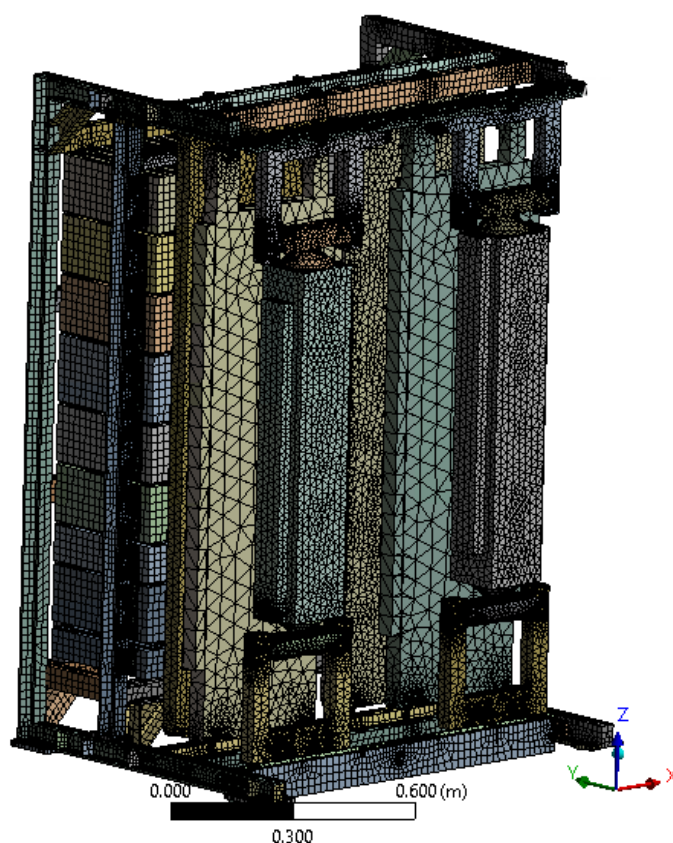
kde

- $\alpha_v = 0,5$ redukční faktor dle [1] Tab. 3.4, pro třídu oceli 4.8,
 $\alpha_v = 0,6$ redukční faktor dle [1] Tab. 3.4, pro třídu oceli 5.6, 8.8,
 $\gamma_{M2} = 1,25$ dílčí součinitel spolehlivosti šroubu dle [1] Tab. 5.1,

$k_2 = 0,9$ redukční faktor dle [1] Tab. 3.4,
 f_{ub} mez pevnosti materiálu šroubu,
 A_s průřezová plocha šroubu.

7 Výpočtový model

Výpočtový model byl vytvořen metodou konečných prvků. Šroubové spoje byly modelovány pomocí vazeb. Pro zjednodušení byly moduly IGBT a sendvičové konstrukce modelovány jako objemová tělesa. Model s MKP sítí je zobrazen na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Výpočtový model konstrukce

8 Výpočet seizmické odolnosti

8.1 Výsledky modální analýzy

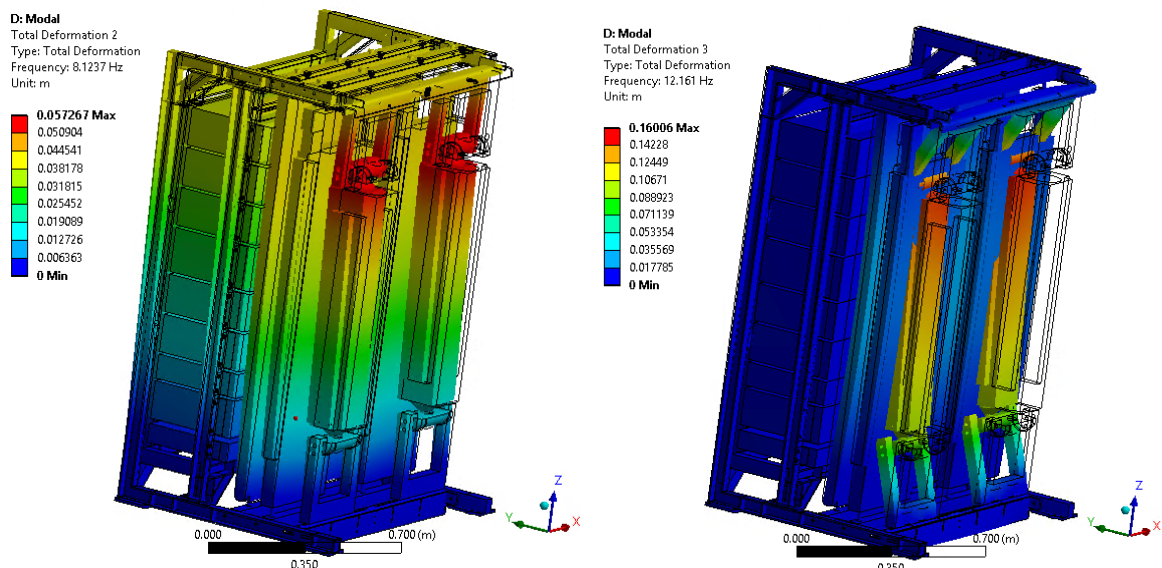
Ve frekvenčním rozsahu do 50 Hz bylo zaznamenáno celkem 22 vlastních frekvencí a odpovídajících tvarů kmitání.

Vypočtené hodnoty vlastních frekvencí do 50 Hz jsou zaznamenány v Tab. 8.1. Grafické výsledky modální analýzy jsou uvedeny na Obr. 8.1 a 8.2. Jedná se o ukázkou pěti vlastních tvarů kmitání konstrukce v pořadí, jak jsou uvedeny v Tab. 8.1.

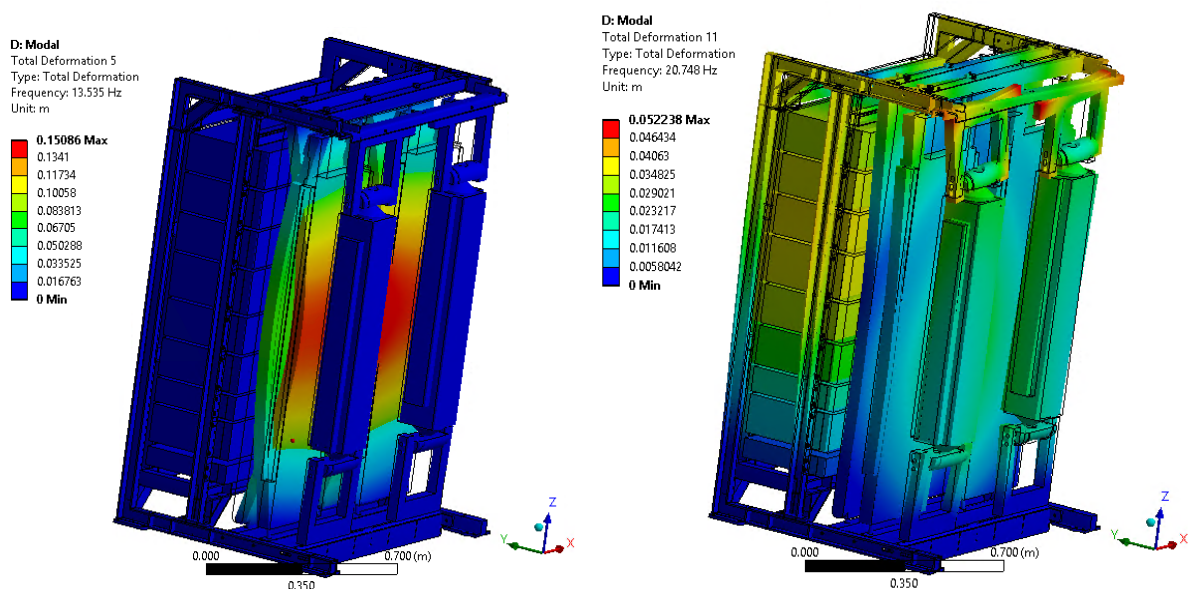
Pořadí vl. frekvence	Vl. frekvence [Hz]	Charakter kmitání
1	8.1237	Ohybový tvar celé konstrukce
2	12.161	Kmitání sendvičových staženců
3	12.976	Kmitání sendvičových staženců
4	13.535	Kmitání sendvičových staženců
5	13.907	Kmitání sendvičových staženců
6	14.023	Torzní kmitání – zkrucování konstrukce kolem svislé osy
7	14.11	Horizontální „dýchání“ konstrukce
8	16.08	Torzní kmitání – zkrucování konstrukce kolem svislé osy
9	16.637	Torzní kmitání – zkrucování konstrukce kolem svislé osy, IGBT moduly kmitají dominantně
10	20.748	Horizontální „dýchání“ konstrukce
11	24.367	Torzní kmitání staženců
12	28.265	„dýchání“ konstrukce, IGBT moduly a stažence dominantně
13	30.776	Torzní kmitání – zkrucování konstrukce kolem svislé osy, stažence kmitají dominantně
14	32.03	Ohybové kmitání konstrukce s 1 uzlem
15	32.34	Ohybové kmitání staženců s 1 uzlem
16	33.1	Torzní kmitání staženců
17	34.972	Ohybové kmitání staženců
18	36.289	Dominantní kmitání všech staženců
19	38.313	Dominantní kmitání všech staženců

20	43.257	Dominantní kmitání všech staženců a torzní pohyb konstrukce
21	43.555	Dominantní kmitání všech staženců
22	44.327	Dominantní kmitání všech staženců

Tab 8.1 Přehled vlastních frekvencí a charakteristika odpovídajících tvarů kmitání



Obr. 8.1 Ukázka dominantních vlastních tvarů kmitání, 1. vlastní tvar vpravo, 2. vlastní tvar vlevo



Obr. 8.2 Ukázka dominantních vlastních tvarů kmitání, 4. vlastní tvar vpravo, 10. vlastní tvar vlevo

8.2 Vyhodnocení kritických míst konstrukce dle akceptačních kritérií

Pro identifikovaná kritická místa byl stanoven stupeň bezpečnostní faktor F_s dle následujícího vztahu

$$F_s = \frac{C - R_{NS}}{R_S},$$

kde

C kapacita komponenty (např. dovolená napětí, dovolené posuvy aj.),

R_{NS} výsledná odezva na působící neseismická zatížení (např. napětí, posuvy aj.),

R_S výsledná odezva na seizmická zatížení MVZ.

8.2.1 Vyhodnocení napětí v konstrukci

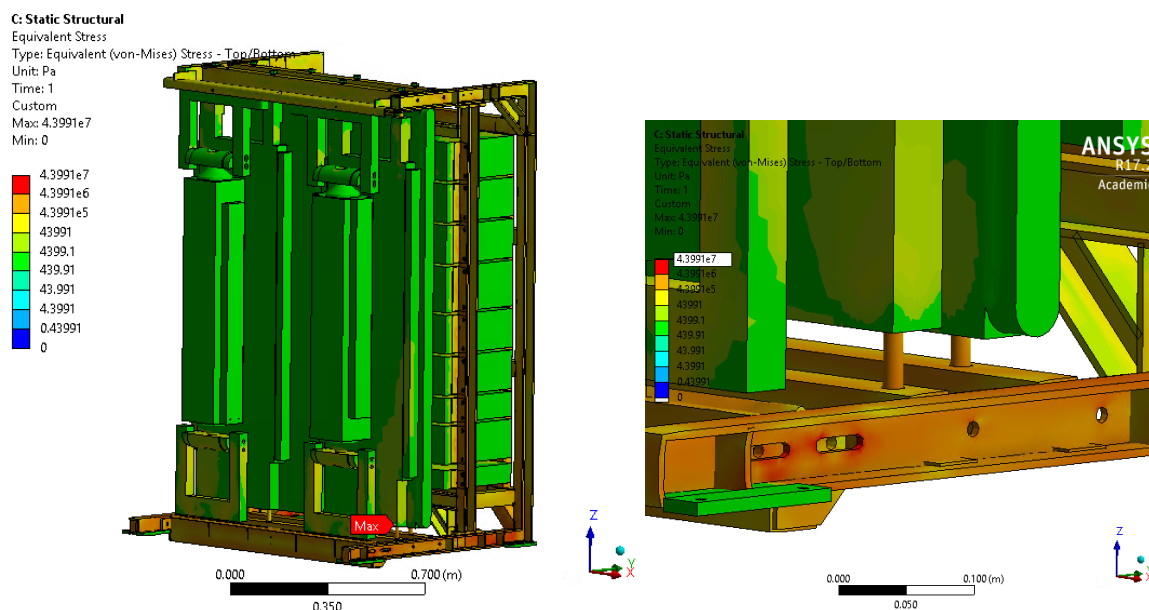
Vyhodnocení napětí rámové konstrukce podvozku je provedeno dle dokumentu STN EN 1993 (Eurokód 3) [1], přičemž platí, že výsledná redukovaná napětí v nosných částech konstrukce nesmí pro uvažovanou kombinaci zatížení překročit mezní hodnotu 235 MPa.

Bylo provedeno vyhodnocení napětí v konstrukci rámu konstrukce pro dané kombinace zatížení (kap. 4.3). Zobrazení rozložení lokálních redukovaných napětí (von Mises) od normálního provozního zatížení (NPP) je zobrazeno na Obr. 8.2. Rozložení lokálních redukovaných napětí (von Mises) od seizmického zatížení (MVZ) je zobrazeno na Obr. 8.3. Ke koncentraci napětí v konstrukci dochází pro dva uvažované zatěžovací stavy v odlišných místech konstrukce (body A a B v Obr. 8.2 a 8.3). Je tedy nutné pro obě místa vyhodnotit maximální napětí dle Tab. 8.2 a jako kritické místo zvolit to, které vykazuje nižší hodnotu bezpečnostního faktoru F_s pro kombinaci NPP+MVZ (viz Tab. 8.2).

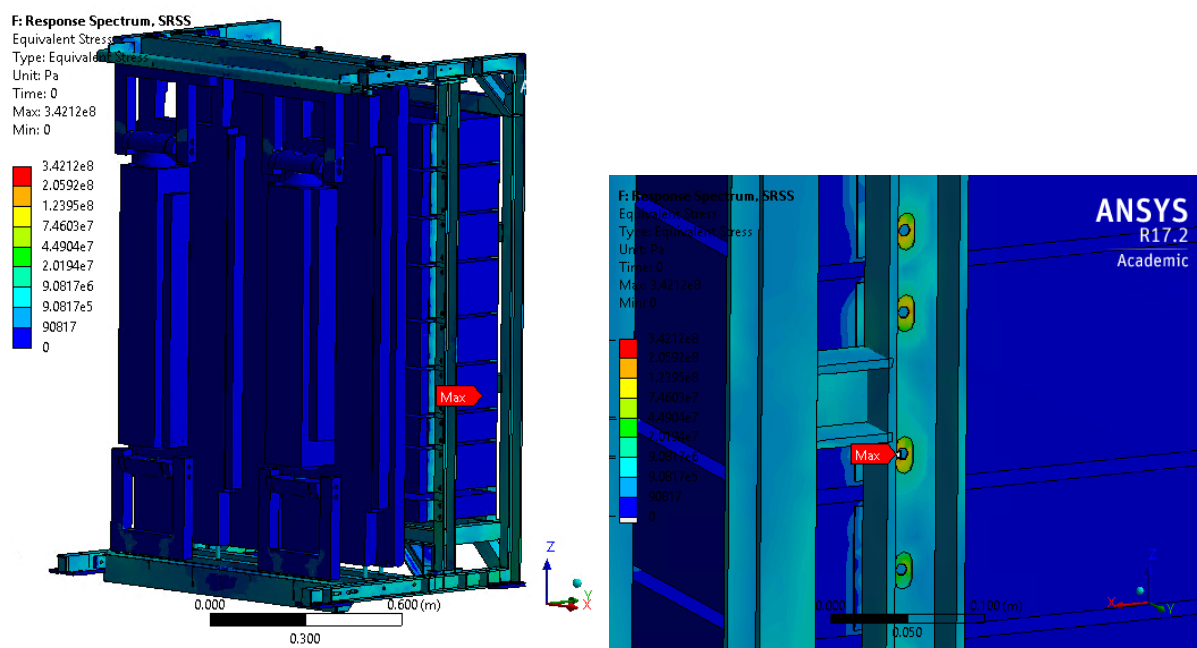
Kritické místo	Vypočtené redukované napětí [MPa] (kombinace NPP+MVZ)	Mezní napětí [MPa]	F_s
bod A	44 + 43 = 87	235	(235-44) / 43 = 4,44
bod B	14 + 342 = 356	235	(235-14) / 342 = 0,65

Tab 8.2 Vyhodnocení výsledného redukovaného napětí v kritických místech

Z vyhodnocení provedeného v Tab. 8.2 vyplývá, že kritické místo konstrukce (bod B) nevyhovuje – bezpečnostní faktor je menší než 1,0.



Obr. 8.3 Průběh lokálních redukovaných napětí v konstrukci od NPP, globální pohled (vlevo), detail kritického místa – bod A (vpravo)



Obr. 8.4 Průběh lokálních redukovaných napětí v konstrukci od MVZ, globální pohled (vlevo), detail kritického místa – bod B (vpravo)

8.2.2 Vyhodnocení spojovacích šroubů

Hodnoty vnitřních sil do připojovacích šroubů byly odečteny z výsledků na detailním MKP modelu, výsledky a vyhodnocení jsou shrnuty v Tab. 7. Kapacita spojovacích prvků v tahu a smyku je stanovena dle kap. 6.2.

Vyhodnocení bylo provedeno pro tři skupiny spojovacích prvků, přičemž jako kritický spoj byl vyhodnocen vždy ten s nejvyšším přenášeným zatížením v rámci dané skupiny.

8.2.2.1 S1 – spojovací šrouby nosného rámu

Návrhová únosnost ve smyku šroubu $F_{v,Rd}$ a návrhová tahová únosnost šroubu $F_{t,Rd}$ byly stanoveny podle vztahů výše pro následující hodnoty:

$\alpha_v = 0,6$	redukční faktor dle [6] Tab. 3.4, pro jakostní třídu šroubu 8.8
$\gamma_{M2} = 1,25$	dílčí součinitel spolehlivosti šroubu dle [6] Tab. 5.1,
$k_2 = 0,9$	redukční faktor dle [6] Tab. 3.4,
$f_{ub} = 800$	mez pevnosti materiálu šroubu [N mm ⁻²],
$A_s = 59,04$	průřezová plocha šroubu [mm ²].

8.2.2.2 S2 – spojovací šrouby mezi nosným rámem a kondenzátory

Návrhová únosnost ve smyku šroubu $F_{v,Rd}$ a návrhová tahová únosnost šroubu $F_{t,Rd}$ byly stanoveny podle vztahů výše pro následující hodnoty:

$\alpha_v = 0,6$	redukční faktor dle [6] Tab. 3.4, pro jakostní třídu šroubu 8.8
$\gamma_{M2} = 1,25$	dílčí součinitel spolehlivosti šroubu dle [6] Tab. 5.1,
$k_2 = 0,9$	redukční faktor dle [6] Tab. 3.4,
$f_{ub} = 800$	mez pevnosti materiálu šroubu [N mm ⁻²],
$A_s = 37,5$	průřezová plocha šroubu [mm ²].

Spoj	Typ šroubu	$F_{v,Ed}$ [kN]	$F_{t,Ed}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]	$F_{t,Rd}$ [kN]	Jednotkový posudek
S1	M10	1,7	9,7	22,8	34,2	$0.27 < 1$
S2	M8	4,4	3,6	14,4	21,6	$0.42 < 1$

Tab 8.3 Vyhodnocení výsledného redukovaného napětí v kritických místech

Z vyhodnocení provedeného v Tab. 8.3 vyplývá, že spojovací prvky jsou vyhovující - součinitel bezpečnosti je vždy nižší než 1,0.

9 Závěr

V této zprávě bylo provedeno typové zhodnocení pevnosti a seizmické odolnosti hlavních nosných konstrukčních částí.

Dle použitých akceptačních kritérií byly nalezeny kritická místa konstrukce, které těmto kritériím nevyhovují. Je tedy nutné provést úpravu konstrukce v daných místech.

Doporučení pro zajištění seizmické odolnosti:

- kotvení zařízení do základové konstrukce (návrh bude doplněn do finální zprávy, dle diskuze – možnosti výrobce),
- navýšení kapacity spojovacích prvků mezi nosným rámem a kondenzátory (bude doplněno do finální zprávy dle diskuze – možnosti výrobce).

Vzhledem k zjednodušením, která byla ve výpočtovém modelu přijata, by bylo vhodné provést vibrační test vybraných komponent a to následovně:

- experimentální stanovení základních charakteristik IGBT modulů a staženců
 - o provedení statického zatěžovacího testu (zjištění průměrovaných materiálových vlastností, vztah mezi velikostí působících sil a odezvou),
 - o zjištění vlastních frekvencí včetně zesílení odezvy,
 - o zjištění odezvového spektra komponenty na dané spektrum buzení (např. Bellcore).

Literatura

- [1] STN EN 1993-1-1 „Eurokód 3. Navrhování ocelových konstrukcí“.
- [2] Bellcore GR-63-CORE
- [3] konstrukční podklady frekvenčního měniče INVERT 7L
- [4] Ansys 17.2. User manual.

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
0	Všechny	Draft dokumentu	18.12.2018	M.Byrtus