

D 201

HL. PROJEKTANT ING. HURYTA	ZODP. PROJEKTANT ING. HURYTA	VYPRACOVAL ING. KOLÁČEK, Ph.D.	KONTROLOVAL ING. HURYTA	<div> HURYTA[®] s.r.o. STATIKA A PROJEKTOVÁNÍ STAVEB BRNO, STAŇKOVA 557/18a tel.: 541 420 711 e-mail: lhuryta@huryta.cz</div>	
MÍSTO STAVBY	BŘECLAV, U SLOVÁCKÉHO VESLAŘSKÉHO KLUBU				
INVESTOR	MĚSTO BŘECLAV, NÁM. T. G. MASARYKA 3, 690 81 BŘECLAV				
AKCE LÁVKA PRO PĚŠÍ A CYKLISTY PŘES DYJI V BŘECLAVI U SLOVÁCKÉHO VESLAŘSKÉHO KLUBU D.1.2.201 LÁVKA				DATUM	LEDEN 2024
				FORMÁT	105 A4
				STUPEŇ	SLOUČENÉ ÚZEMNÍ A STAVEBNÍ POVOLENÍ
				ZAK. Č.	H15073
				MĚŘÍTKO	
VÝKRES DYNAMICKÝ VÝPOČET NOSNÉ KONSTRUKCE				Č. SOUPRAVY	Č. VÝKRESU
					D.1.2.201.12

**Lávka pro pěší a cyklisty
přes Dyji v Břeclavi u Slováckého
veslařského klubu
HS122254131**

Objekt D 201 – Lávka

Objednatel: HURYTA s.r.o., Statika a projektování staveb
Staňkova 557/18a, 602 00 Brno
IČ: 25569155, DIČ CZ25569155

Zodpovědný řešitel: Ing. Jan Kolářček, Ph.D.

Pracoviště: Ústav betonových a zděných konstrukcí,
Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně
Veveří 331/95, 602 00 Brno
IČ: 00216305 / DIČ: CZ 00216305

Datum vyhotovení: Brno, 31. 03. 2023

Ing. Jan Kolářček, Ph.D.
odpovědný řešitel

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.
vedoucí ÚBZK

Lávka pro pěší a cyklisty přes Dyji v Břeclavi u Slováckého veslařského klubu

HS122254131

Objekt D 201 – Lávka

Dynamická analýza nosné konstrukce

Zodpovědný řešitel:

Ing. Jan Koláček, Ph.D.

Zpracovatel:

Ing. Jan Koláček, Ph.D.

doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

Datum vyhotovení:

03/2023

OBSAH

1. Úvod.....	6
1.1 Předmět výpočtu	6
1.2 Použité podklady, normy, literatura, software.....	6
2. Popis objektu.....	8
2.1 Identifikační údaje	8
2.2 Základní údaje o mostu	8
2.3 Popis území stavby	9
2.4 Všeobecný popis mostu	9
2.5 Příčný a podélný řez lávkou.....	10
3. Popis výpočtového modelu.....	12
3.1 Popis modelu.....	12
3.2 Postup výstavby	13
3.3 Materiálové vlastnosti	13
3.4 Průřezové charakteristiky	14
3.5 Popis modelů v příloze.....	19
4. Dynamické analýza a limitní hodnoty.....	20
5. Porovnání výsledků a vyhodnocení	22
5.1 Modální analýza	22
5.2 Harmonická analýza	23
6. Závěr a doporučení	25
7. Přílohy.....	26
7.1 Výpočtový model.....	26
7.2 Modální analýza modelu 01	30
7.3 Modální analýza modelu 02	48
7.4 Harmonická analýza modelu 01	66
7.5 Harmonická analýza modelu 02	85

1. ÚVOD

1.1 Předmět výpočtu

Podstatou dynamického výpočtu navrhované lávky pro pěší přes řeku Dyji v Břeclavi je určení základních dynamických parametrů mostní konstrukce – vlastní tvary, vlastní frekvence a dynamická odezva na harmonické buzení – stanovení maximálního posunutí, rychlosti a zrychlení. Součástí závěrů je ji zhodnocení z hlediska nutnosti použití tlumiče kmitání. Statická analýza zahrnující posouzení jednotlivých prvků nosné konstrukce i jejího založení podle platných norem není předmětem uváděného výpočtu.

V průběhu návrhu lávky bylo na základě prováděných dynamických analýz několikrát změněno konstrukční uspořádání příčného řezu lávky. Nejprve byl objednatelem dodán příčný řez o volné šířce 2,5 m a celý příčný řez byl tvořen pouze ocelovými profily. Předložená varianta byla z hlediska dynamické analýzy nevyhovující, protože docházelo k rezonanci vodorovného a svislého kmitání a velikost zrychlení několikanásobně převyšovala limitní hodnoty. Bylo provedeno několik konstrukčních úprav, jako spojení visutého lana s mostovkou v polovině rozpětí (tzv. „center lock“), spojení horního profilu hlavního příhradového nosníku s pylonem u opěr, ztužení mostovky v příčném směru a zesílení dílčích profilů ocelové mostní konstrukce. I po těchto úpravách byla nosná konstrukce z hlediska dynamického chování nevyhovující. Posuzovateli bylo doporučeno ponechat ocelové příhradové parapetní nosníky a mezi ně vybetonovat železobetonovou desku. Ocelové parapetní nosníky doplněné příčníky mohou tvořit podpůrné prvky pro ztracené bednění. Následně vybetonovaná železobetonová deska zvýší celkovou tuhost konstrukce a sníží zrychlení od harmonického buzení. Nakonec objednatel byl jinými okolnostmi nucen rozšířit i samotný příčný řez o 0,5 m. Všechny výše popsané aspekty se promítly do vytvoření finální varianty, která kombinuje ocelové příhradové nosníky a železobetonovou desku mostovky.

V předkládané zprávě je uvedena pouze finální varianta předkládaná v projektu pro stavební povolení (DSP). Neuveřejněné výpočty předchozích variant jsou uloženy u zpracovatele a u objednatele.

1.2 Použité podklady, normy, literatura, software

1.2.1 Normové předpisy, knihy a sborníky

- [1] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- [2] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení
- [3] ČSN EN 1991-2 Eurokód 1, ed. 2: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou
- [4] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla
- [5] ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty
- [6] ČSN EN 1993-1-1 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla
- [7] ČSN EN 1993-2 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 2: Ocelové mosty

- [8] ČSN EN 1997-1 Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla
- [9] ČSN 73 0037 Zemní tlak na stavební konstrukce
- [10] ČSN 73 6221 Prohlídky mostů pozemních komunikací
- [11] ČSN 73 6222 Zatížitelnost mostů pozemních komunikací
- [12] ČSN ISO 13822 Zásady navrhování konstrukcí – Hodnocení existujících konstrukcí
- [13] ČSN 73 0038 Hodnocení a ověřování existujících konstrukcí – Doplnující ustanovení
- [14] Blanchard, J., Davies, B.L., Smith, J.W. Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges, in: Proceedings of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges, Crowthorne, UK, May 19, 1977, pp. 90–106.
- [15] Guidelines for the design of footbridges, bulletin 32, CEB-FIB, listopad 2005.
- [16] Straský, J. Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges. London: Thomas Telford Publishing, 2005. 232 stran. ISBN: 0 7277 3282 X.
- [17] Design of Lightweight Bridges for Human Induced Vibrations, JRC, First Edition, May 2009.
- [18] Vůjtek, J., Žitný, J., Navrhování lávek citlivých na dynamické účinky chodců, Praha, Rozvojový projekt MŠMT, prosinec 2018.

1.2.2 Software

- [19] Program ANSYS 2021 R2
- [20] MS Word, Excel, Rhinoceros
- [21] AUTOCAD 2020

1.2.3 Projektová dokumentace předaná zadavatelem

Pro dynamické posouzení lávky pro pěší přes řeku Dyji v Břeclavi byly použity níže uvedené podklady předané objednavatelem v průběhu řešení:

- [22] Šmerda, J., Huryta, L.: Statický výpočet: Lávka pro pěší a cyklisty přes Dyji v Břeclavi u Slováckého veslařského klubu, 10/2017.
- [23] Šmerda, J.: Výpočtový model v programu SCIA a vybrané výkresy ve stupni DSP, 10/2022.
- [24] PFEIFER: Full locked cable - GALFAN, dostupné on-line na <https://www.pfeifer.info/cs/home/>

2. POPIS OBJEKTU

2.1 Identifikační údaje

Stavba:	Lávka pro pěší a cyklisty přes Dyji v Břeclavi u Slováckého veslařského klubu
Objekt:	D 201 Lávka
Název mostu:	Lávka pro pěší a cyklisty přes Dyji v Břeclavi u Slováckého veslařského klubu
Místo stavby:	Břeclav, říční km 23,32326 k.ú. Břeclav, p.č. 3750/3, 6181, 6185, 373/8, 2516/2
Stavebník:	Město Břeclav
Správce mostu:	Odbor rozvoje a správy, Nám. T. G. Masaryka 42/3, 690 81 Břeclav IČ: 00283061 DIČ: CZ00283061
Zpracovatel projektu:	HURYTA s.r.o. Staňkova 557/18a, 602 00 Brno Společnost je zapsána u Krajského soudu v Brně Spisová značka: oddíl C, vložka 34302 IČ: 25569155 DIČ: CZ25569155
Zodpovědný projektant:	Ing. Ladislav Huryta autorizovaný inženýr pro obor Mosty a inženýrské konstrukce ČKAIT 1000887
Pozemní komunikace:	stezka pro pěší a cyklisty
Předmět křížení:	řeka Dyje
Staničení:	přemostňované překážky: km 23,32326
Úhel křížení:	přibližně 76,5°
Volná výška pod lávkou:	min. 0,5 m nad hl. Q_{100}

2.2 Základní údaje o mostu

Jedná se o lávku pro pěší a cyklistický provoz.

Délka přemostění:	59,2 m
Délka lávky:	75,033 m
Délka nosné konstrukce:	67,0 m
Rozpětí pole:	60,50 m

Šikmost lávky: k	konstrukce lávky je kolmá, úhel křížení s řekou cca 76,5°
Volná šířka lávky:	3,0 m mezi bezpečnostními prvky
Šířka lávky v úrovni mostovky:	3,70 m
Výška lávky nad terénem u opěry:	2,0 až 3,2 m
Výška lávky nad hladinou Qn:	asi 4,70 m
Výška nad max. plavební hladinou:	min. 4,00 m
Stavební výška:	0,300 m
Plocha lávky:	$3,00 \times 67,0 = 201,0 \text{ m}^2$
Celková plocha lávky:	$3,70 \times 67,0 = 247,9 \text{ m}^2$
Návrhové zatížení:	500 kg/m ² nebo jediné vozidlo 12 t
Zatížitelnost lávky:	normální 5,0 kN/m ² nebo jediné vozidlo 12 t, výhradní 12

2.3 Popis území stavby

Přemostňovanou překážkou je řeka Dyje v říčním km 23,32326. Hladina řeky je ovlivněna konstrukcí jezu na řece, který je asi 100 m pod osou lávky. Lávka se nachází na pozemcích v majetku Města Břeclav a ve správě Povodí Moravy, s. p., majitel Česká republika. Stavba nezasahuje na jiné pozemky a ani dočasný zábor se netýká jiných vlastníků pozemků.

Účelem stavby je vybudovat lávku pro smíšený pěší a cyklistický provoz v místě, kde je nutné propojit oba břehy řeky Dyje. Kromě pěšího a cyklistického provozu je možné lávku využít pro nouzový přejezd vozidla rychlé lékařské pomoci. Lávka spojuje oba břehy řeky Dyje, tj. pravobřežní a levobřežní stezku, umístěné na protipovodňových hrázích. Lávka je navržena tak, aby byl zachován plavební prostor šířky 20,0 m a výšky 4,0 m nad hladinou s průtokem vody $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$.

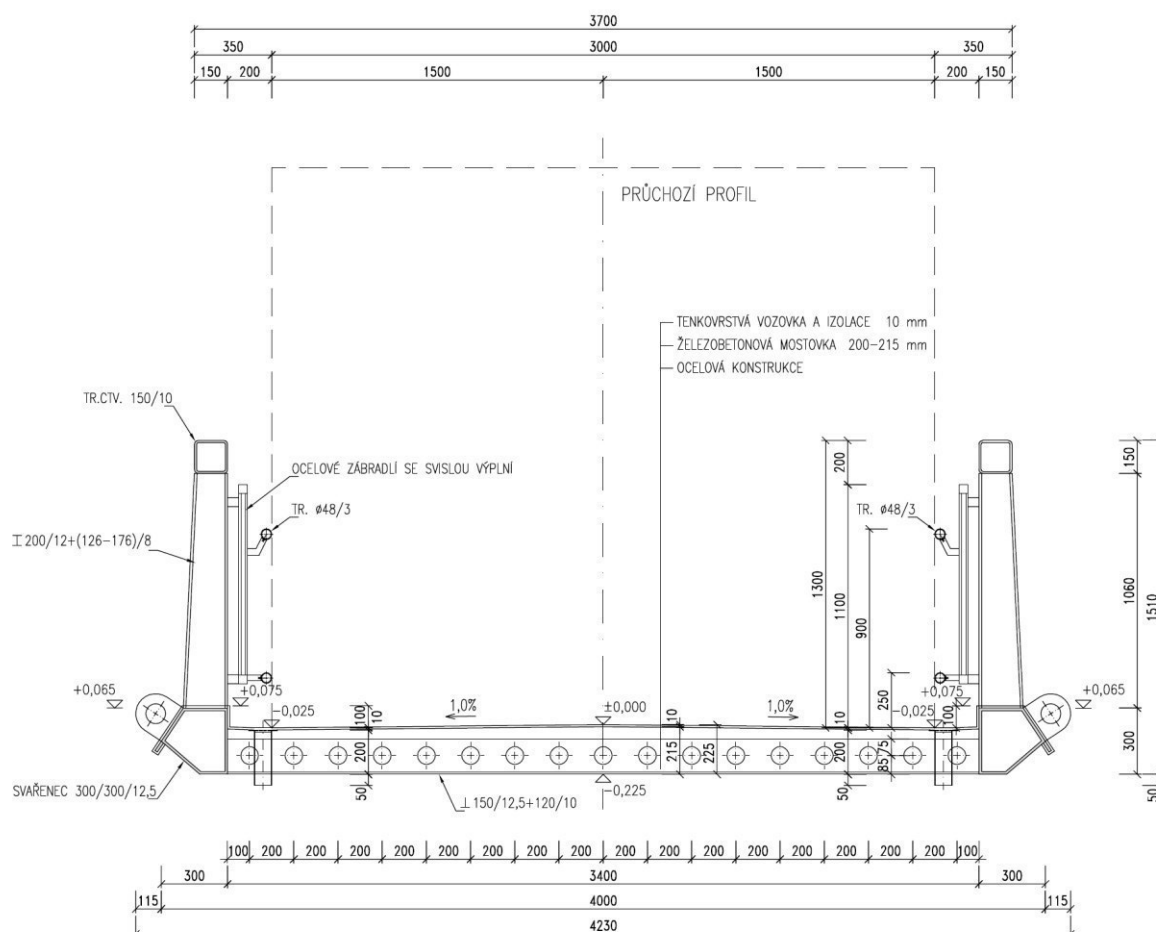
2.4 Všeobecný popis mostu

Nosná konstrukce je navržena jako ocelová visutá konstrukce zavěšená prostřednictvím tyčových závěsů na dvou skloněných visutých kabelech. V příčném směru je nosná konstrukce tvořená dvojicí ocelových příhradových nosníků a železobetonovou deskou mostovky (Obr. 1) tloušťky 200 mm. Příčnou vazbu mezi příhradovými nosníky tvoří kromě betonové desky také ocelové profily tvaru obráceného T, na které je ukládáno ztracené bednění pro následnou betonáž desky. Dolní pásnice parapetního příhradového nosníku je tvořena svařeným profilem pětiúhelníkového tvaru výšky a šířky 300 mm. Na horní pásnici je použit Jackl 150/150/10 mm. Svislice jsou tvořeny svařeným I profilem šířky 150 mm a proměnné výšky od 200 mm u mostovky až po 150 mm u madla zábradlí a pro diagonály je použita trubka 88,9/10 mm.

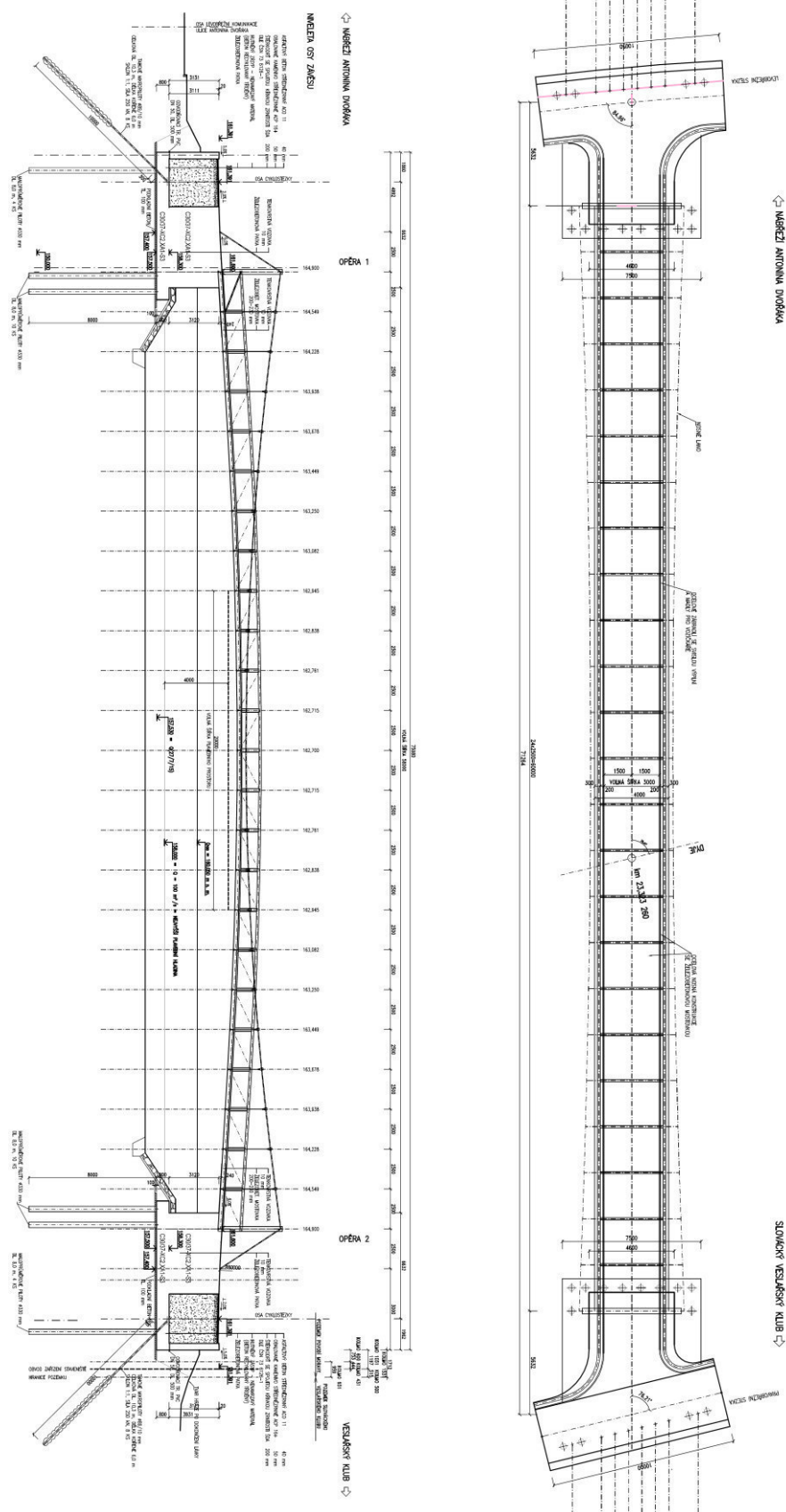
Celková výška parapetního nosníku je 1,5 m. Volná šířka lávky je navržena 3,0 m, to znamená, že lávka je navržena pro současný provoz chodců a cyklistů.

Lávka tvoří samokotvený visutý systém, kde tah z visutých kabelů je přenášen tlakovou únosností ocelobetonové mostovky. Jedná se o velmi úsporný statický systém, který se skládá z tlačných pylonů a mostovky, a tažených visutých kabelů a závěsů. Konstrukce je navržena tak, že radiální síly ve visutém kabelu vyrovnávají přes závěsy zatížení stálé a zajišťují, že v místech zavěšení jsou v mostovce nulové svislé průhyby. Mostovka pak působí jako spojitý nosník s rozpětím, která odpovídají osové vzdálenosti závěsů 2,50 m. Následkem toho jsou ohybové momenty od zatížení stálého velmi malé a mostovka je převážně tlačena. Spodní stavbu potom opěry s piloty, které na straně toku jsou tlačené a na druhé straně tažené.

2.5 Příčný a podélný řez lávkou



Obr. 1 – Příčný řez lávkou

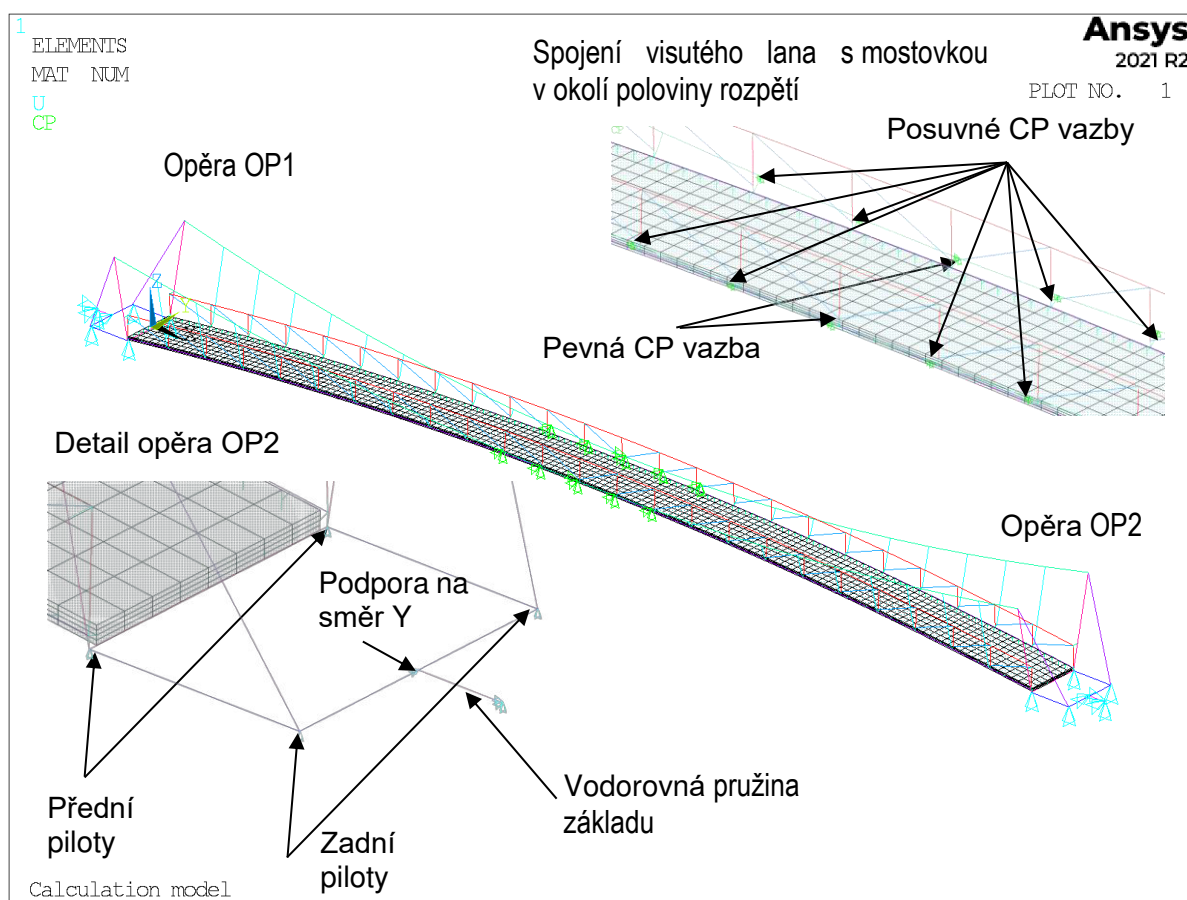


Obr. 2 – Podélný řez lávkou a půdorys dle [23]

3. POPIS VÝPOČTOVÉHO MODELU

3.1 Popis modelu

Výpočtový model byl vytvořený v programu ANSYS 2022. Jedná se o 3D brickový model doplněný prutovými prvky. Model se skládá z mostovky (brickový prvek SOLID185), pylonů, základů (všechno prvky BEAM188), visutých kabelů a závěsů (prvky LINK10), tuhých prutů mostovky a základů (prvky BEAM188), vodorovných pružin pro základy (prvek COMBIN14) a hmotných bodů simulujících stálé zatížení (prvek MASS21). Podepření základů je v místech hlav pilot řešeno pomocí kloubových podpor posuvných ve směru os X a Y. Posunutí ve směru Y je zamezeno v polovině délky spojnice zadních pilot opěr a posunutí ve směru X je ve stejném místě řešeno pomocí vodorovné pružiny.

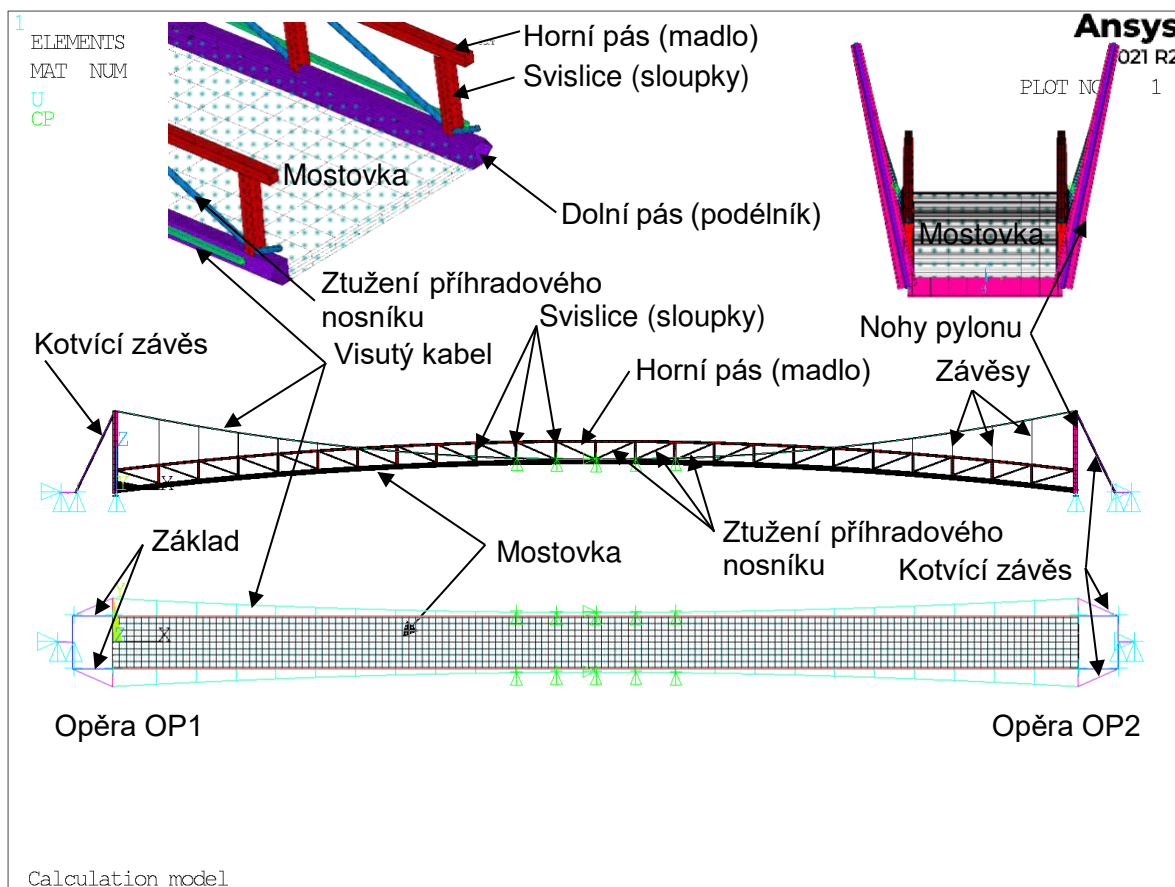


Obr. 3 - Axonometrický pohled na výpočtový model včetně podepření, detail OP2 a spojení vstutého lana s mostovkou

Krajní uzly mostovky jsou s dolním pásem příhradového parapetního nosníku spojeny pomocí tuhých prutů / vazeb. V místech závěsů jsou tuhé pruty protáhnuty až k závěsům (viz Obr. 3). Tuhým vazbám nebyla zadána vlastní tíha.

Styk prostředních 5 závěsů je pro jejich velmi malou délku řešen pomocí plechů, které jsou modelovány pomocí vazeb CP. CP vazba v polovině mostu je pevně spojena s mostovkou (tzv. „center lock“) a ostatní CP vazby jsou posuvné v podélném směru (viz Obr. 3).

Výpočet byl proveden jako geometricky nelineární s uvážením vlivu velkých deformací a s vlivem tahového zpevnění (stress stiffening).



Obr. 4 – Popis výpočtového modelu

3.2 Postup výstavby

Reálný postup výstavby je uvažován tak, že po betonáži spodní stavby se smontují příhradové parapetní nosníky na břehu Dyje. Smontované nosníky se přesunou do finální polohy na provizorní pižma, které zajistí jejich stabilitu po dobu výstavby. Příhradové nosníky se propojí příčníky, instaluje se ztracené bednění (např. panely PERMADEC), osadí se betonářská výztuž a vybetonuje se mostovka. Po osazení pylonů, závěsů a visutých kabelů se visuté kabely předeprnou a mostovka se tímto postupem odskrúží.

Postup výstavby je ve výpočtu uvažován v jednom kroku, kdy vznikne vše najednou, což odpovídá poslednímu kroku výstavby vnesení předpětí do visutých kabelů. Počáteční stav, tj. poloha visutého lana, byla spočtena pro model s neposuvným uložením opěr (svislý posun mostovky cca 2,0 mm).

3.3 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti byly stanoveny na základě vlastností skutečně použitých materiálů. Jedná se vždy o lineárně pružné materiály.

Tab. 1 – Materiálové vlastnosti jednotlivých prvků

Mostovka		Beton C30/37	
f_{ck}	30.0 MPa	γ	25.0 kN/m ³
γ_c	1.5	α	1.20E-05 m/m·K
f_{ctm}	2.9 MPa	ν	0.2
E_{cm}	33.0 GPa		

Kotvící závěsy		Ocel S235	
f_{yk}	235.0 MPa	γ	78.5 kN/m ³
γ_s	1	α	1.20E-05 m/m·K
f_u	360 MPa	ν	0.3
E	210.0 GPa	d	100 mm

Ocelový příhradový nosník a pyloi		Ocel S235	
f_{yk}	235.0 MPa	γ	78.5 kN/m ³
γ_s	1	α	1.20E-05 m/m·K
f_u	360 MPa	ν	0.3
E	210.0 GPa		

Tuhé pruty základů		Beton C20/25	
E	30.0 GPa	γ	0.0 kN/m ³
		ν	0.2

Tuhé pruty mostovky		Ocel S235	
E	210.0 GPa	γ	0.0 kN/m ³
		ν	0.3

Visuté kabely		PFEIFER PV640	
Z_{bk}	6390.0 kN	γ	82.35 kN/m ³
d	80 mm	α	1.20E-05 m/m·K
A_{p1}	4420 mm ²	ν	0.3
E	160.0 GPa		

Vodorovná pružina pro základ		k	200.0 MN/m
		γ	0.0 kN/m ³

Závěsy		Ocel S235	
f_{yk}	235.0 MPa	γ	78.5 kN/m ³
γ_s	1	α	1.20E-05 m/m·K
f_u	360 MPa	ν	0.3
E	210.0 GPa	d	20 mm

3.4 Průřezové charakteristiky

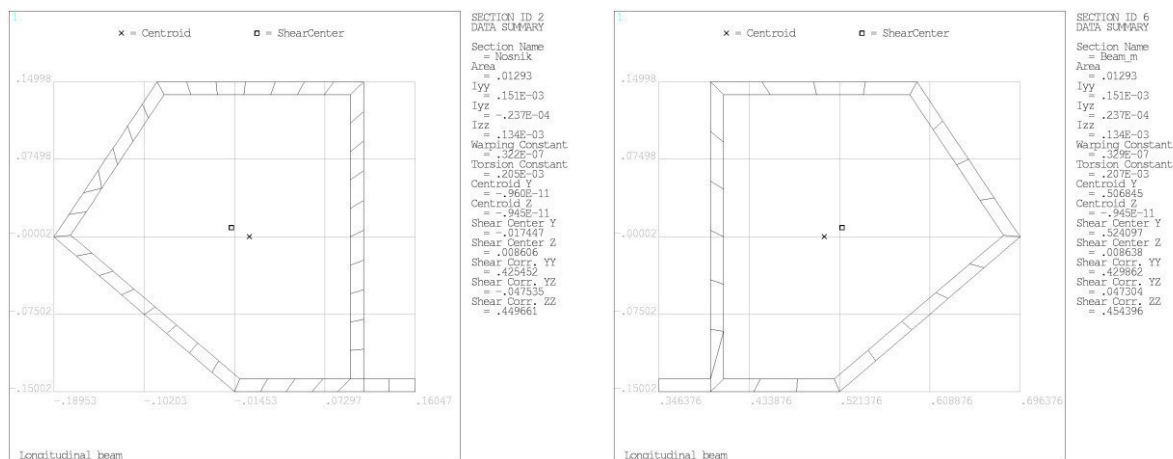
3.4.1 Mostovka

Mostovka je složena z brickových prvků celkové tloušťky 200 mm. Po výšce je tloušťka rozdělena na 4 prvky.

3.4.2 Příhradový parapetní nosník

Příhradový nosník je složen z dolního pásu (podélný nosník), horního pásu (madla), svislic (sloupů) a ztužení. Nosník je složen z plechů tloušťky 12 mm, které jsou vzájemně svařeny.

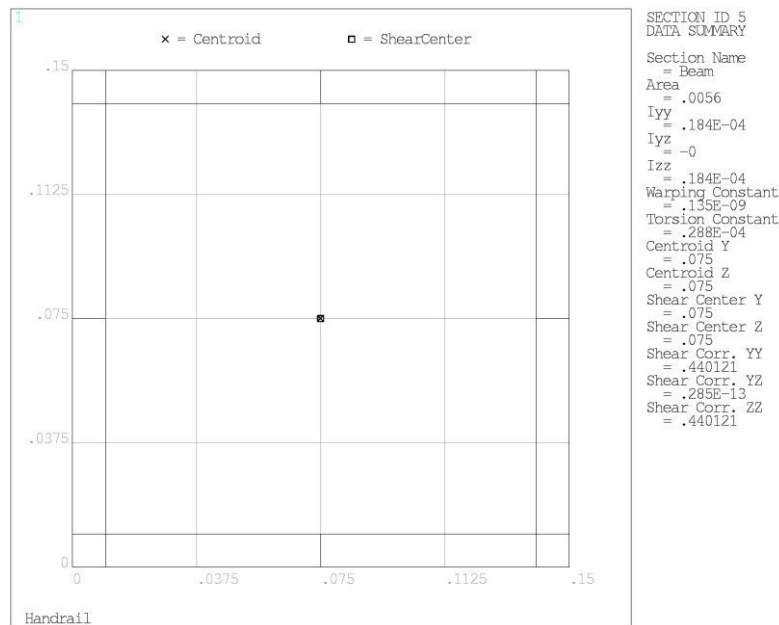
3.4.2.1 Dolní pás (podélný nosník)



Obr. 5 – Levý a pravý dolní pás příhradového nosníku (podélný nosník)

3.4.2.2 Horní pás (madlo)

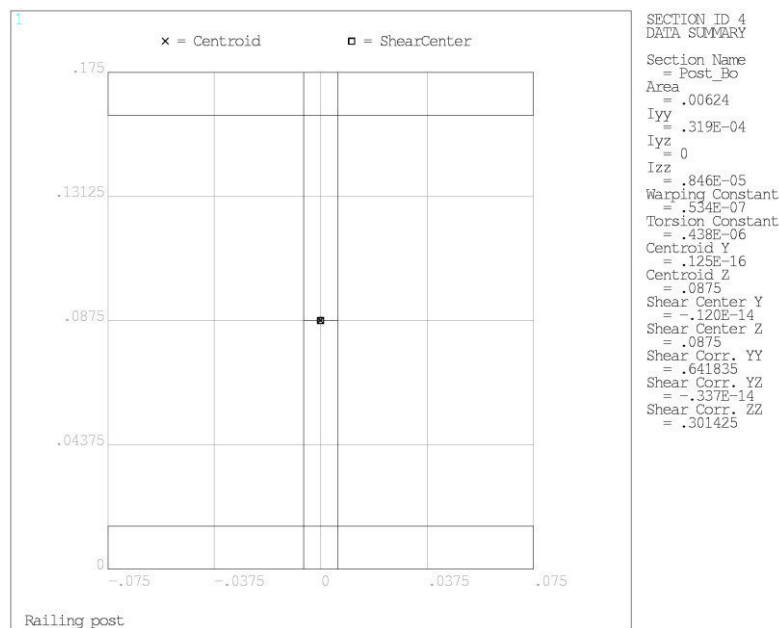
Horní pás příhradového nosníku je tvořen profilem Jackl 150/150/10.



Obr. 6 – Horní pás (madlo)

3.4.2.3 Svislice (sloupky)

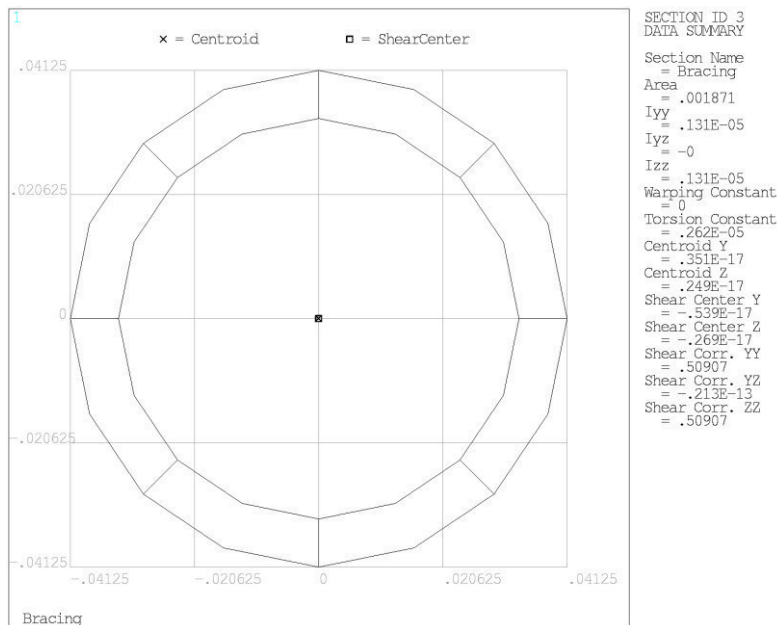
Sloupky jsou tvaru písmene I šířky 150 mm. Výška se lineárně mění z 200 mm na 150 mm. Tloušťka plechu přírub je 10 mm, tloušťka plechu stojiny je 8 mm. Do modelu byl zadán průměrný profil výšky 175 mm (náběhy byly zanedbány).



Obr. 7 – Průřez svislice (sloupku)

3.4.2.4 Ztužidla

Ztužidla jsou z trubky 88,9/10.



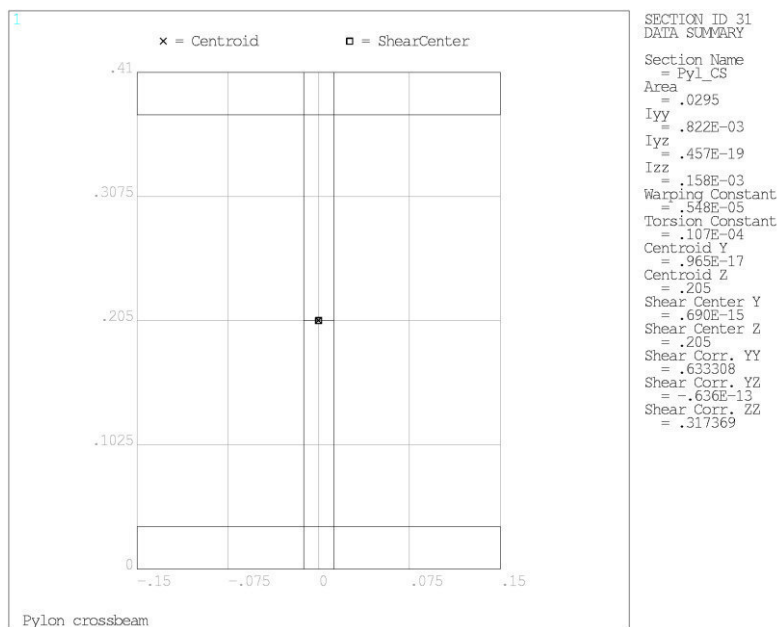
Obr. 8 – Průřez ztužidla

3.4.3 Pylon

Pylon se skládá z šikmých noh, které jsou ve spodní části spojeny příčlím.

3.4.3.1 Příčel pylonu

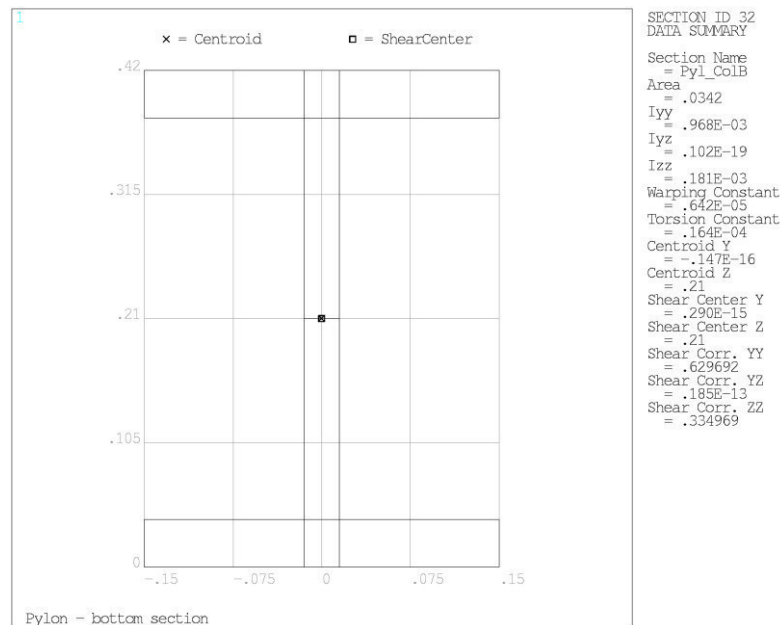
Příčel pylonu je tvaru písmene I o výšce 410 mm a šířce 300 mm. Tloušťka plechu přírub je 35 mm, tloušťka plechu stojiny je 25 mm.



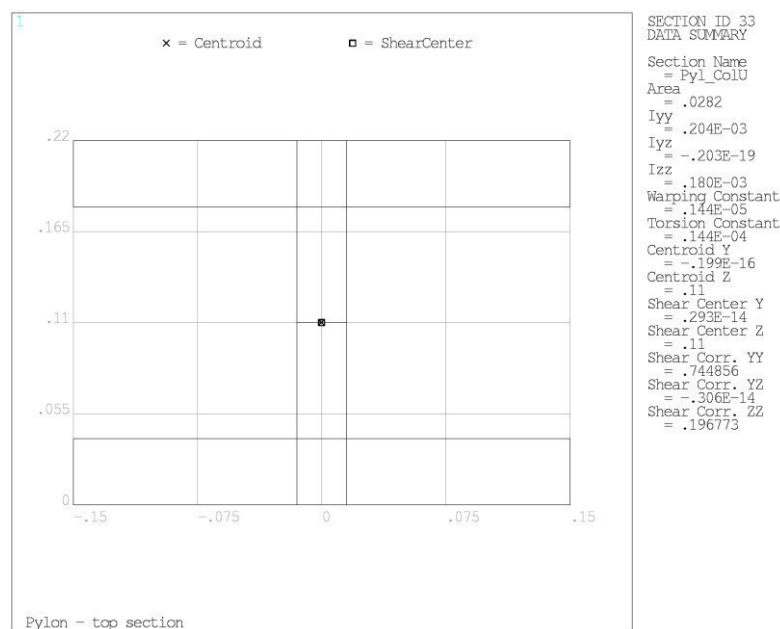
Obr. 9 – Průřez příčel pylonu

3.4.3.2 Nohy pylonu

Nohy pylonu ve tvaru písmene I se lineárně zužují směrem k hlavě pylonu. Šířka přírub je 300 mm, tloušťka 40 mm, výška se mění od 420 mm do 220 mm. Tloušťka plechu stojiny je 30 mm.



Obr. 10 – Průřez pylonu v patě

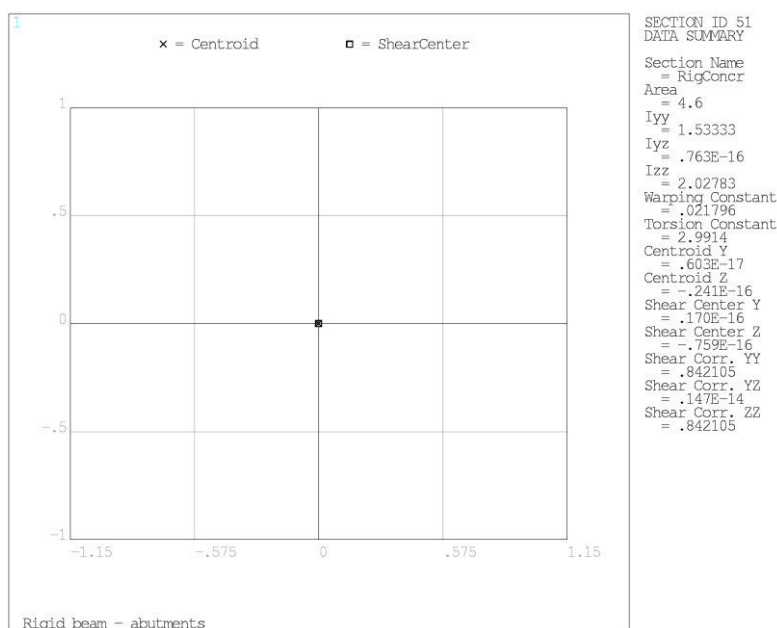


Obr. 11 – Průřez pylonu v hlavě

3.4.4 Tuhé pruty

3.4.4.1 Tuhé pruty základů

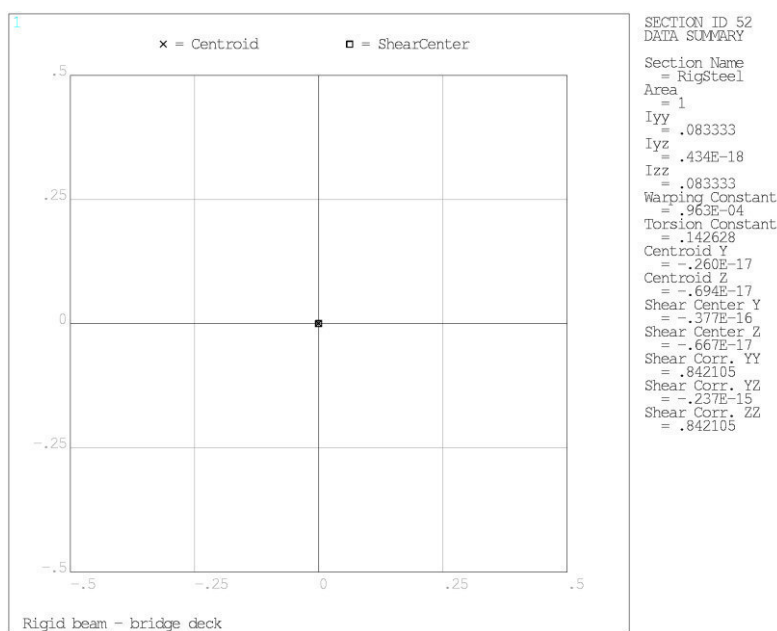
Tuhé pruty základů mají obdélníkový průřez rozměrů 2,00 x 2,30 m.



Obr. 12 – Průřez tuhého prutu základu

3.4.4.2 Tuhé pruty mostovky

Tuhé pruty základů mají čtvercový průřez rozměru 1,00 x 1,00 m.



Obr. 13 – Průřez tuhého prutu základu

3.4.5 Visuté kabely

Visutá lana od firmy PFEIFER jsou uvažována průměru 80 mm – typ PV640 viz [24]. Plocha jednoho kabelu je 4420 mm². Objemová hmotnost je navýšena na 82,35 kN/m³, čímž je vyrovnán rozdíl mezi plochou stanovenou pro průměr 80 mm (plocha kruhu) a skutečnou tabulkovou plochou z [24].

3.4.6 Závěsy a zpětné závěsy

Závěsy a zpětné závěsy jsou z tyčoviny třídy oceli S235. Průměr závěsů je 22 mm, průměr zpětných závěsů je 100 mm.

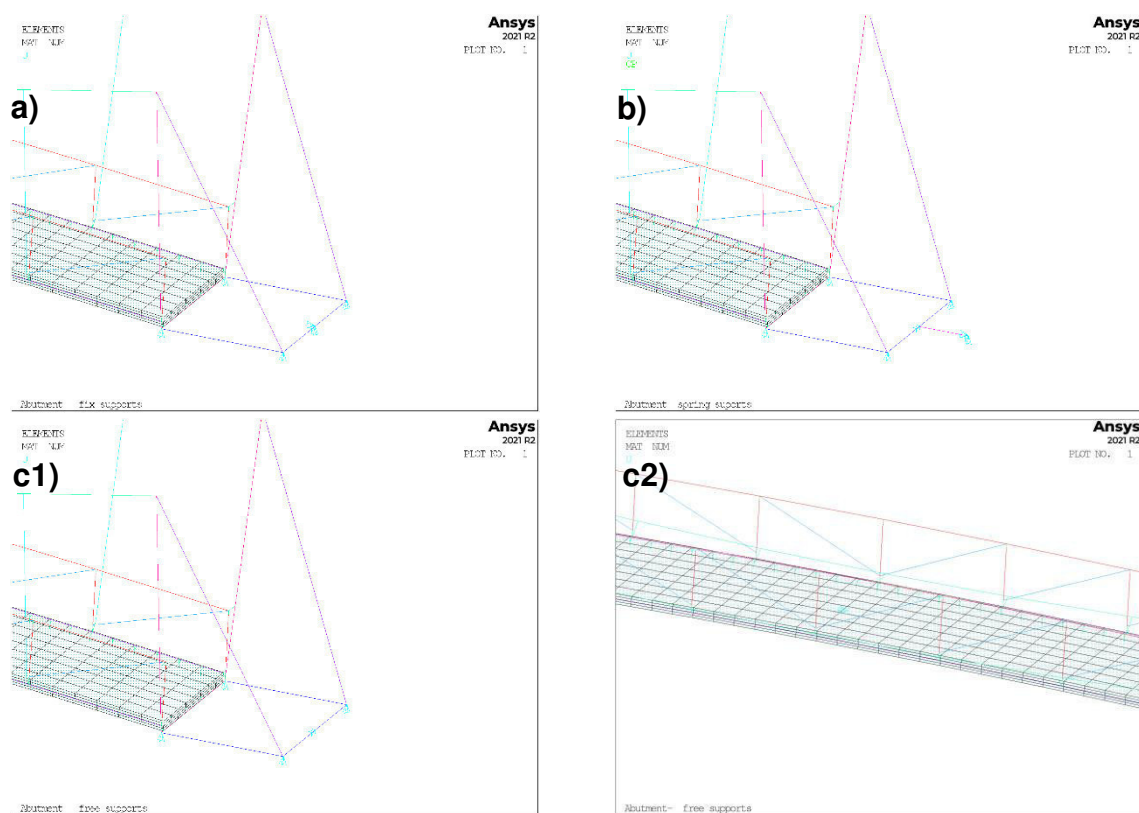
3.4.7 Vodorovná pružina

Tuhost vodorovné pružiny byla převzata z [23] hodnotou 200,0 MN/m pro celou opěru.

3.5 Popis modelů v příloze

Modely byly analyzovány pro potrhaný a nepotrhaný železobetonový průřez mostovky a pro různé způsoby podepření. Model s označením **01** je model, kde se uvažuje nepotrhaná železobetonová deska, tj. modul pružnosti je brán v plné hodnotě 33 GPa. Model s označením **02** je model, kde se uvažuje s plně potrhaným průřezem, tj. model pružnosti je třetinový – 11 GPa.

Písmeno na konci označení modelu určuje způsob podepření ve směru osy x. Označení **a** je pro model, který je v opěrách neposuvně uložen (Obr. 14a), označení **b** je pro model, který je v opěrách pružně uložen (tuhost zeminy zadána vodorovnou pružinou, Obr. 14b) a označení **c** je pro model, který je uložen volně (Obr. 14c1). Varianta c je doplněna podporou ve směru osy x v polovině rozpětí (Obr. 14c2).



Obr. 14 – Podepření modelu a) pevné ve směru osy x, b) pružné ve směru osy x, c) volné ve směru osy x – vlevo c1, podpora ux v polovině rozpětí – vpravo c2

4. DYNAMICKÉ ANALÝZA A LIMITNÍ HODNOTY

Výpočetní model byl vytvořen pouze pro dynamickou analýzu konstrukce. V souladu s objednávkou nebyl model použit pro návrh, dimenzování a posouzení konstrukce dle mezních stavů použitelnosti a únosnosti – statickou analýzu.

V dynamickém výpočtu jsou ze zatížení uvažovány pouze veškeré složky stálého zatížení – vlastní tíha všech konstrukčních prvků a ostatní stálé zatížení. Vlastní tíha byla vypočtena na základě všech použitých průřezů mostovky, pylonů, základů a visutého lana pro uvažované gravitační zrychlení o hodnotě 10 m/s^2 . Ostatní stálé zatížení je modelováno pomocí hmotného bodu MASS21. Stálé zatížení se skládá z výpočtu tíhy prvků zábradlí a povrchových vrstev mostovky.

Podle [3] mají být určeny nejprve vlastní frekvence lávky, tj. provedena modální analýza konstrukce. Pokud se některá z vlastních frekvencí lávky nachází v kritické oblasti frekvencí, které jsou definovány v národní příloze [3], musí být provedeno ověření lávky z hlediska dynamického zatížení chodci, tj. provedena harmonická analýza.

Dynamická analýza obsahuje, mimo výše zmíněné vlastní frekvence a tvary kmitání, také odhad tlumení konstrukce a výpočet vynuceného kmitání od chodců. V analýze bude ověřeno zda:

- zrychlení konstrukce je v přípustných mezích,
- je riziko vzniku „lock-in“ efektu,
- při úmyslném rozkmitání lávky (vandalismus) nedojde k poruše či havárii.

Před uvedením do provozu musí být měření ověřeny skutečné vlastní frekvence a hodnoty útlumu lávky s hodnotami získanými výpočtem. Na základě výsledků měření na skutečné konstrukci lávky je pak rozhodnuto o nutnosti instalace pohlcovače kmitání [18].

4.1.1 Modální analýza

Vlastní tvary a frekvence stanovené při modální analýze jsou závislé na celkové geometrii konstrukce, její hmotnosti (stálá zatížení) a na způsobu podepření. Výpočetní model byl tedy zatížen vlastní tíhou a ostatním stálým zatížením.

Jak bylo řečeno, pokud se některá z vlastních frekvencí lávky nachází v kritické oblasti frekvencí, musí být provedeno ověření lávky z hlediska dynamického zatížení chodci, tj. provedena harmonická analýza.

Kritické hodnoty vlastních frekvencí f [Hz] lávek z hlediska buzení provozem pěších jsou:

- pro svislé a podélné kmitání: $1,30 \leq f \leq 2,30$ [Hz]
- pro příčné kmitání: $0,50 \leq f \leq 1,20$ [Hz]

U některých nízko tlumených konstrukcí (log. dekrement útlumu $< 0,05$) může nastat buzení i působením zatížení v dalších frekvencích lidského kroku:

- pro svislé a podélné kmitání: $2,50 \leq f_i \leq 4,60$ [Hz]
- pro příčné kmitání: $2,60 \leq f \leq 3,40$ [Hz]

4.1.2 Harmonická analýza

Analýzu vlastního a vynuceného kmitání, parametr útlumu, modely zatížení chodci a vandalismem a posouzení jejich účinků dle [3] lze v ČR provést podle metodiky dle [17]. Dle tab. NA.7 [3] je zvolena třída pohody lávek pro chodce normální, což znamená následující limitní hodnoty zrychlení:

- pro svislé zrychlení $a_{z,lim} \leq 0,70 \text{ ms}^{-2}$,
- pro vodorovné zrychlení $a_{y,lim} \leq 0,20 \text{ ms}^{-2}$.

Pro ověření přípustných vibrací lávky se použije třída provozu „hustý“ podle Tab. NA.8 [3]. Ovšem pro předběžný výpočet nově navrhované konstrukce lze při harmonické analýze zvolit konzervativní do jisté míry zjednodušený přístup, při kterém se doporučuje ověřovat použitelnost lávek se základní vlastní frekvencí f až do hodnoty 5 Hz. Jako kritérium použitelnosti navrhuji, aby odezva ve zrychleních (m.s^{-2}) vyvolaná jednou osobou nepřesáhla limit $0,5\sqrt{f}$, kde f je vyjádřena v Hz [14]. Jako vhodný silový popis chůze navrhuji model, který se rezonanční sinusoidou pohybuje po mostě s rychlostí v odpovídající $0,9f$, pro délku kroku 0,9 metru. Pro základní tvar kmitu je dán výrazem [15]:

- Svislé zatížení $Q_{pv} = 180 \cdot \sin(2\pi \cdot f_v \cdot t)$ [kN] (4.1)

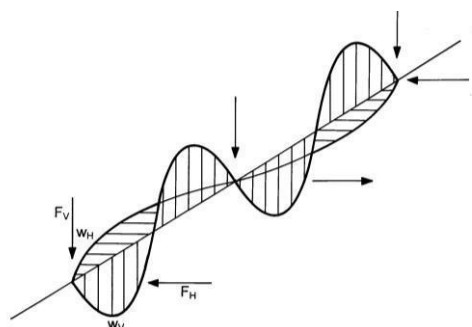
- Vodorovné zatížení $Q_{ph} = 70 \cdot \sin(2\pi \cdot f_h \cdot t)$ [kN] (4.2)

kde: f_v je svislá ohybová frekvence mostu blízká 2 Hz

f_h je vodorovná (příčná) ohybová frekvence mostu blízká 1 Hz

Jedná se o model zatížení jediným vandalem, tj. jedinou osobou pohybující se po lávce ve vlastní frekvenci lávky blízké 2 Hz [18]. Silové zatížení je při harmonické analýze postupně umístěno do míst s největší výchylkou pro sledované vlastní tvary (Obr. 101 a Obr. 102) tak, aby byl vyvozen co nejnepříznivější účinek. Silové zatížení kmitá ve frekvenčním intervalu pokrývajícím sledované nejnižší vlastní frekvence (obvykle prvních 5 až 10 vlastních frekvencí). Posuzované zrychlení se stanoví pak z hodnot při rezonanci budící síly a vlastní frekvence lávky. Předpokládaný útlum pro tuto konstrukci byl uvažován z literatury [17] hodnotou pro spřaženou ocelobetonovou konstrukci 0,6 %.

Poslední posouzení konstrukce lávky je na tzv. „lock-in“ efekt, tj. fenomén synchronizace chodce s lávkou kmitající v příčném směru. Při chůzi se těžiště chodce nepohybuje pouze svisle, ale i z jedné nohy na druhou. Frekvence pohybu těžiště lidského těla je rovna polovině frekvence lidského kroku. Dle [16] by se případy, kdy je příčná frekvence lávky rovna polovině ohybové frekvence neměly na lávkách vyskytovat, viz Obr. 15.



$$f_H \neq f_S / 2$$

f_H ...příčná frekvence

f_S ...ohybová frekvence

Obr. 15 – Vertikální a horizontální zatížení dle [16]

5. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ A VYHODNOCENÍ

Pro účely porovnání výsledků a následné vyhodnocení byla dynamická analýza pro všechny varianty modelů vložena do následujících tabulek. Všechny podrobné grafické výsledky jsou pak zobrazeny v kapitole 7.

5.1 Modální analýza

Přehled prvních pěti vlastních frekvencí [Hz] pro všechny varianty modelů jsou vypsány v tabulkách níže (Tab. 2 a Tab. 3). K uvedeným hodnotám frekvencí je ve třetím sloupci doplněn druh tvaru (P – příčný vodorovný, O – svislý ohybový, T – torzní tvar, Obr. 17). Průběh tvaru (Obr. 16) je uveden ve čtvrtém sloupci.

Z vypočtených hodnot vyplývá:

- Výpočtový model s potrhanou deskou mostovky (ŽB a vliv reologických jevů) je dle očekávání měkčí. Hodnoty vlastních frekvencí u všech jeho variant jsou nižší.
- Rozdíly mezi jednotlivými variantami každého z modelů nejsou výrazné a pro předběžný návrh konstrukce, za účelem vypracování dokumentace pro stavební povolení, jsou do jisté míry zanedbatelné.
- První vlastní frekvence jsou výrazně nižší než frekvence lidské chůze (2Hz), ale nachází se v intervalu kritických frekvencí jak pro vodorovné, tak i pro příčné kmity (kap. 4.1.1) a je tedy nutné provést harmonickou analýzu.

Tab. 2 – Prvních 5 frekvencí pro model 01

Model 01a pevné ux a Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.236	P	A	1.65	3.79	
2	2.265	O	A	4.72	0.00	
3	2.771	O	B	4.14	0.00	
4	3.879	T	A	5.55	1.69	
5	4.267	T	B	2.18	1.70	

Model 01b pružné ux a Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.217	P	A	1.65	3.70	
2	1.547	O	A	4.43	0.00	
3	2.729	O	B	4.13	0.00	
4	3.862	T	A	5.46	1.72	
5	4.054	T	B	1.30	1.10	

Model 01c volné ux a Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.203	P	A	1.65	3.79	
2	1.299	O	A	4.36	0.00	
3	2.714	O	B	4.16	0.00	
4	3.838	T	A	4.95	1.70	
5	3.850	T	B	0.00	0.00	

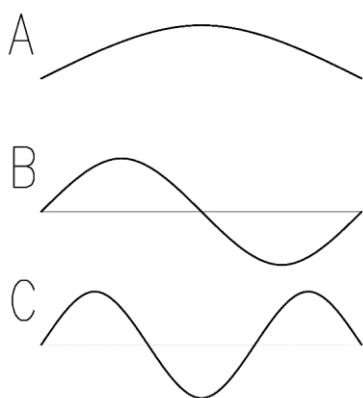
Tab. 3 – Prvních 5 frekvencí pro model 02

Model 02a pevné ux a 1/3 Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.067	P	A	1.66	3.82	
2	1.836	O	A	4.63	0.00	
3	2.632	O	B	4.14	0.00	
4	3.265	T	A	5.64	1.63	
5	3.709	T	B	3.54	2.87	

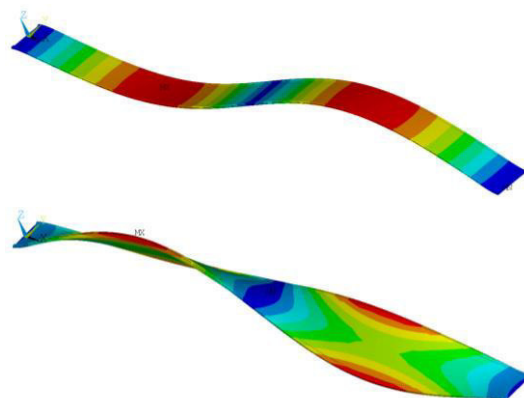
Model 02b pružné ux a 1/3 Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.045	P	A	1.66	3.82	
2	1.468	O	A	4.45	0.00	
3	2.592	O	B	4.14	0.00	
4	3.248	T	A	5.64	1.64	
5	3.657	T	B	3.39	2.74	

Model 02c volné ux a 1/3 Ecm						
pořadí	f	druh	tvar	Uz	Uy	
[-]	[Hz]	[O-P-T]	[A-B-C]	[-]	[-]	
1	1.025	P	A	1.67	3.82	
2	1.259	O	A	4.44	0.00	
3	2.571	O	B	4.17	0.00	
4	3.232	T	A	5.63	1.65	
5	3.575	T	B	2.92	2.37	

- Poměr mezi první torzní frekvencí a první ohybovou frekvencí je dostatečně vzdálený. Blíží se v literatuře doporučovanému poměru 2,5 [16].



Obr. 16 – Průběhy vlastních tvarů, A – jedna půlvlna, B – dvě půlvlny, C – tři půlvlny



Obr. 17 – Příklad druhého svislého ohybového a druhého torzního vlastního tvaru

5.2 Harmonická analýza

Přehled vypočtených a limitních zrychlení v případě svislého kmitání konstrukce je uveden a posouzen v Tab. 4, pro příčné kmitání pak v Tab. 5. Limitní hodnoty zrychlení konstrukce byly stanoveny dle [14]. Přístup podle Blanchard je v tomto případě přísnější než dovolené hodnoty uvedené v EN. Navrhovaná konstrukce lávky dle EN [3] splňuje dokonce třídu pohody „Vysoká“.

Použitý model zatížení jedinou osobou pohybující se po lávce zároveň splňuje posouzení situaci úmyslného rozkmitání lávky „vandalismus“.

Tab. 4 – Posouzení svislého zrychlení

	a_{\max} [ms ⁻²]	a_{\lim} [ms ⁻²]	f [Hz]	posudek [-]
Model 01a	0.334	0.700	2.265	VYHOVUJE
Model 01b	0.294	0.622	1.547	VYHOVUJE
Model 01c	0.286	0.570	1.299	VYHOVUJE

	a_{\max} [ms ⁻²]	a_{\lim} [ms ⁻²]	f [Hz]	posudek [-]
Model 02a	0.321	0.677	1.836	VYHOVUJE
Model 02b	0.297	0.606	1.468	VYHOVUJE
Model 02c	0.287	0.561	1.259	VYHOVUJE

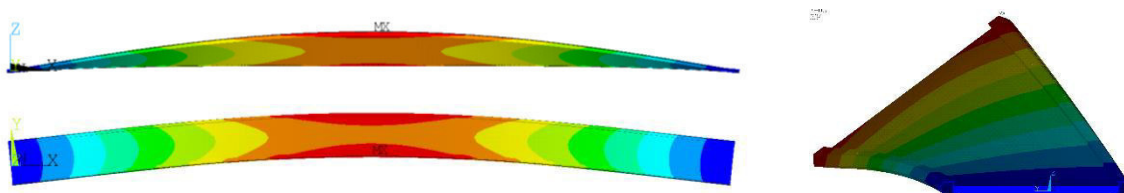
Fenomén synchronizace chodce s lávkou kmitající v příčném směru, tzv. Lock – in – efekt je vyloučen. Příčná frekvence lávky rovna polovině ohybové frekvence se na lávce v žádné variantě nevyskytuje [16].

Tab. 5 – Posouzení příčného zrychlení

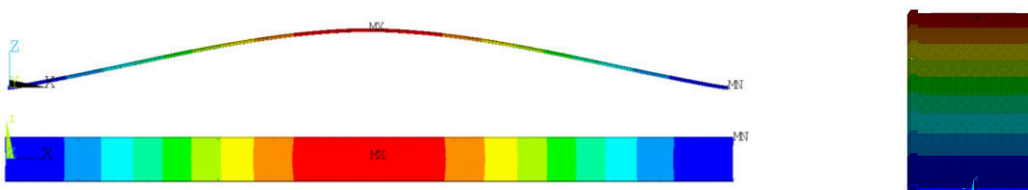
	a_{\max} [ms ⁻²]	a_{\lim} [ms ⁻²]	f [Hz]	posudek [-]
Model 01a	0.084	0.150	1.236	VYHOVUJE
Model 01b	0.084	0.150	1.217	VYHOVUJE
Model 01c	0.084	0.150	1.203	VYHOVUJE

	a_{\max} [ms ⁻²]	a_{\lim} [ms ⁻²]	f [Hz]	posudek [-]
Model 02a	0.085	0.145	1.067	VYHOVUJE
Model 02b	0.085	0.143	1.045	VYHOVUJE
Model 02c	0.085	0.142	1.025	VYHOVUJE

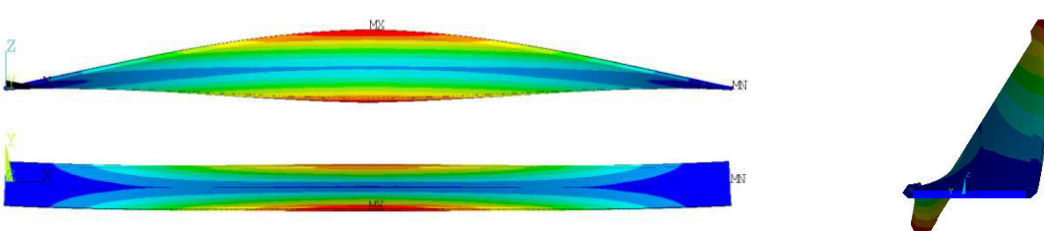
Na základě zkušeností z provedených dynamických výpočtů a s ohledem na skutečnost, že zatížení lidmi při přechodu po konstrukci (dynamické zatížení) nevyvodí téměř žádné posuny v založení, lze konstatovat, že nejbližše skutečnosti bude pravděpodobně model s označením a – pevné podepření ve směru osy x. Dále předpokládáme, že v čase životnosti bude ŽB deska potrhána trhlinami. První vlastní tvary a frekvence (svislý ohybový, vodorovný příčný a torzní tvar) pro model **02a** s pevnými podporami a potrhanou ŽB deskou jsou uvedeny na obrázcích níže (Obr. 18, Obr. 19 a Obr. 20).



Obr. 18 – První vodorovný příčný tvar, $f = 1,066$ Hz



Obr. 19 – První svislý ohybový tvar, $f = 1,836$ Hz



Obr. 20 – První torzní tvar, $f = 3,265$ Hz

6. ZÁVĚR A DOPORUČENÍ

Podstatou dynamického výpočtu navrhované lávky pro pěší přes řeku Dyji v Břeclavi bylo určení základních dynamických parametrů mostní konstrukce – vlastní tvary, vlastní frekvence a dynamická odezva na harmonické buzení. Součástí řešení je i posouzení z hlediska kritérií pohody – posouzení limitního zrychlení.

Vedlejším výstupem provedených dynamických výpočtů byla i optimalizace konstrukčního uspořádání navrhované lávky. Zásadní změnou finálního řešení bylo doplnění železobetonové desky mostovky mezi krajní parapetní příhradové nosníky.

Provedené výpočty prokázaly vyhovující dynamickou funkci lávky podle aktuálně platných norem a v praxi uznávané zahraniční literatury. Vypočtené hodnoty maximálních zrychlení jsou nižší než limitní. Kritéria pohody jsou tím splněna.

Tento dynamický výpočet byl vypracován na základě předaných údajů (geometrie, materiálové vlastnosti, tuhosti v založení apod.). V případě změny vstupních údajů je potřeba dynamický výpočet přehodnotit. Předložený výpočet nenahrazuje dynamický výpočet pro realizační dokumentaci stavby, který se předkládá s příslušnou prováděcí dokumentací.

Z předložených výpočtů vyplývá, že na konstrukci nebude muset být instalováno tlumící zařízení (tlumič kmitů), ale nutno konstatovat, že před uvedením do provozu musí být měření ověřeny skutečné vlastní frekvence a hodnoty útlumu lávky s hodnotami získanými výpočtem. Na základě výsledků měření na skutečné konstrukci lávky bude pak rozhodnuto o nutnosti instalace pohlcovače kmitání.

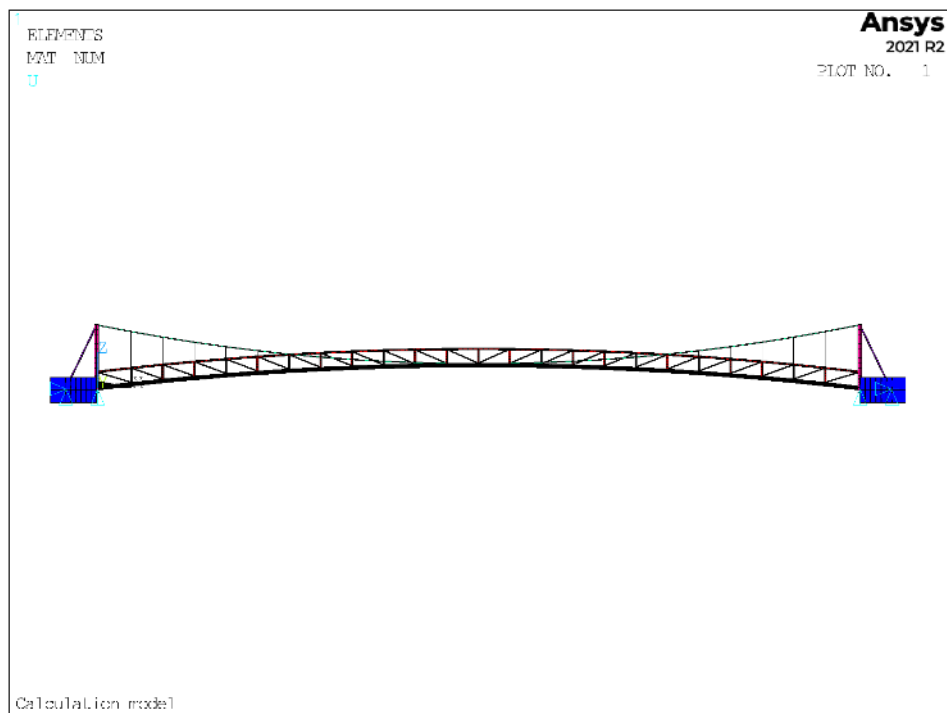
V Brně 31. 3. 2023

Ing. Jan Koláček, Ph.D.

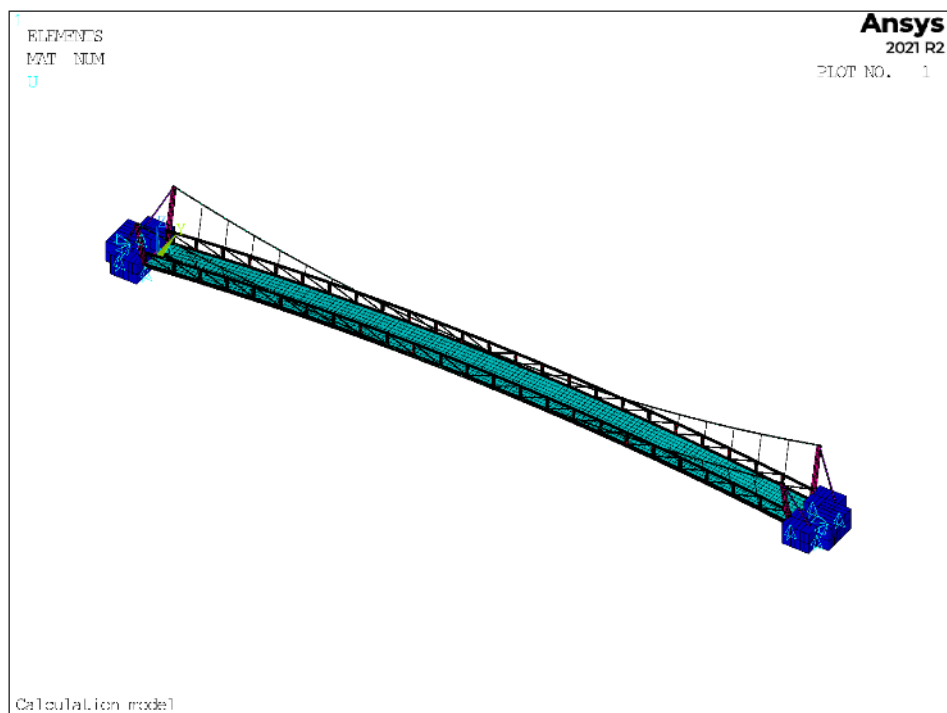
doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.

7. PŘÍLOHY

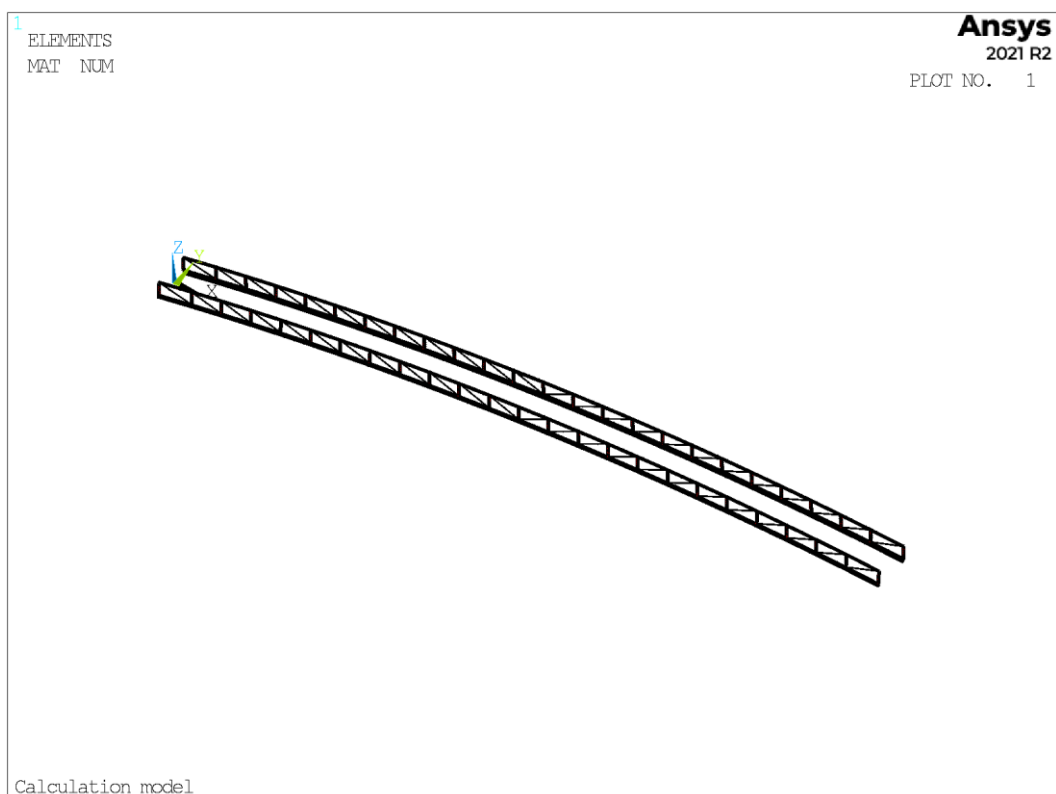
7.1 Výpočtový model



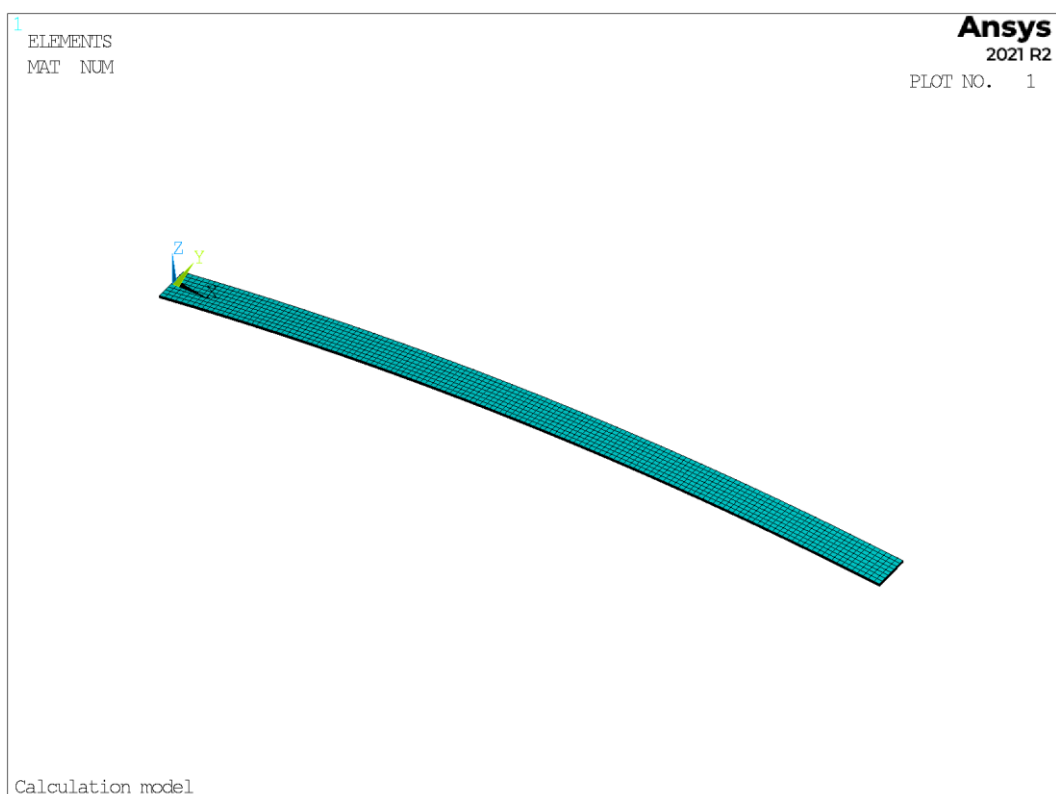
Obr. 21 Pohled z boku



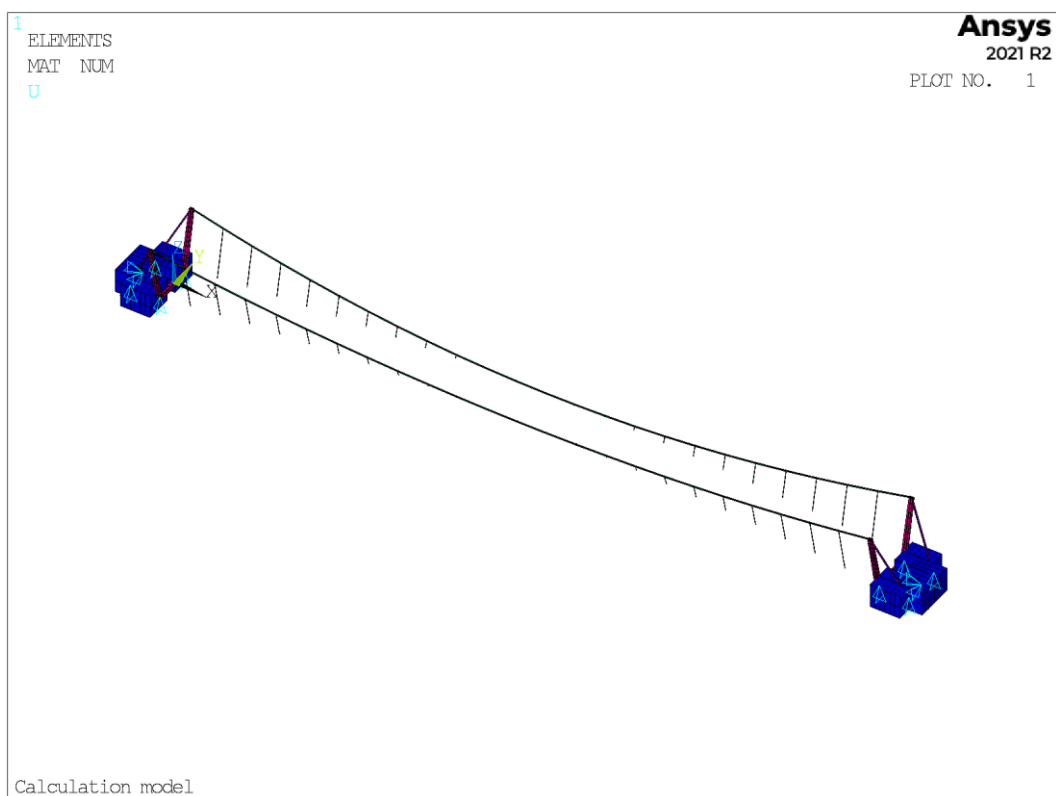
Obr. 22 Axonometrický pohled



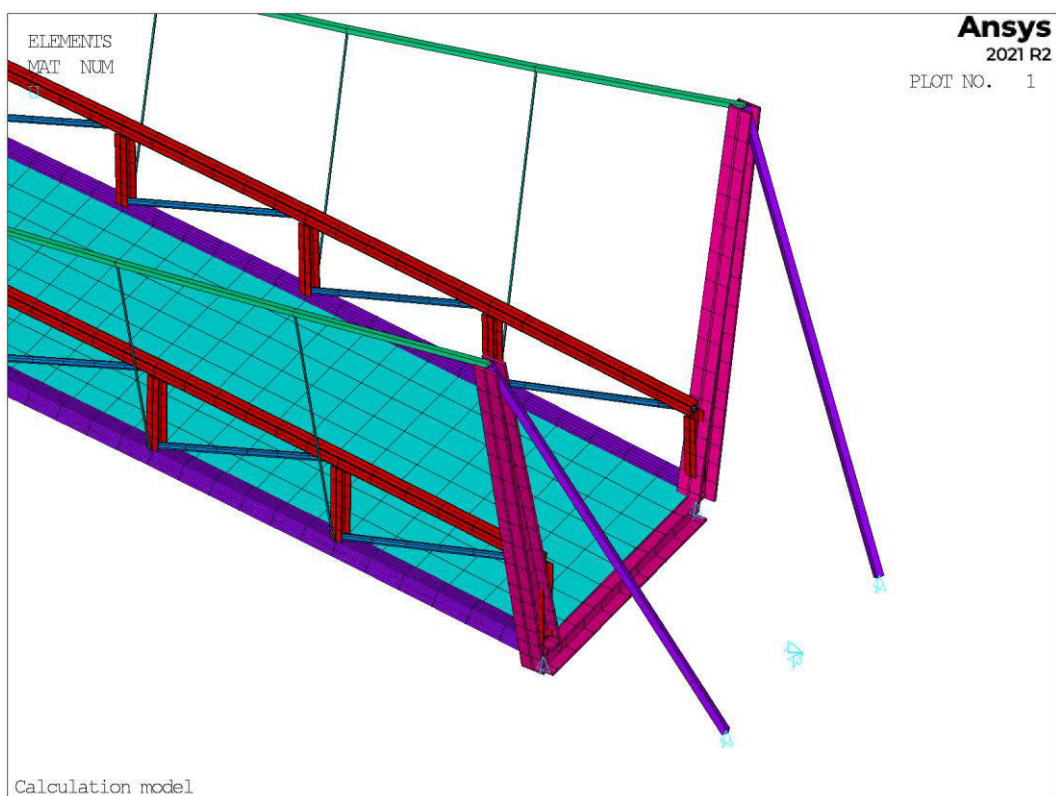
Obr. 23 Parapetní příhradový nosník



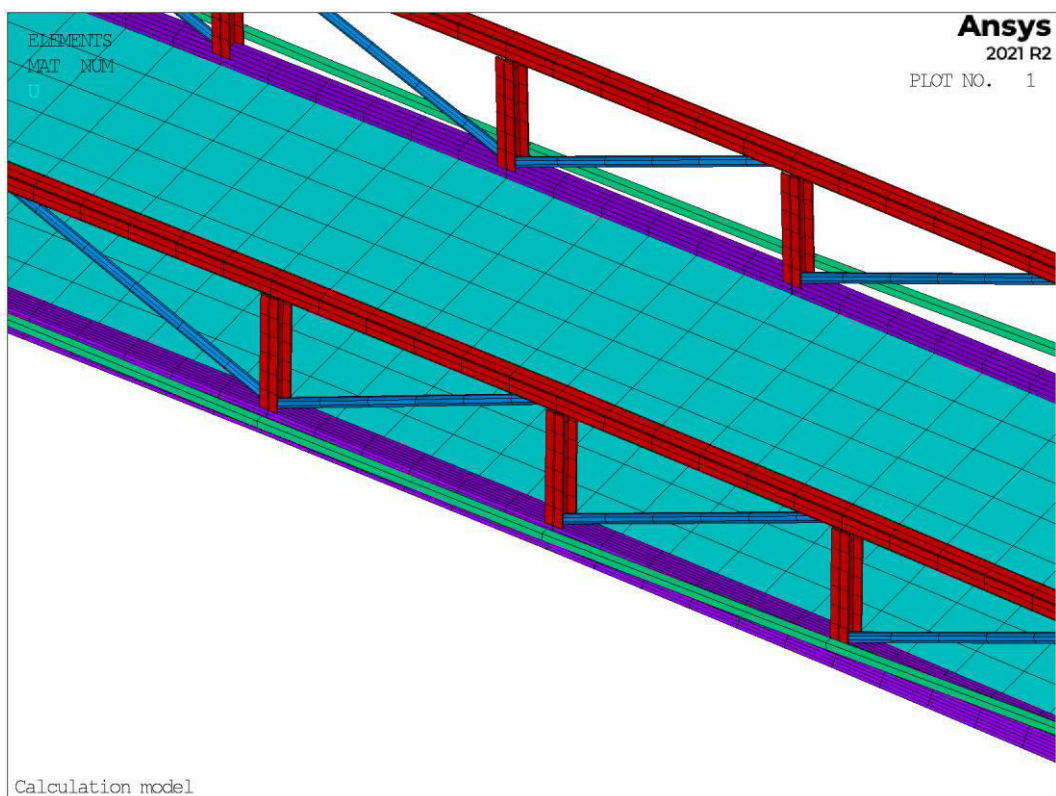
Obr. 24 Betonová mostovka



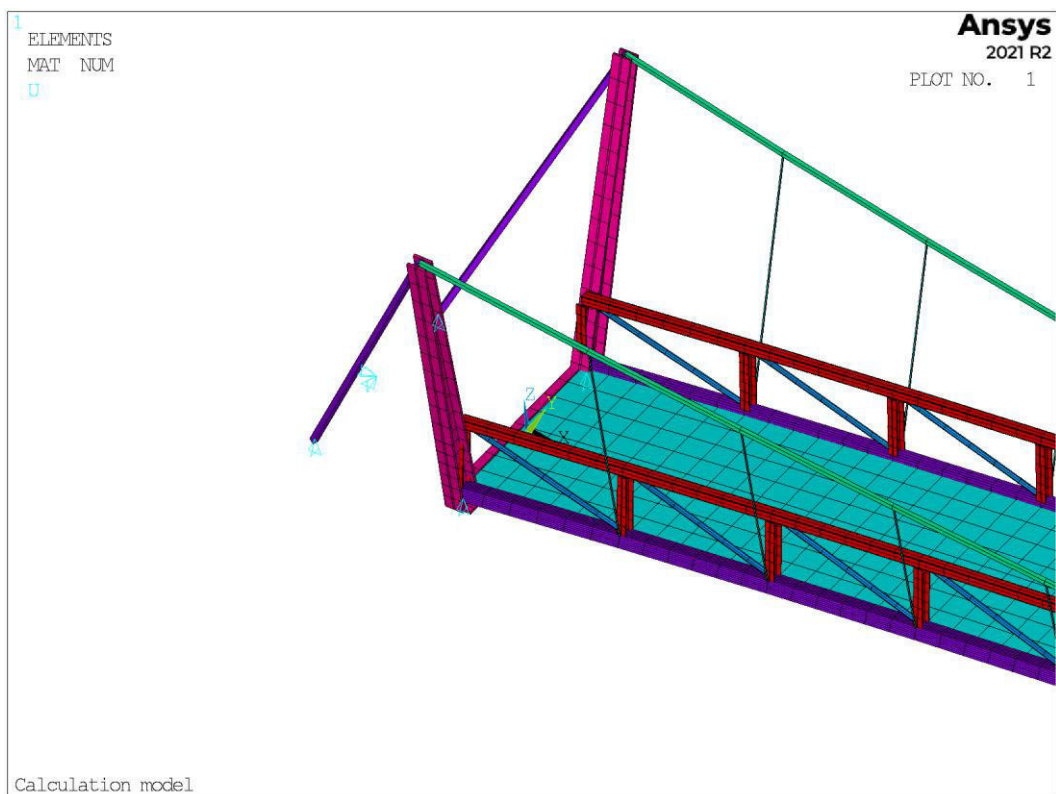
Obr. 25 Visuté lano se závěsy a pylony



Obr. 26 Detail OP2



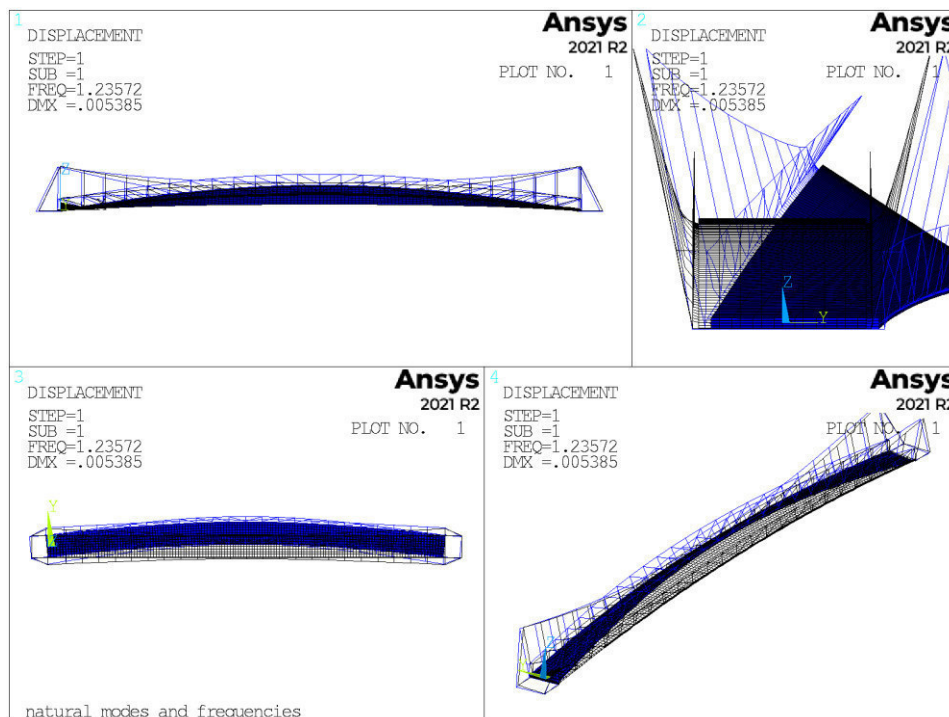
Obr. 27 Střed mostu



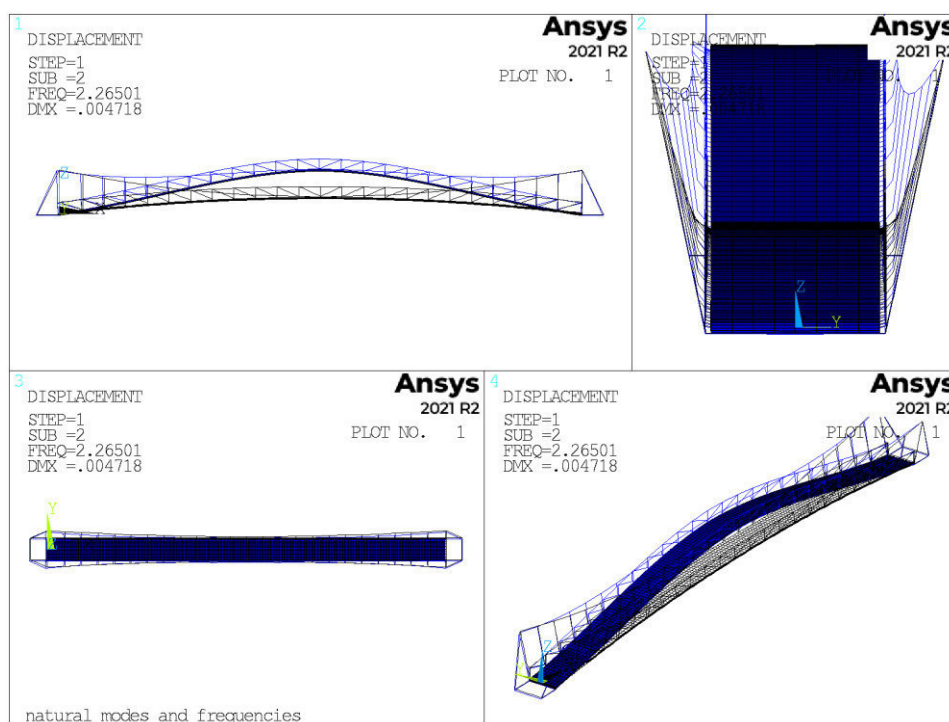
Obr. 28 Detail OP1

7.2 Modální analýza modelu 01

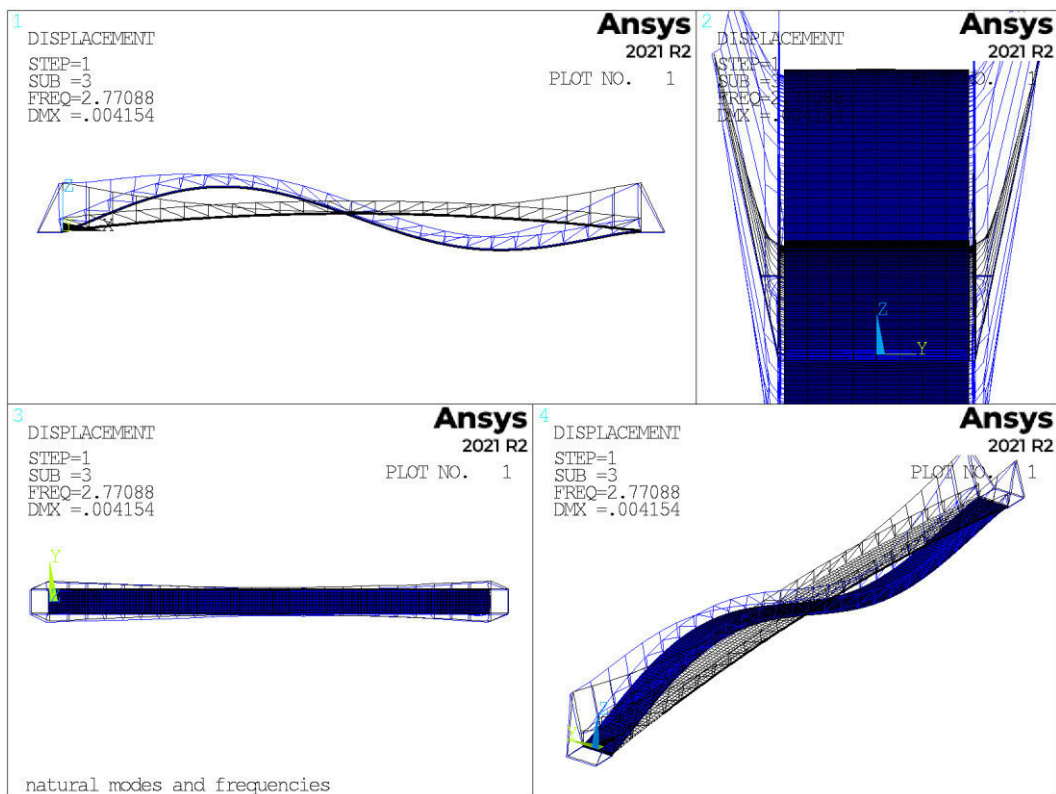
7.2.1 Model 01a - podepření ux bráněno v opěrách



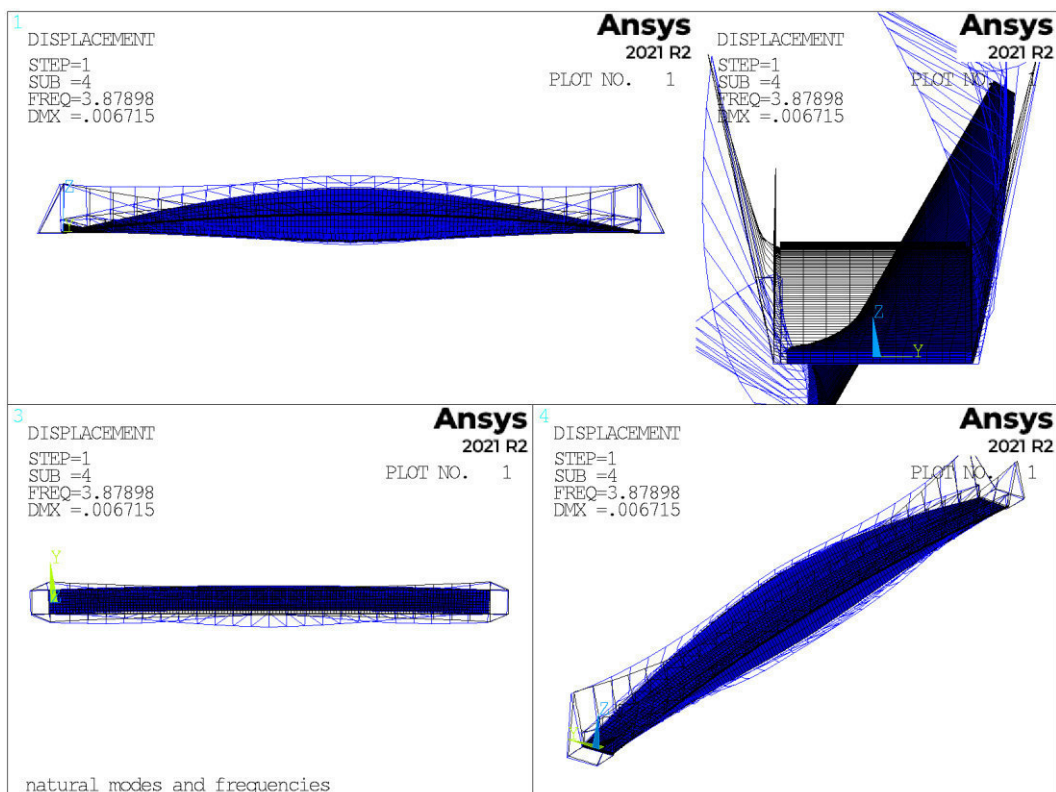
Obr. 29 První tvar



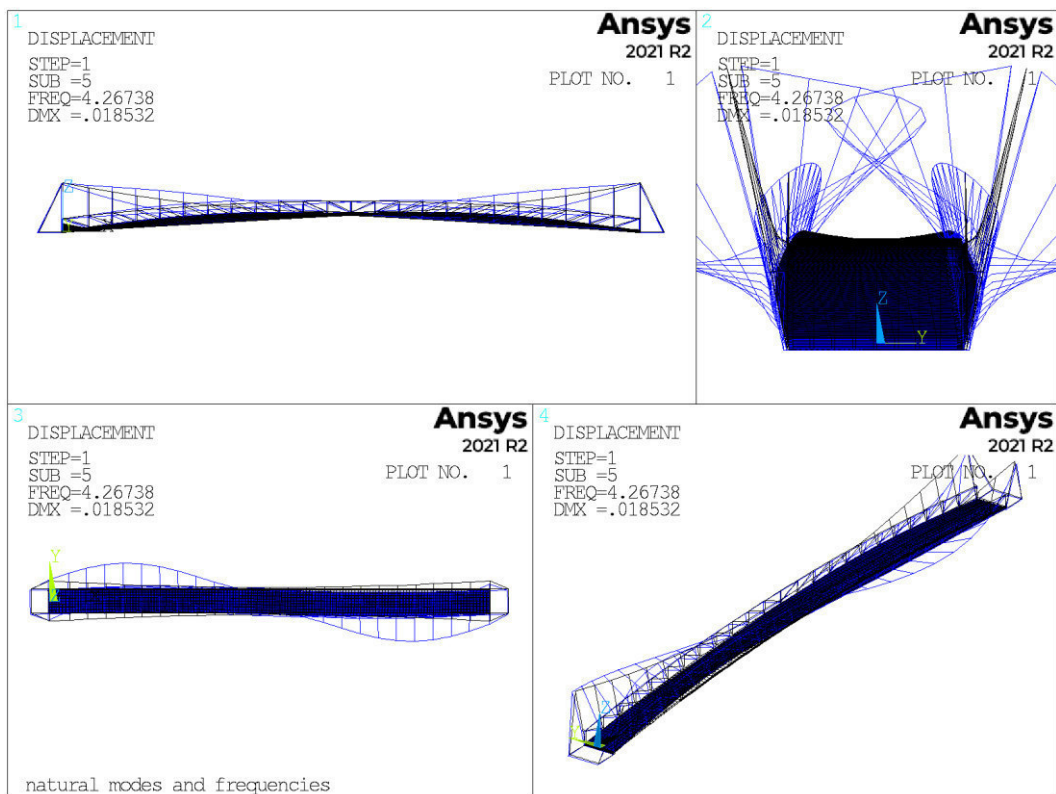
Obr. 30 Druhý tvar



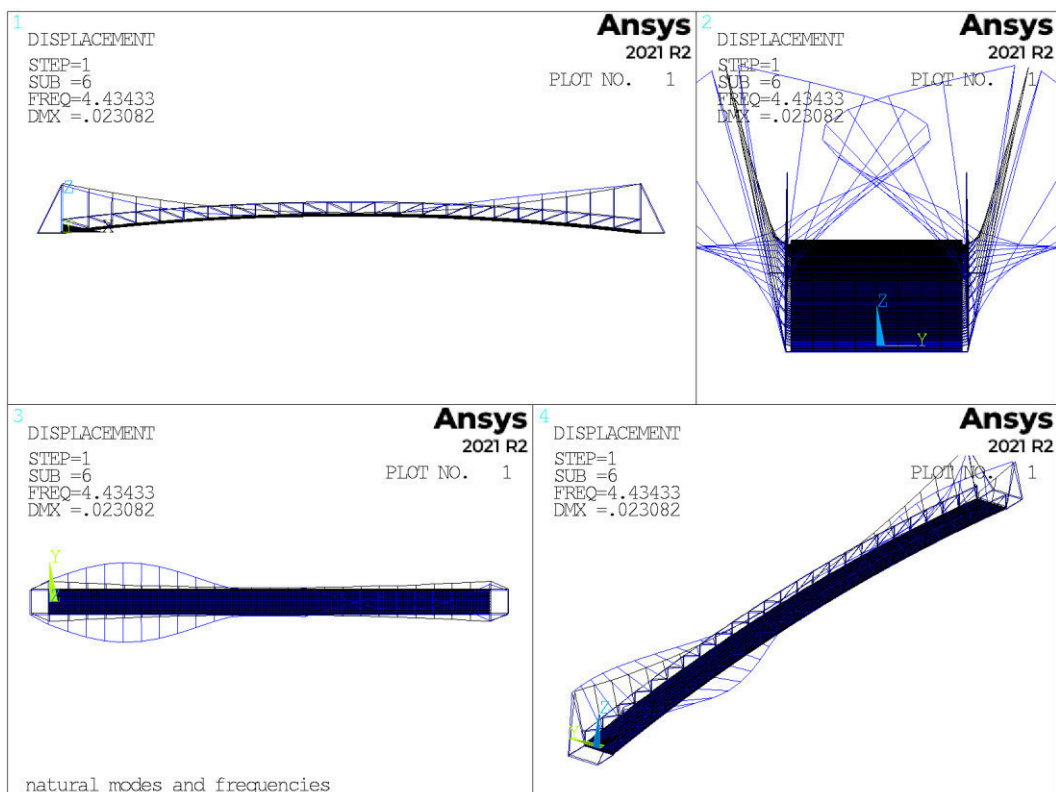
Obr. 31 Třetí tvar



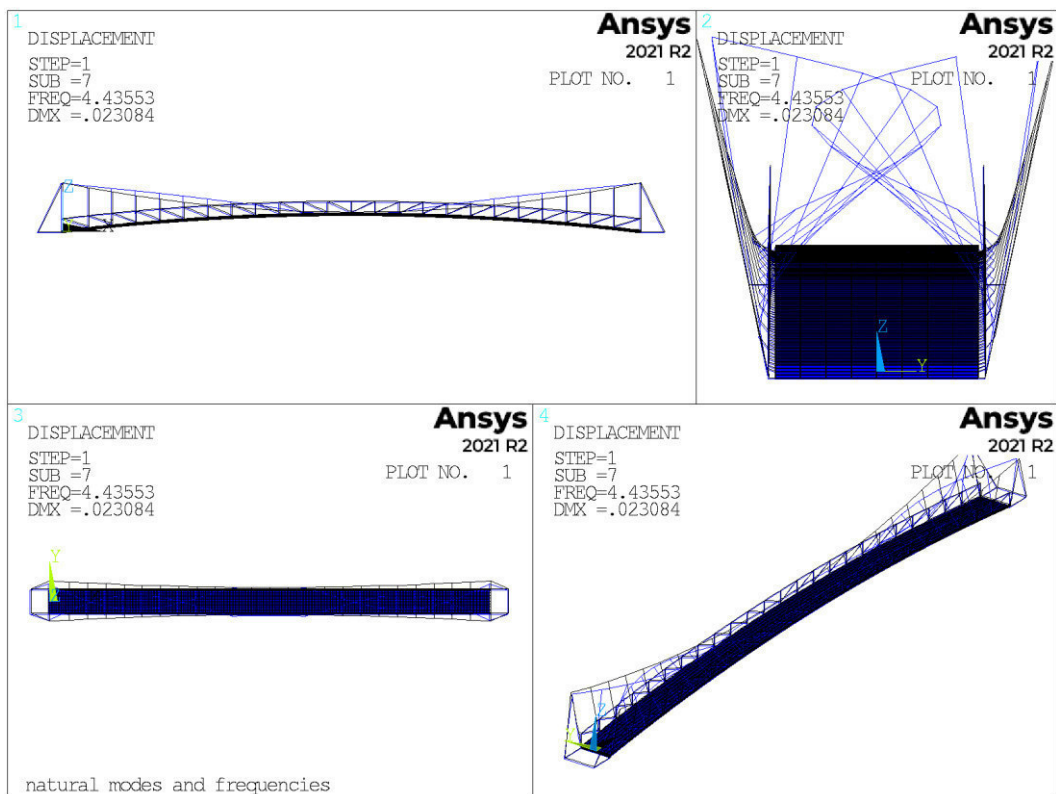
Obr. 32 Čtvrtý tvar



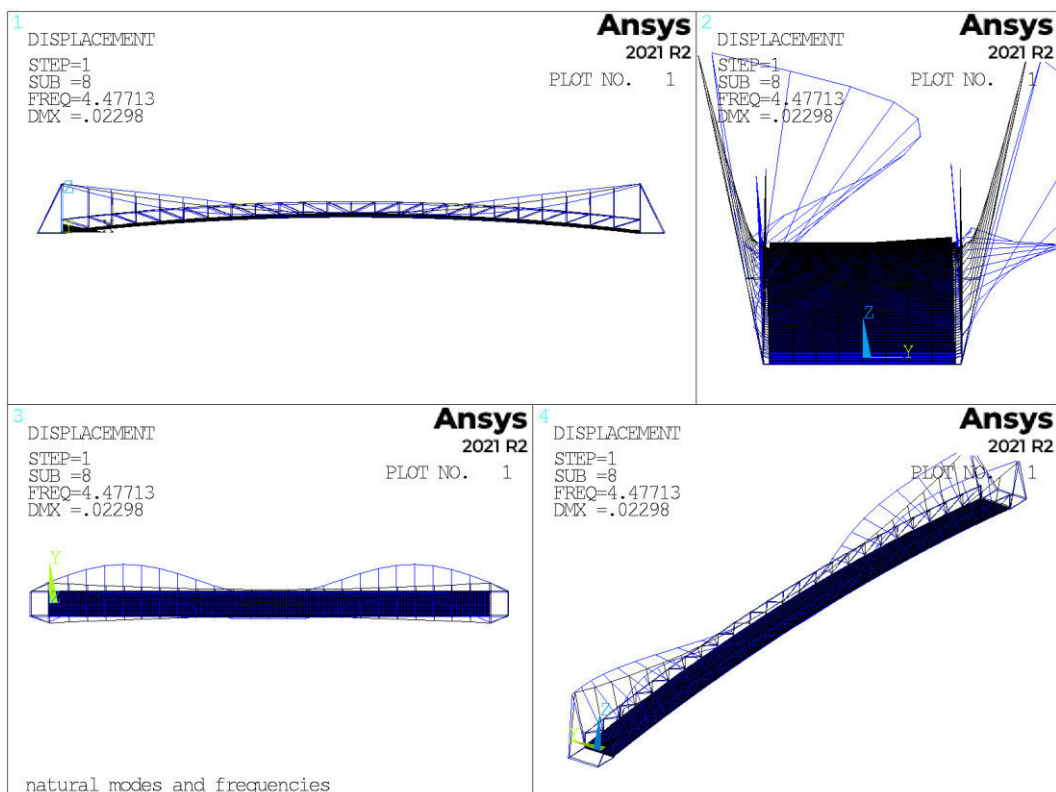
Obr. 33 Pátý tvar



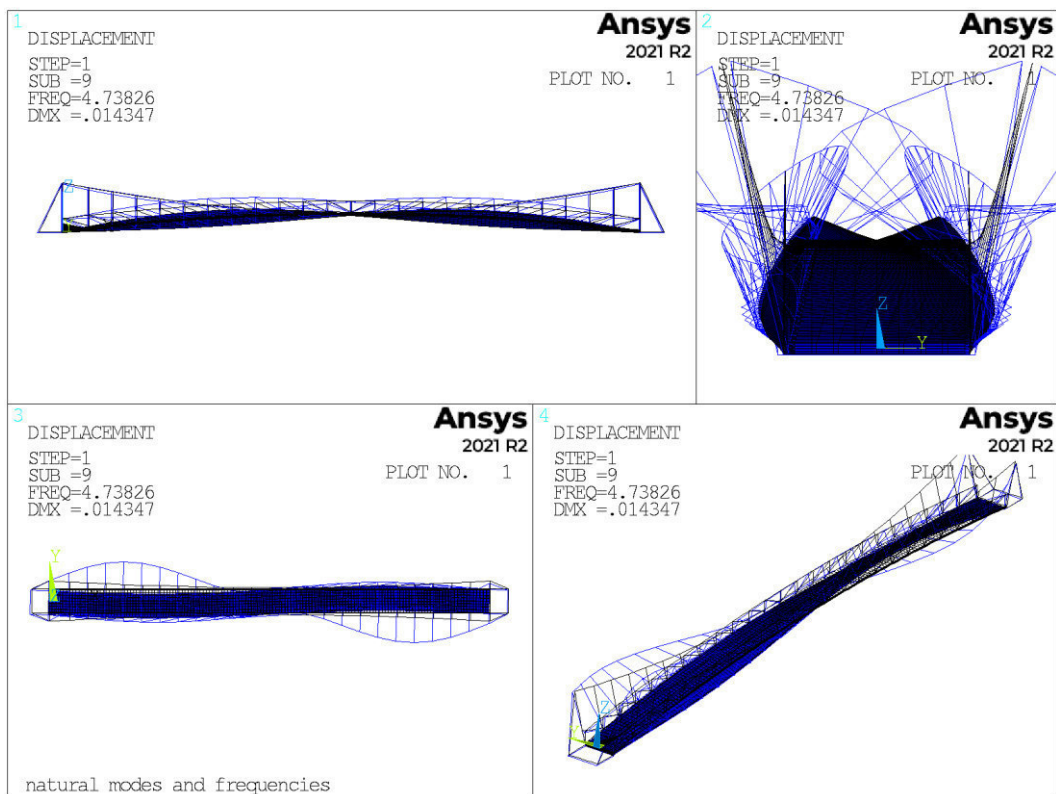
Obr. 34 Šestý tvar



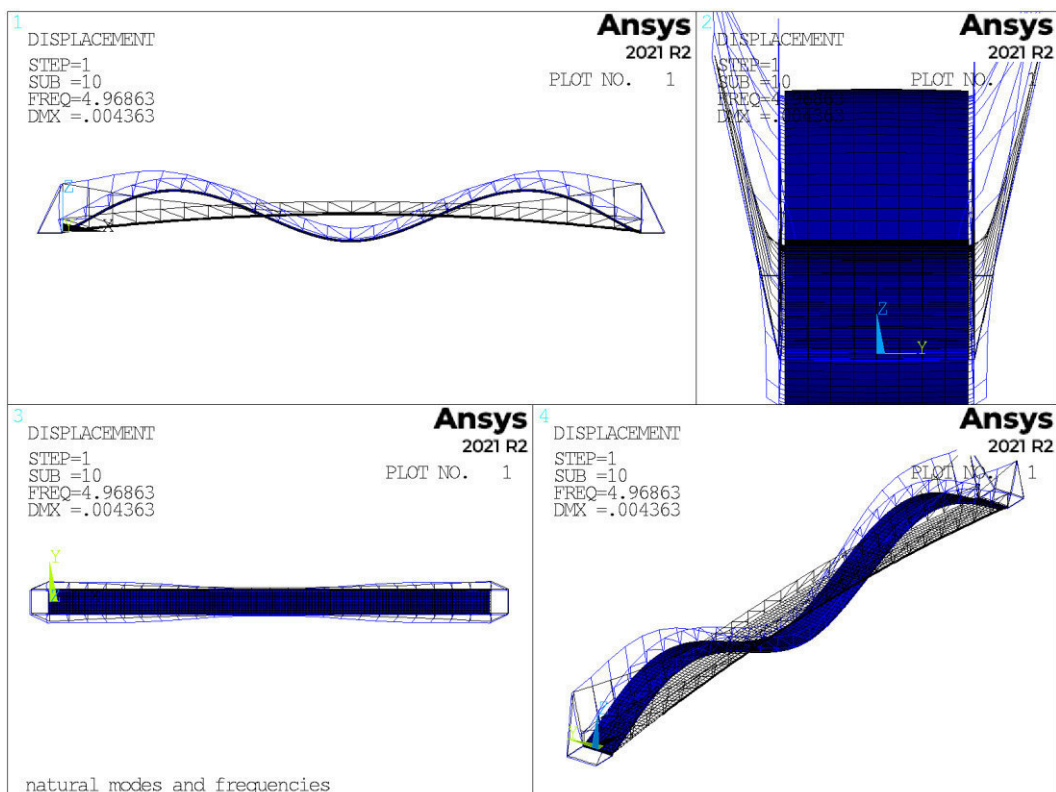
Obr. 35 Sedmý tvar



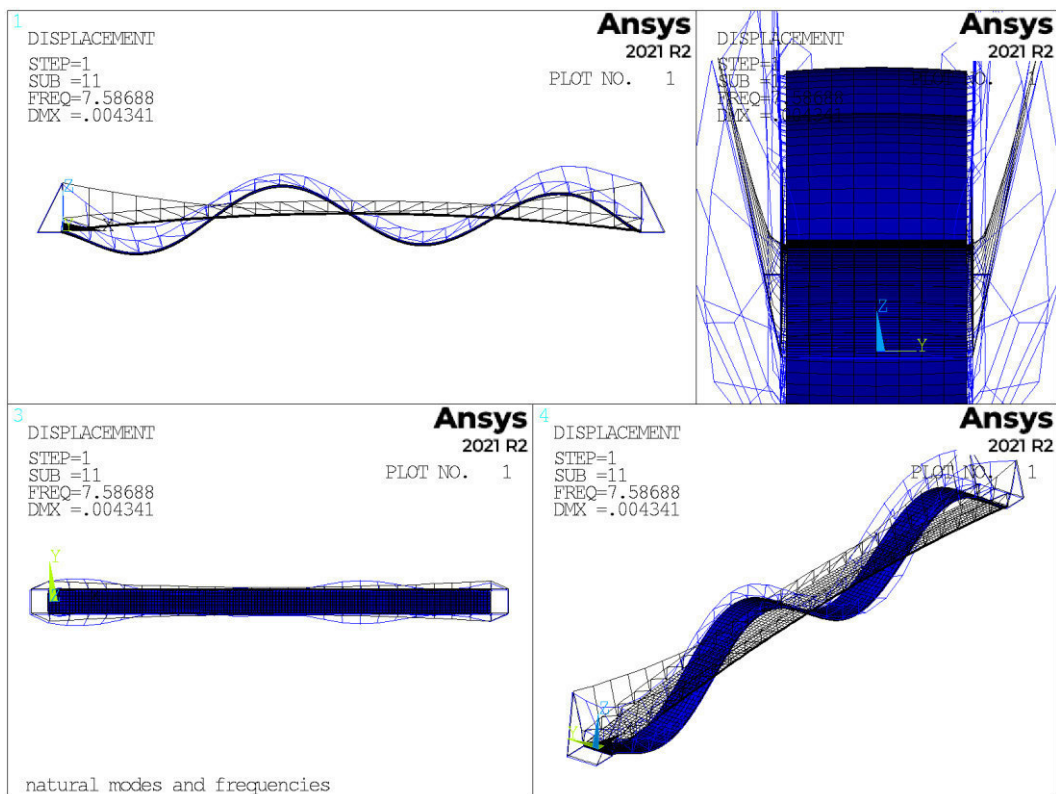
Obr. 36 Osmý tvar



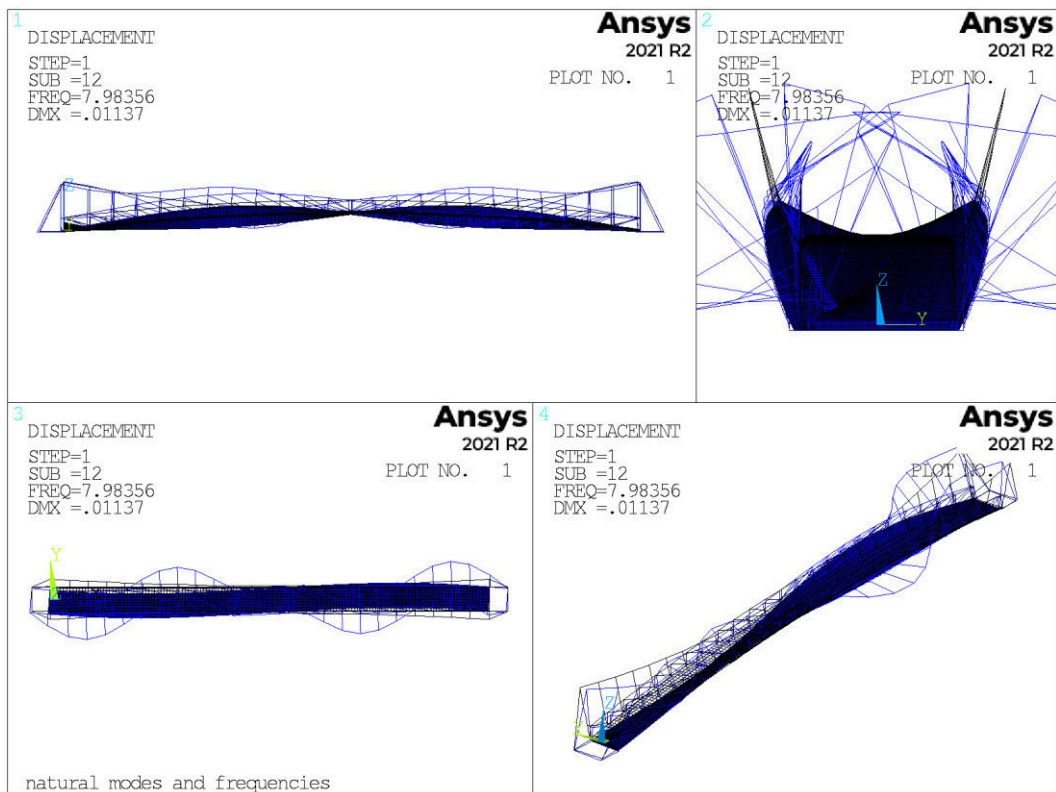
Obr. 37 Devátý tvar



Obr. 38 Desátý tvar

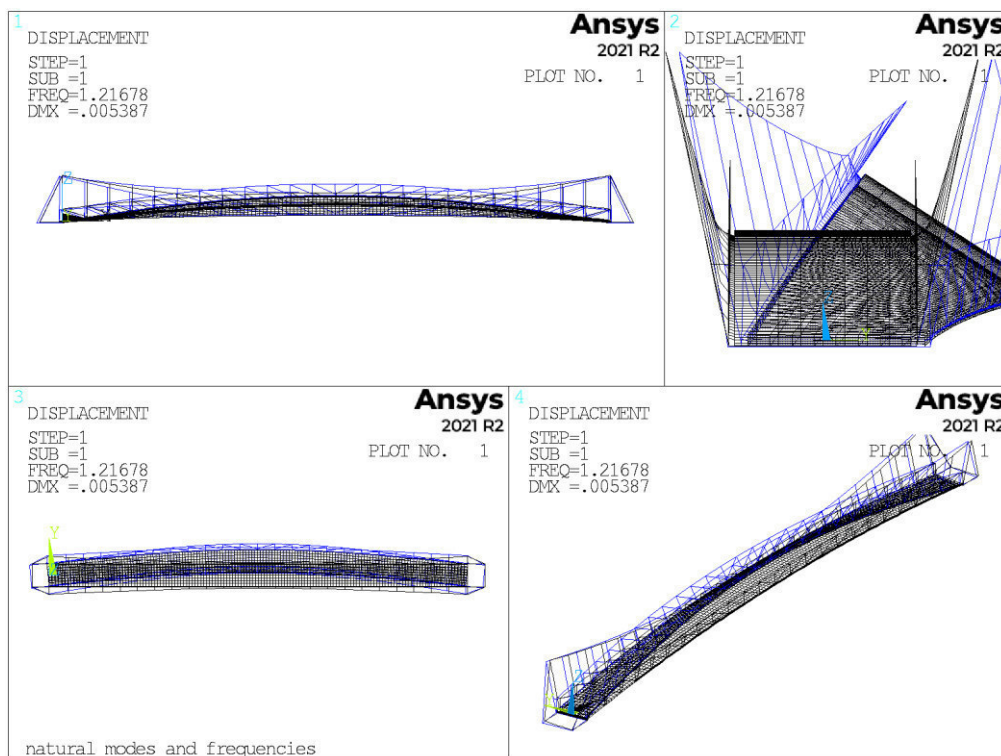


Obr. 39 Jedenáctý tvar

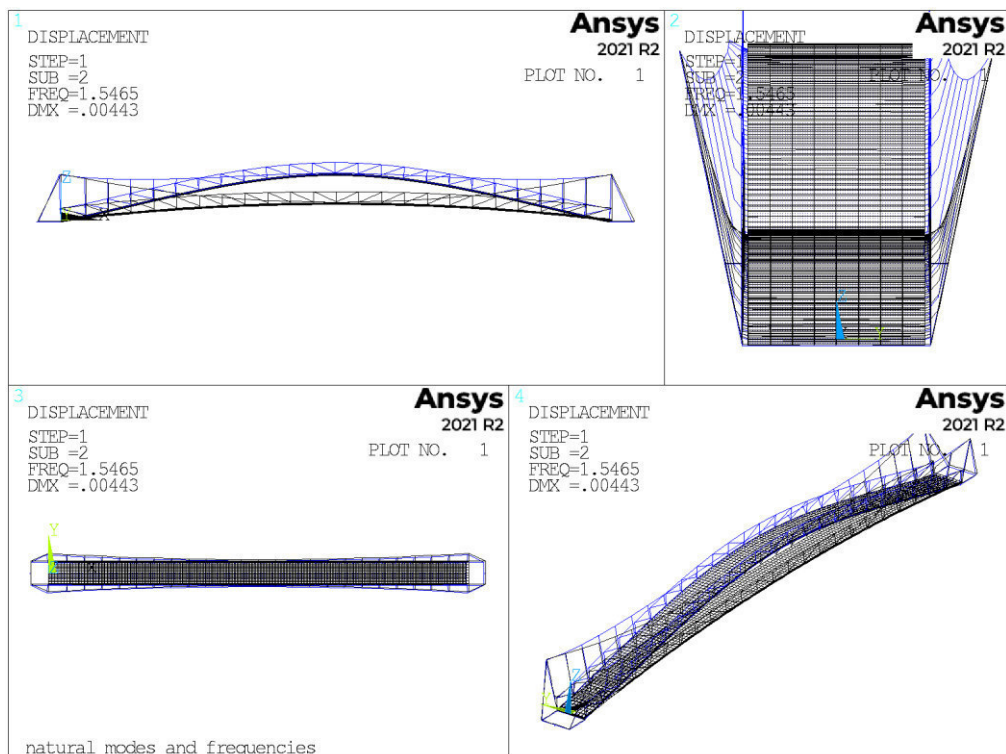


Obr. 40 Dvanáctý tvar

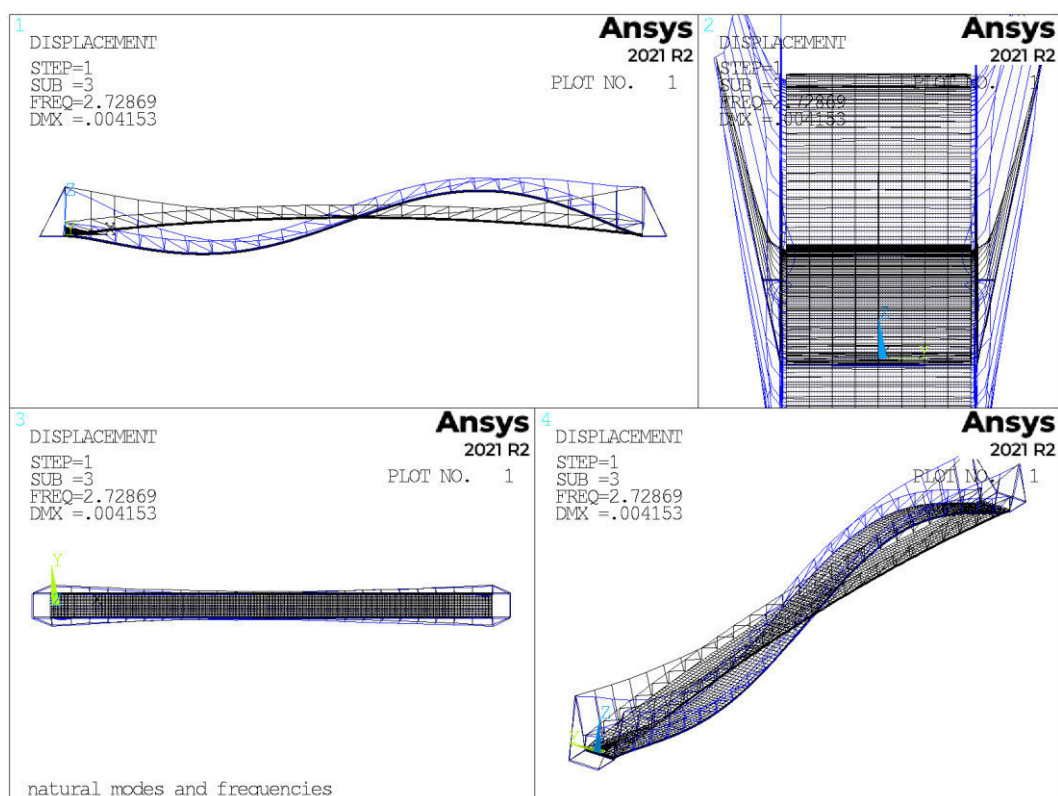
7.2.2 Model 01b - podepření ux pomocí pružin



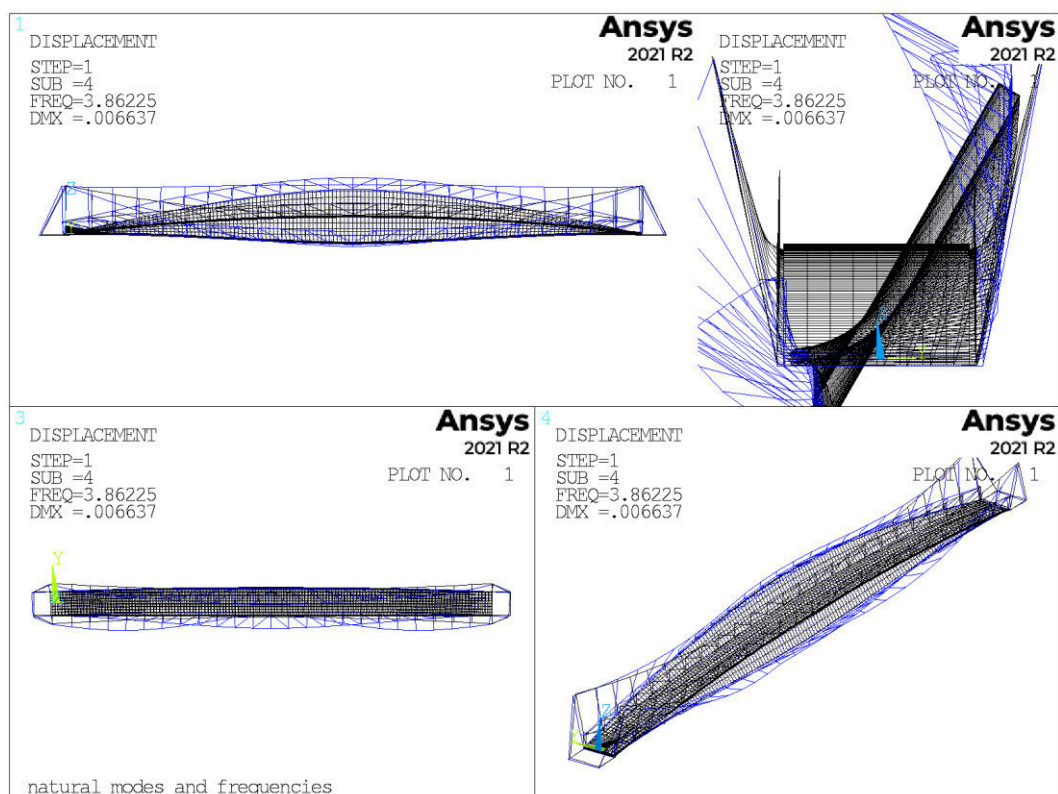
Obr. 41 První tvar



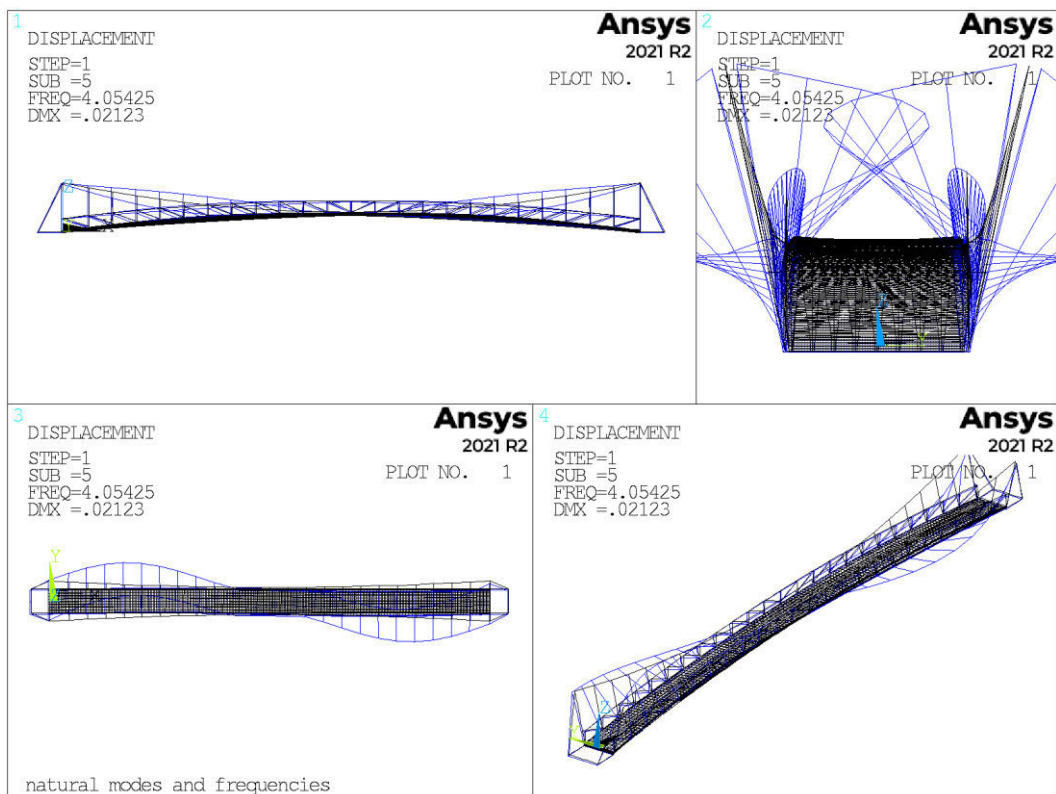
Obr. 42 Druhý tvar



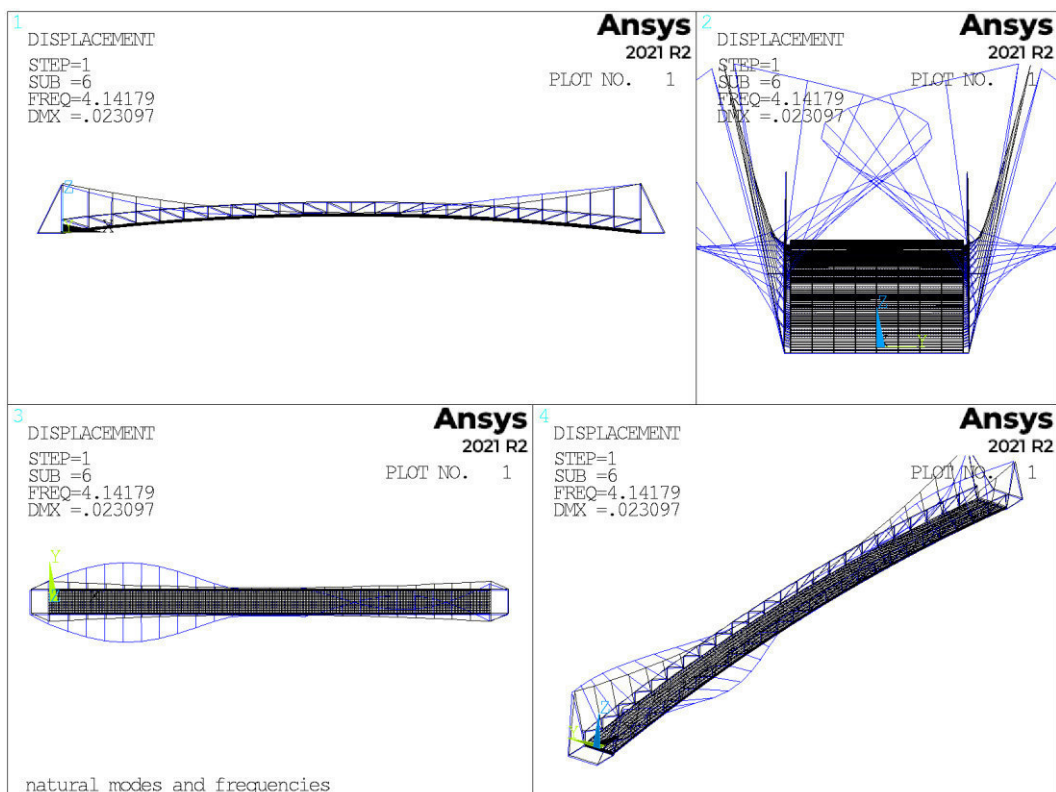
Obr. 43 Třetí tvar



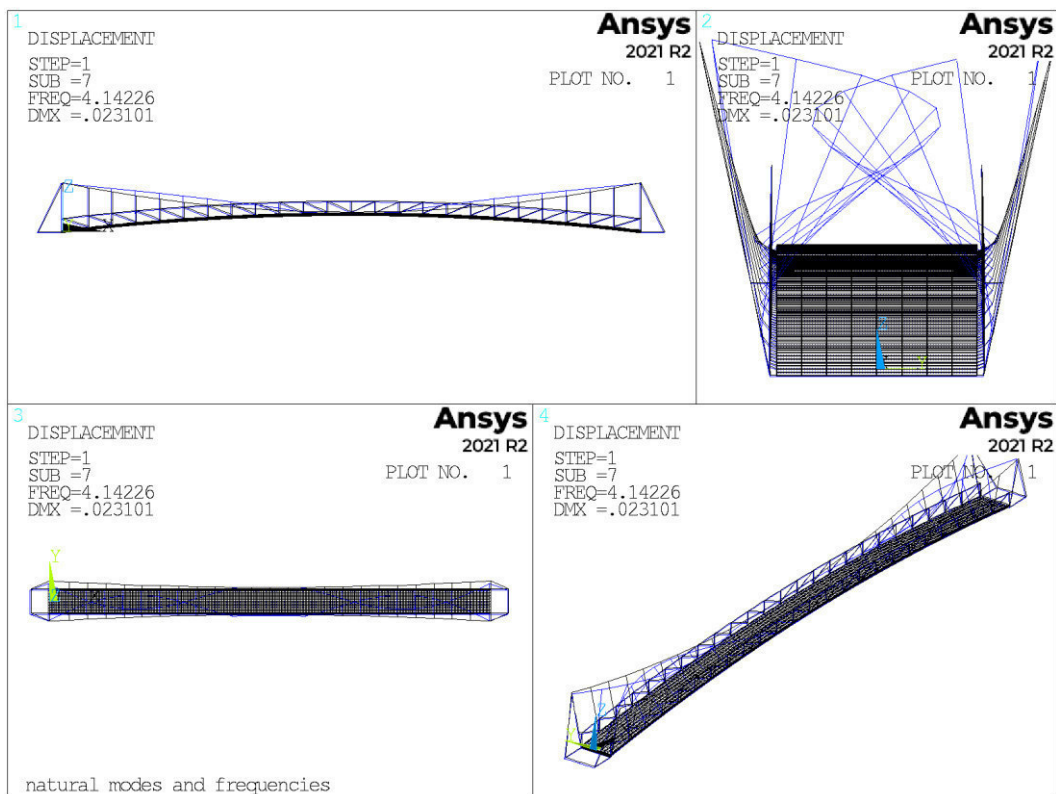
Obr. 44 Čtvrtý tvar



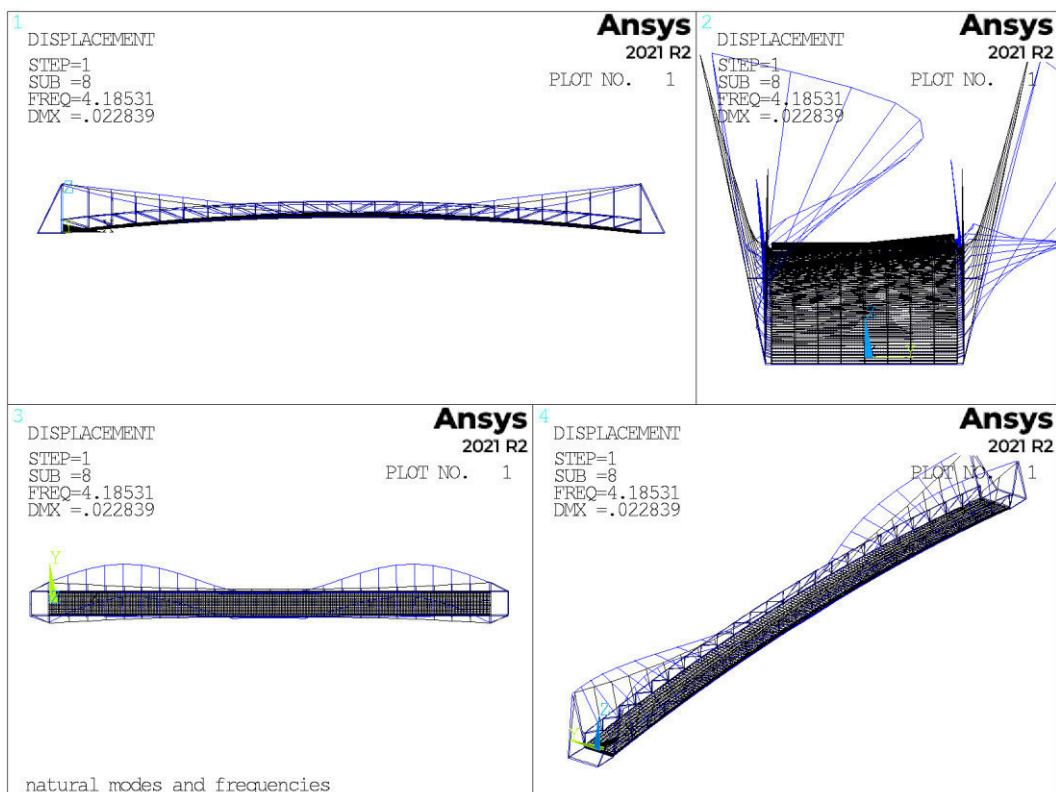
Obr. 45 Pátý tvar



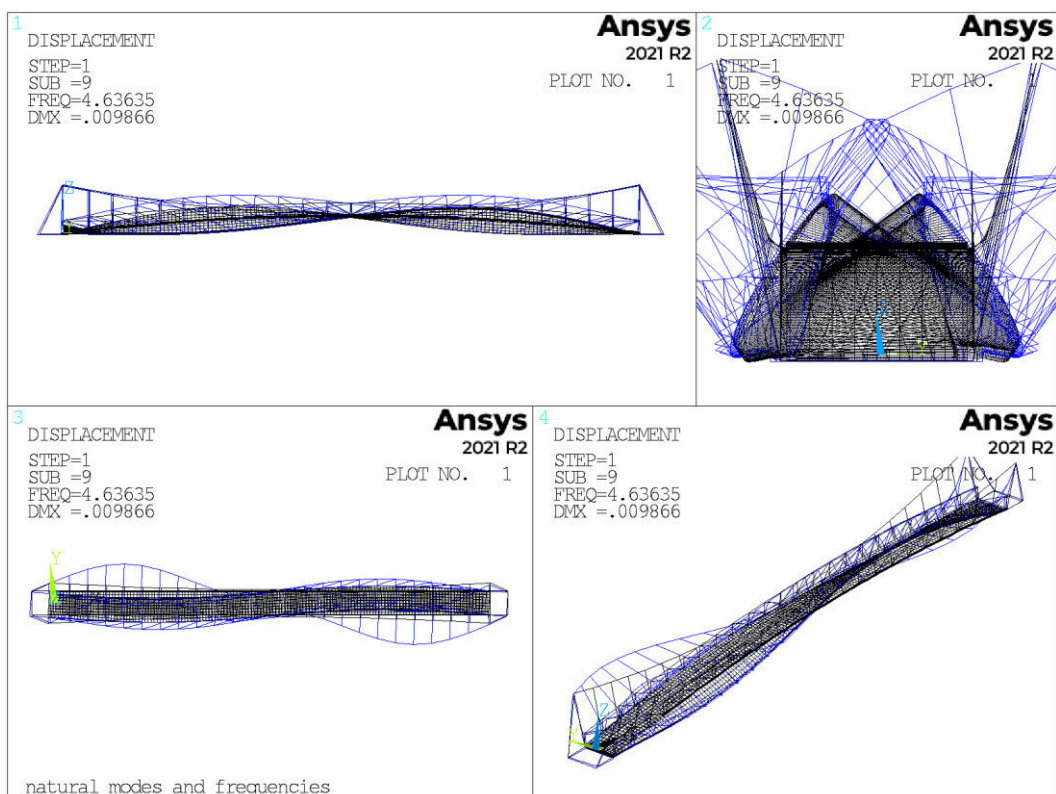
Obr. 46 Šestý tvar



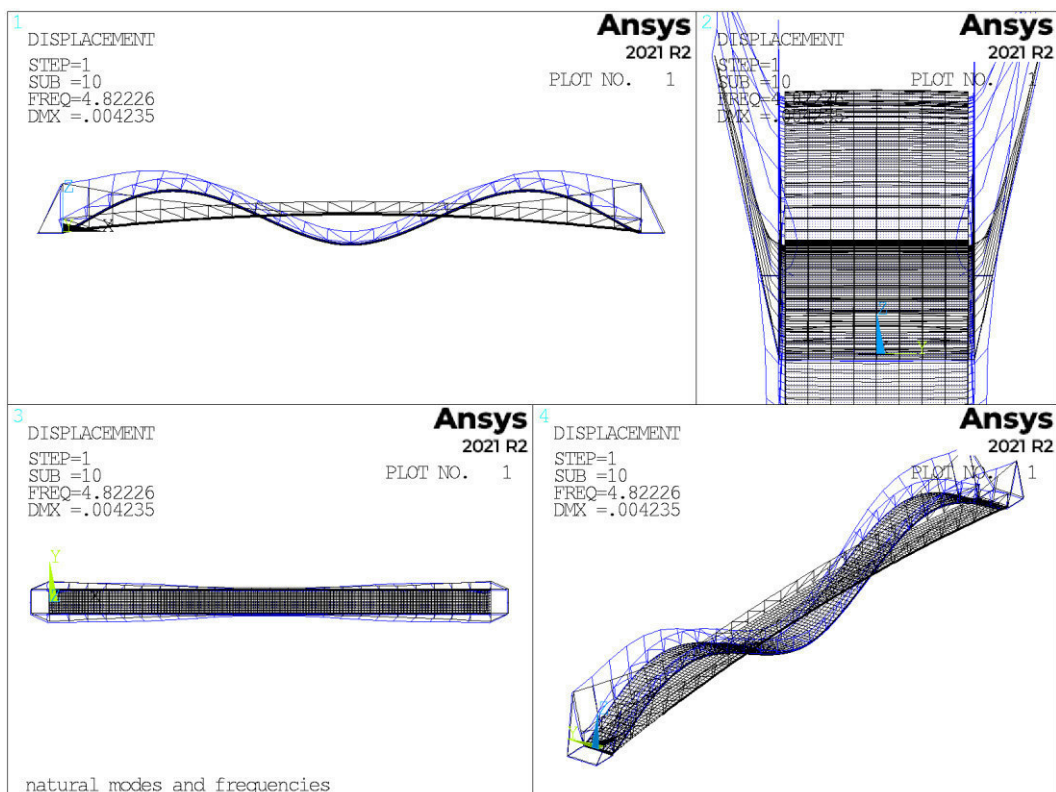
Obr. 47 Sedmý tvar



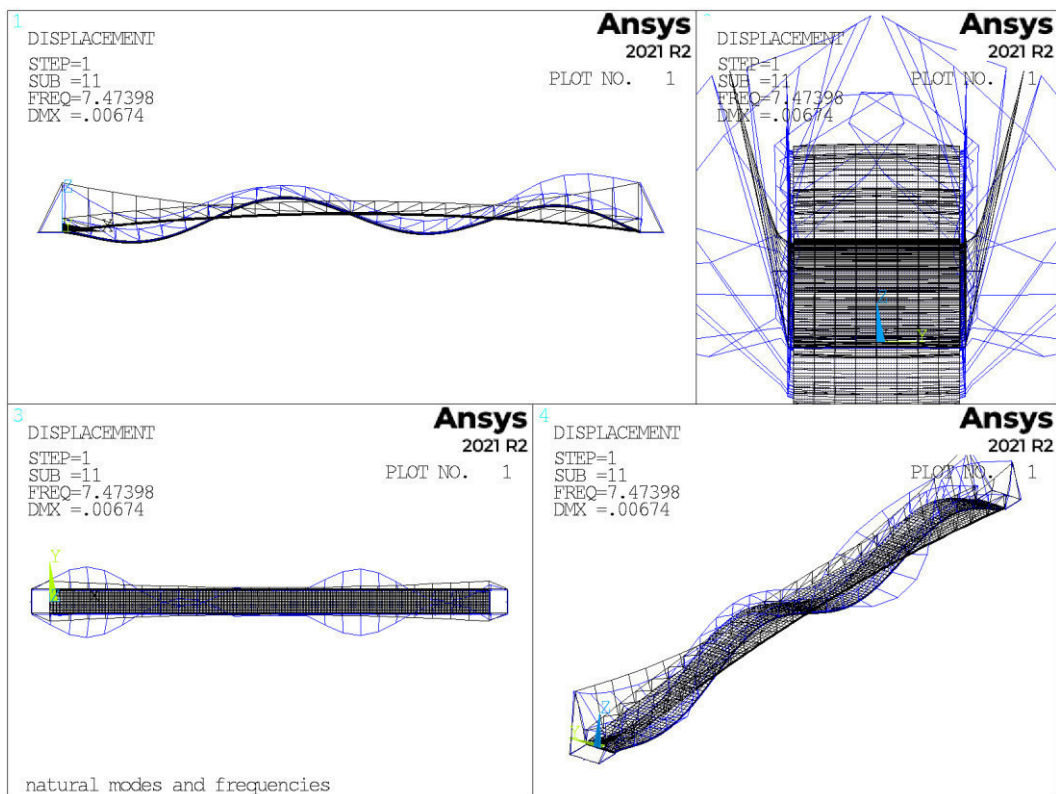
Obr. 48 Osmý tvar



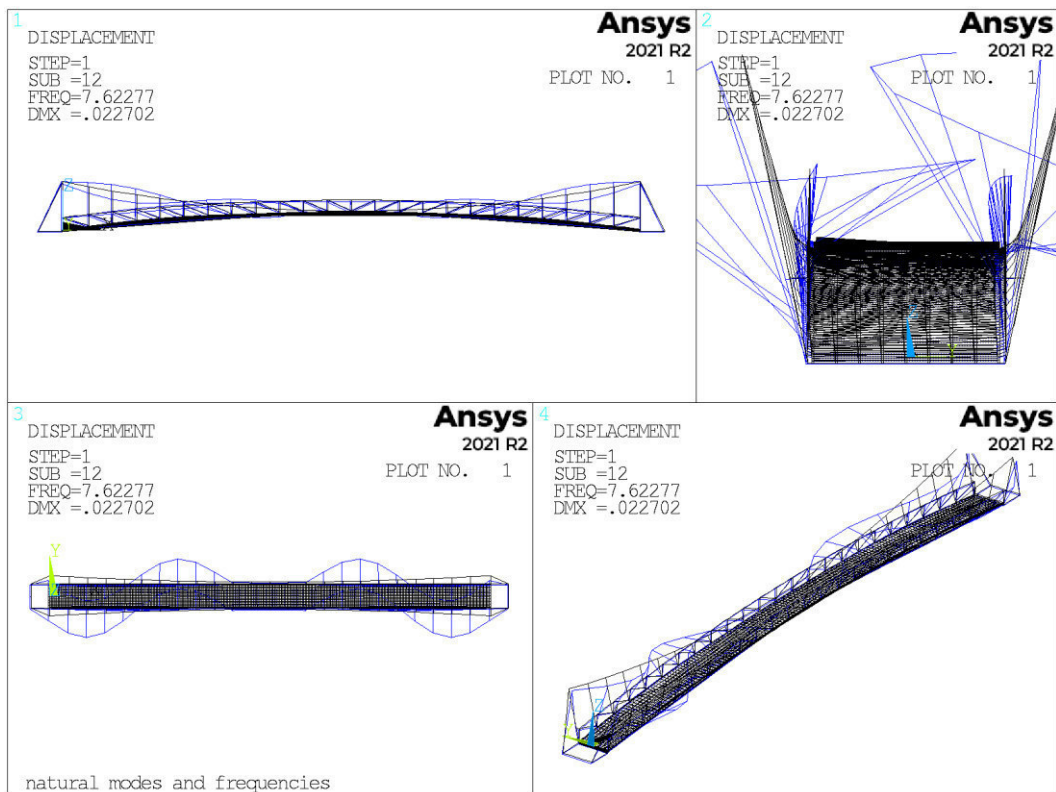
Obr. 49 Devátý tvar



Obr. 50 Desátý tvar

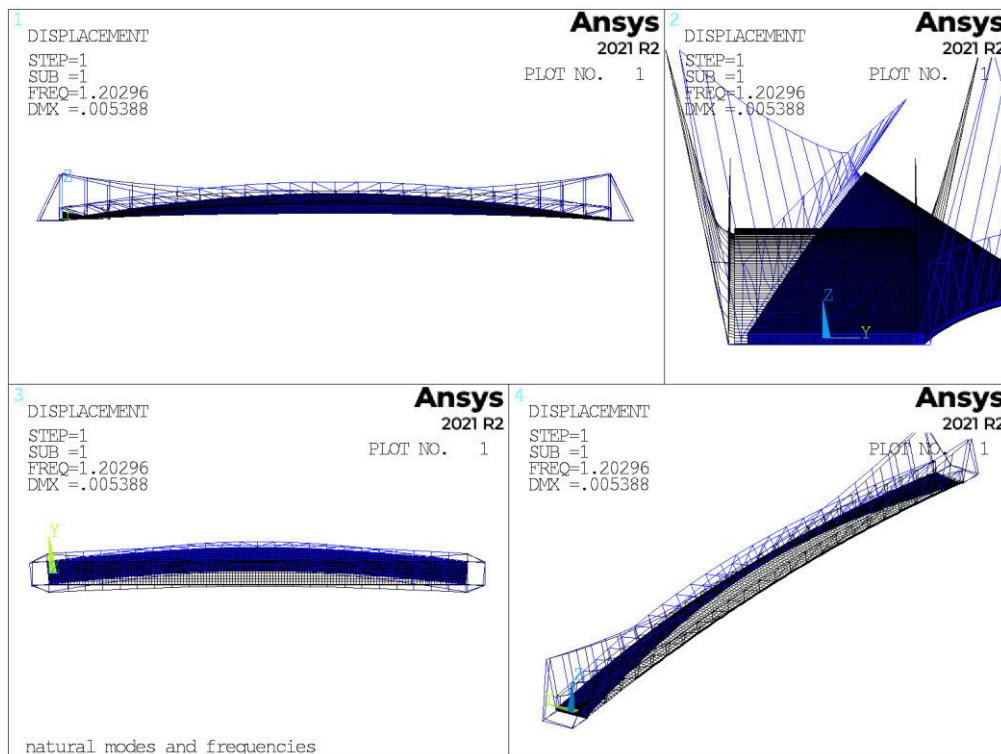


Obr. 51 Jedenáctý tvar

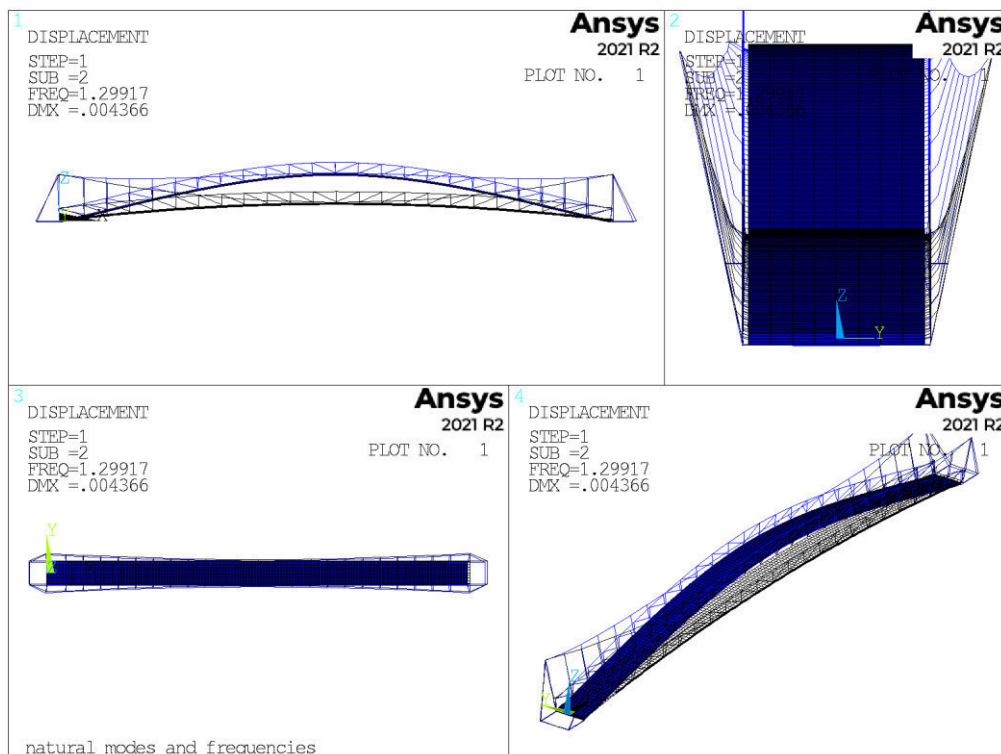


Obr. 52 Dvanáctý tvar

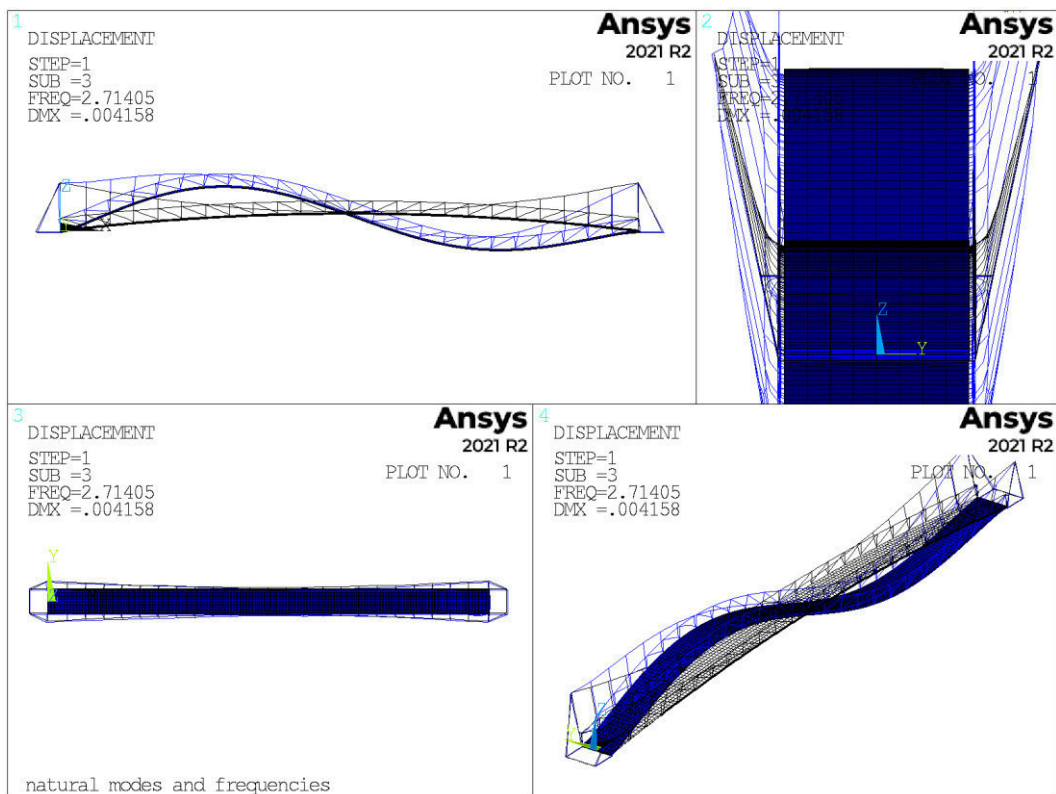
7.2.3 Model 01c - podepření ux volné



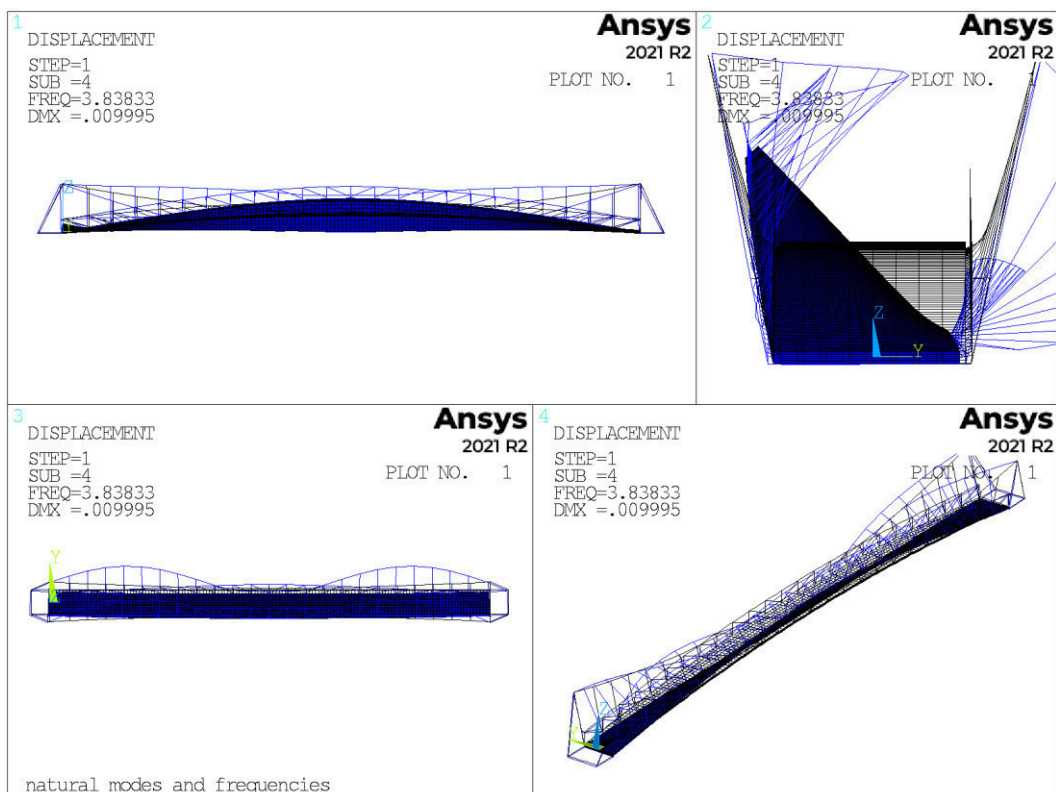
Obr. 53 První tvar



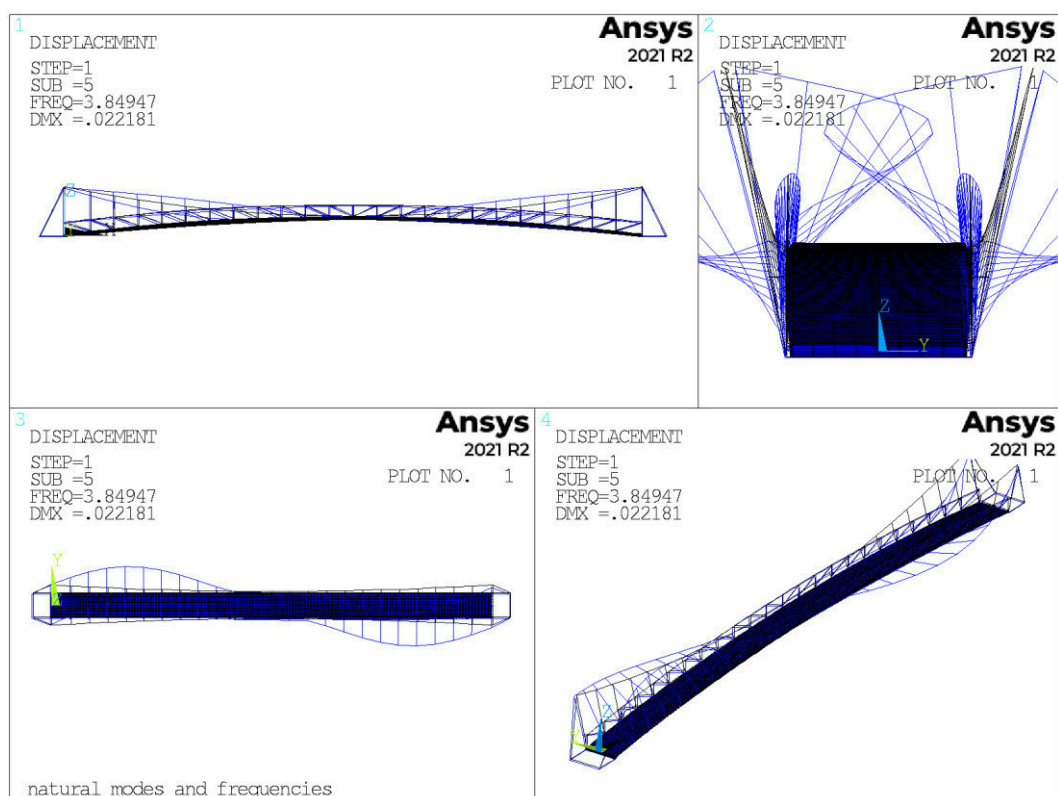
Obr. 54 Druhý tvar



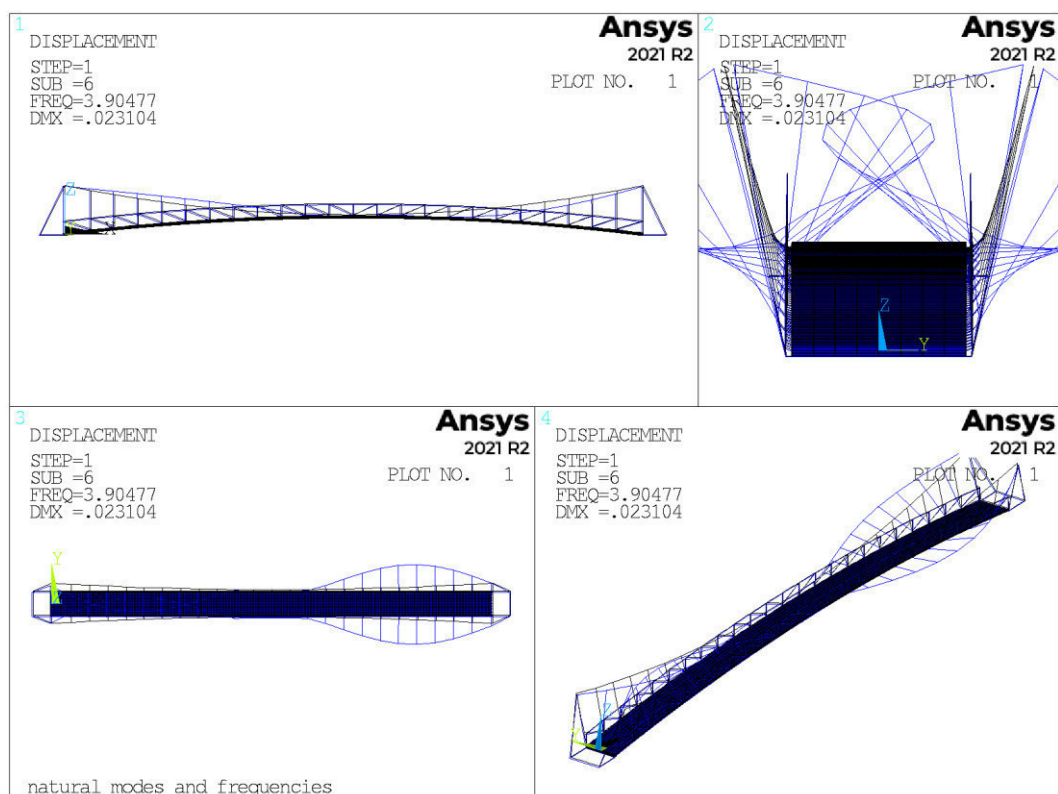
Obr. 55 Třetí tvar



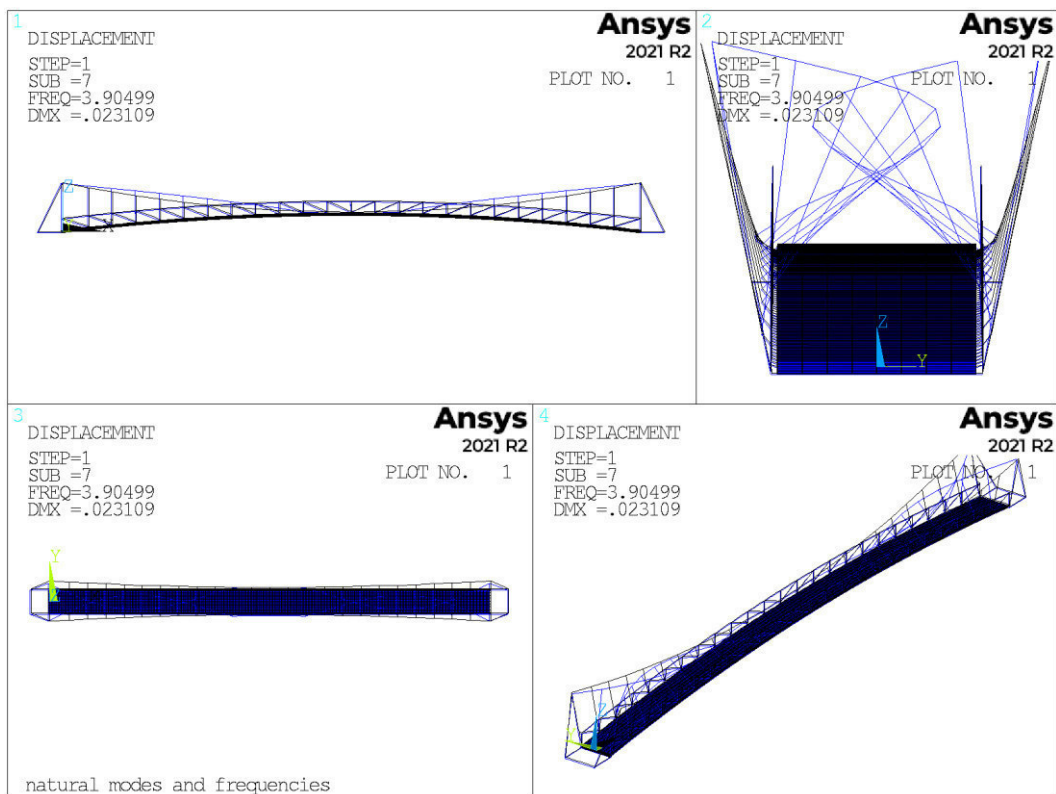
Obr. 56 Čtvrtý tvar



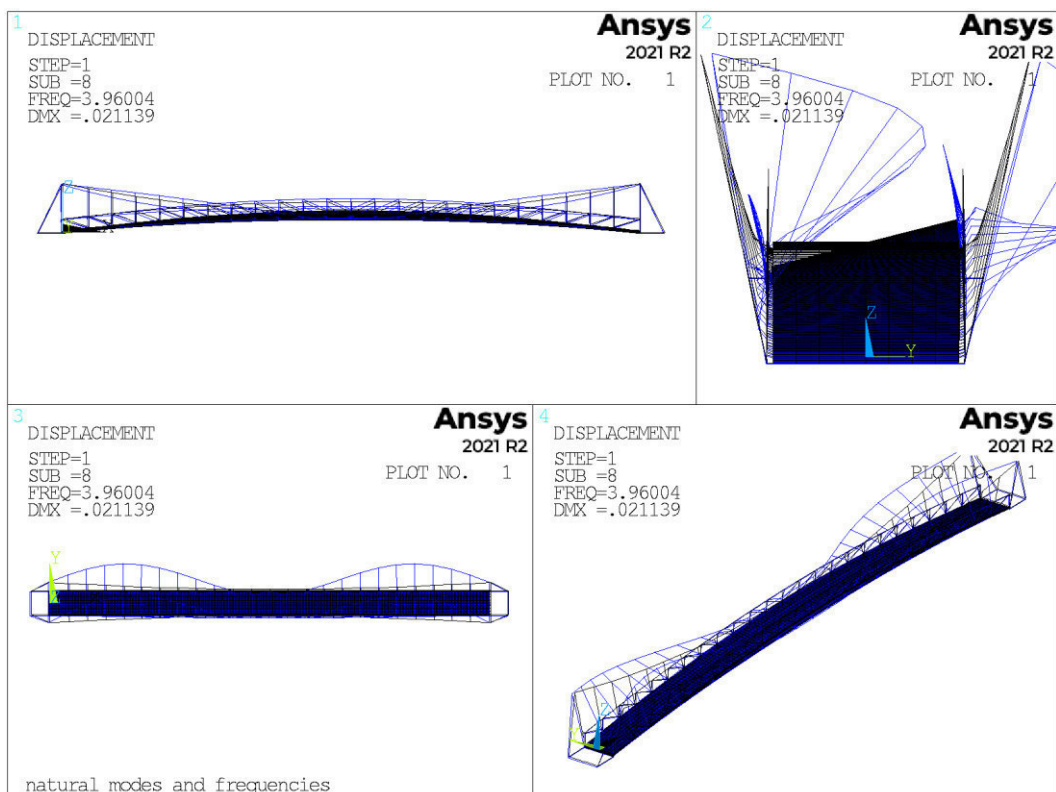
Obr. 57 Pátý tvar



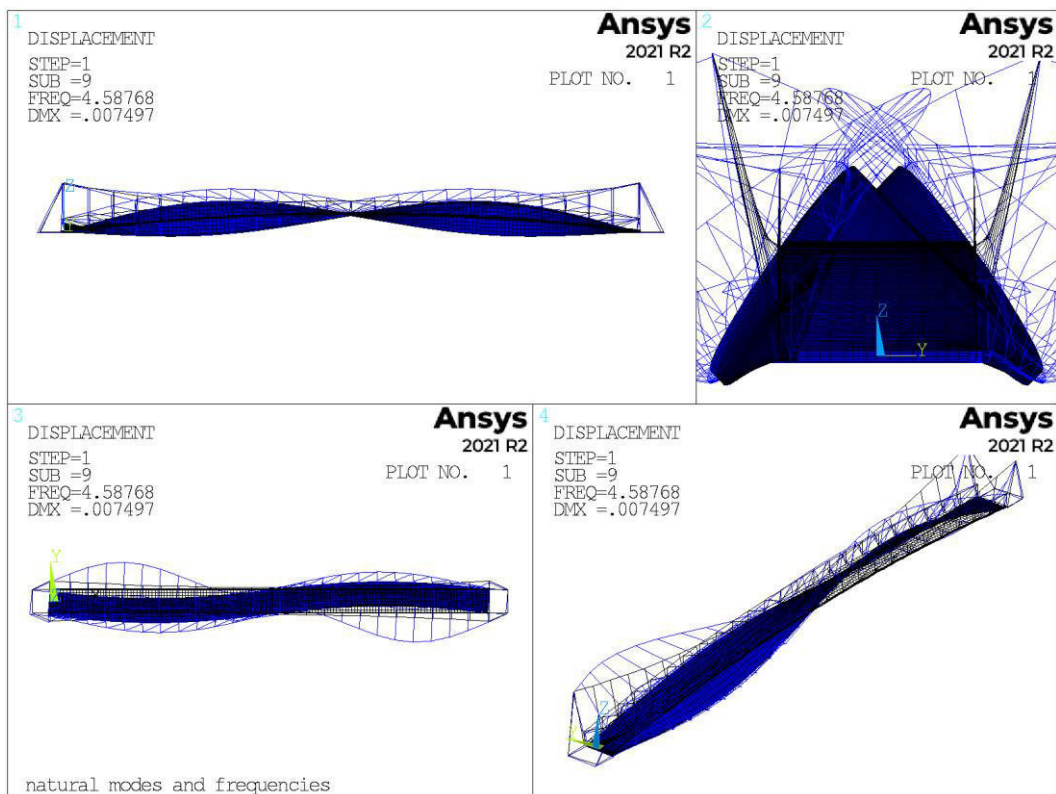
Obr. 58 Šestý tvar



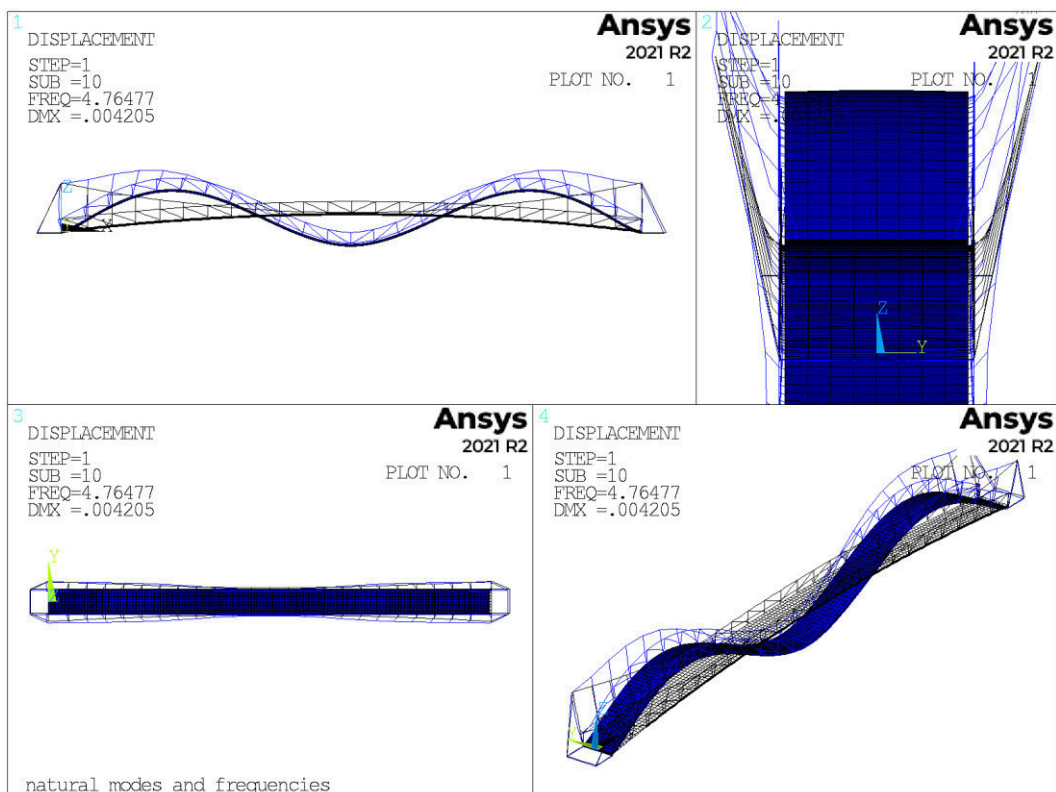
Obr. 59 Sedmý tvar



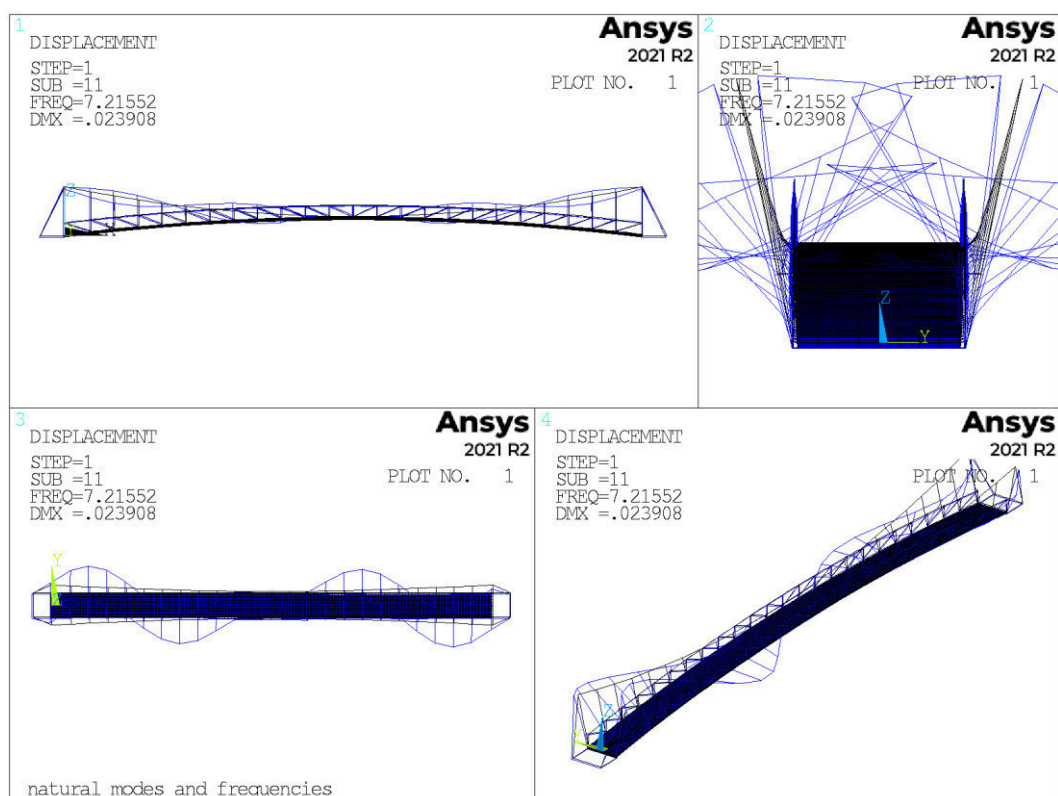
Obr. 60 Osmý tvar



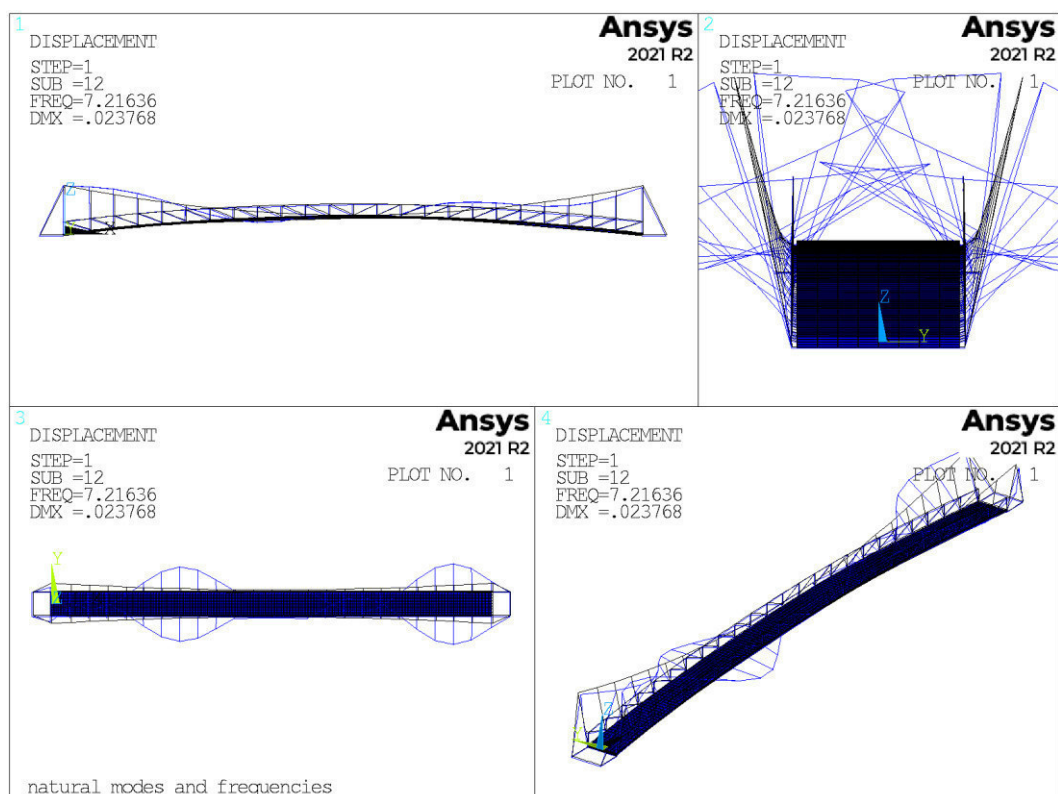
Obr. 61 Devátý tvar



Obr. 62 Desátý tvar



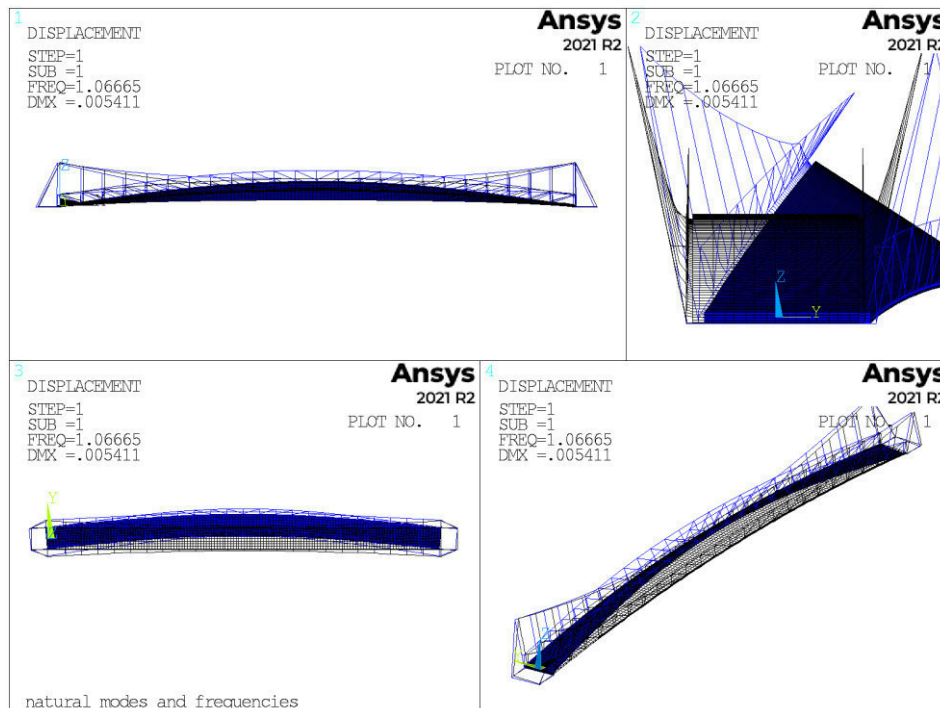
Obr. 63 Jedenáctý tvar



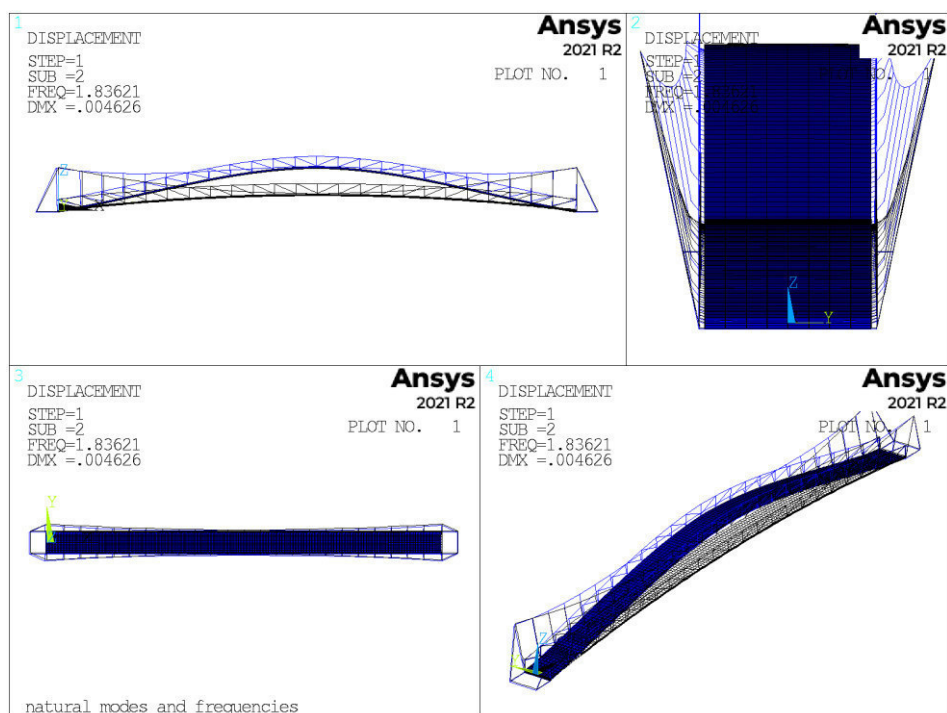
Obr. 64 Dvanáctý tvar

7.3 Modální analýza modelu 02

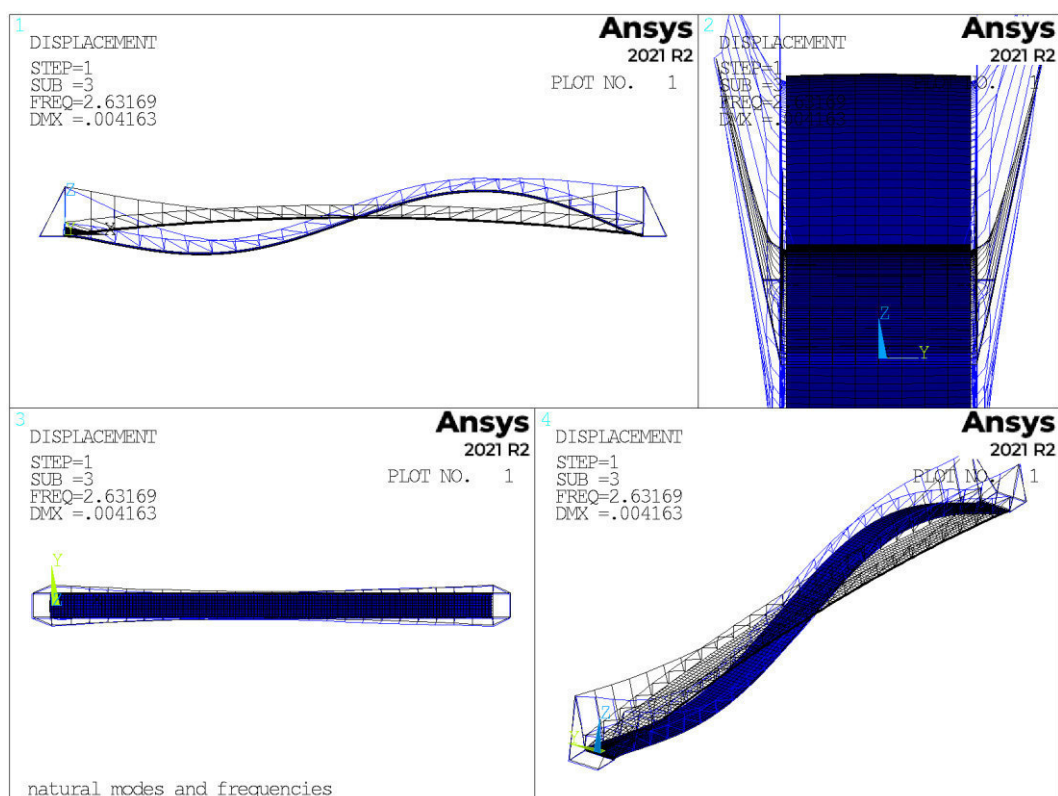
7.3.1 Model 02a - podepření ux bráněno v opěrách



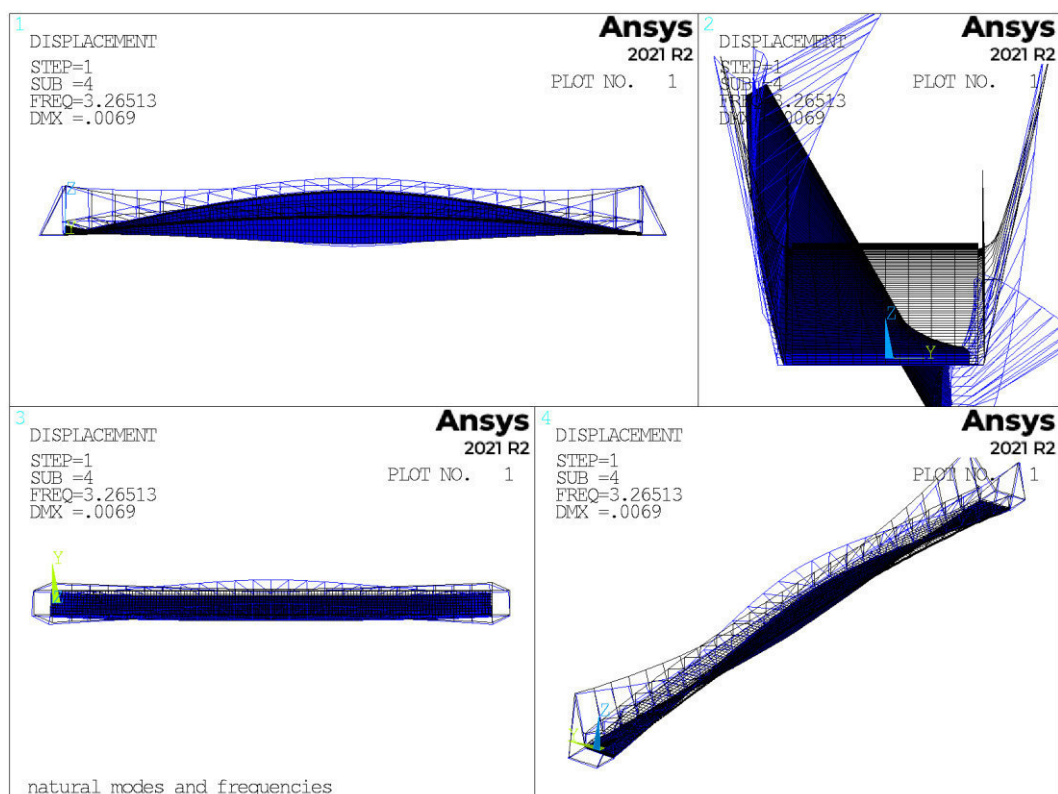
Obr. 65 První tvar



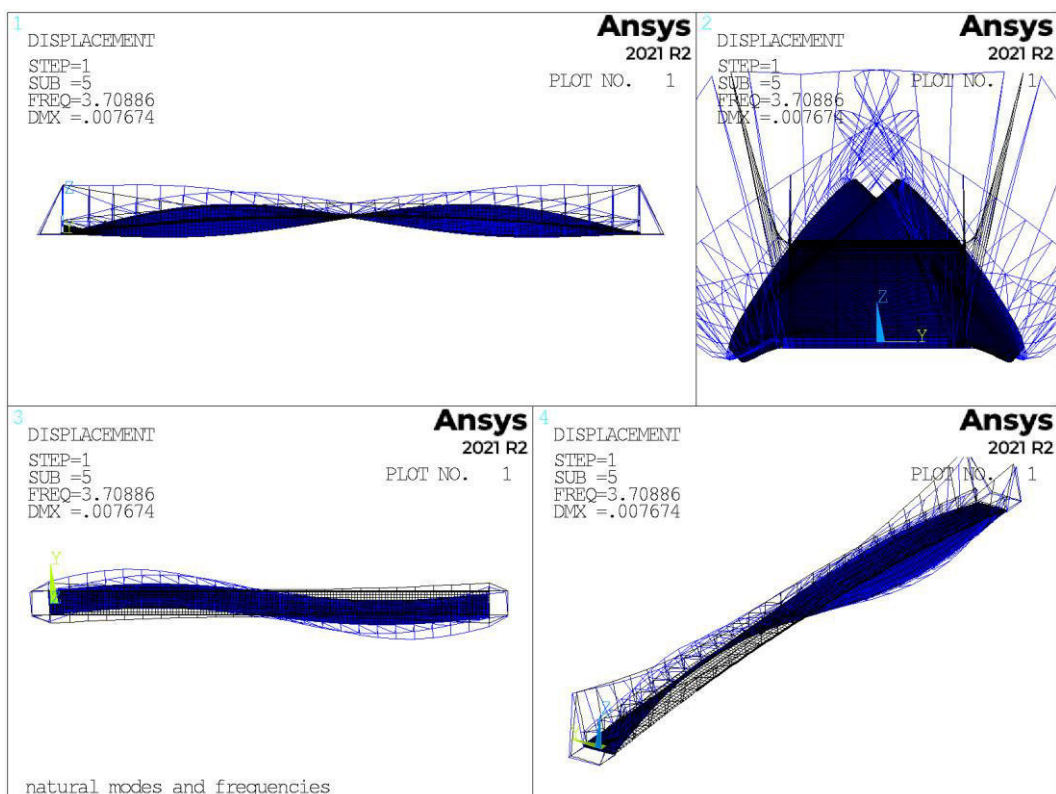
Obr. 66 Druhý tvar



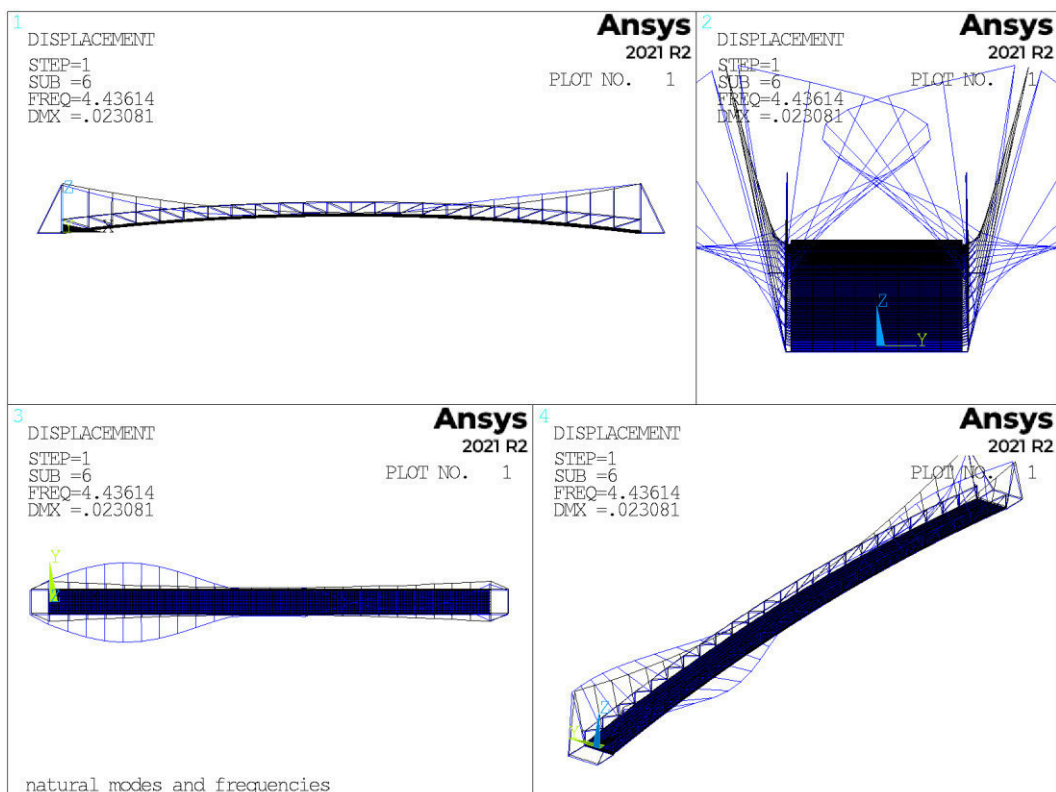
Obr. 67 Třetí tvar



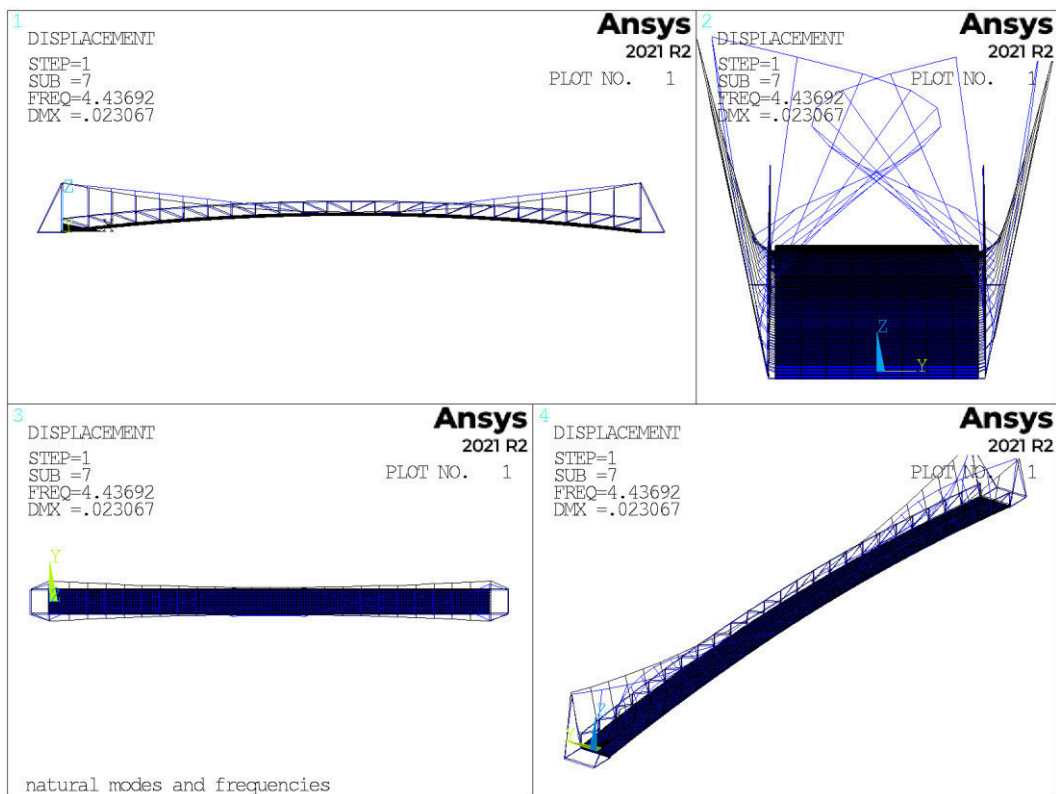
Obr. 68 Čtvrtý tvar



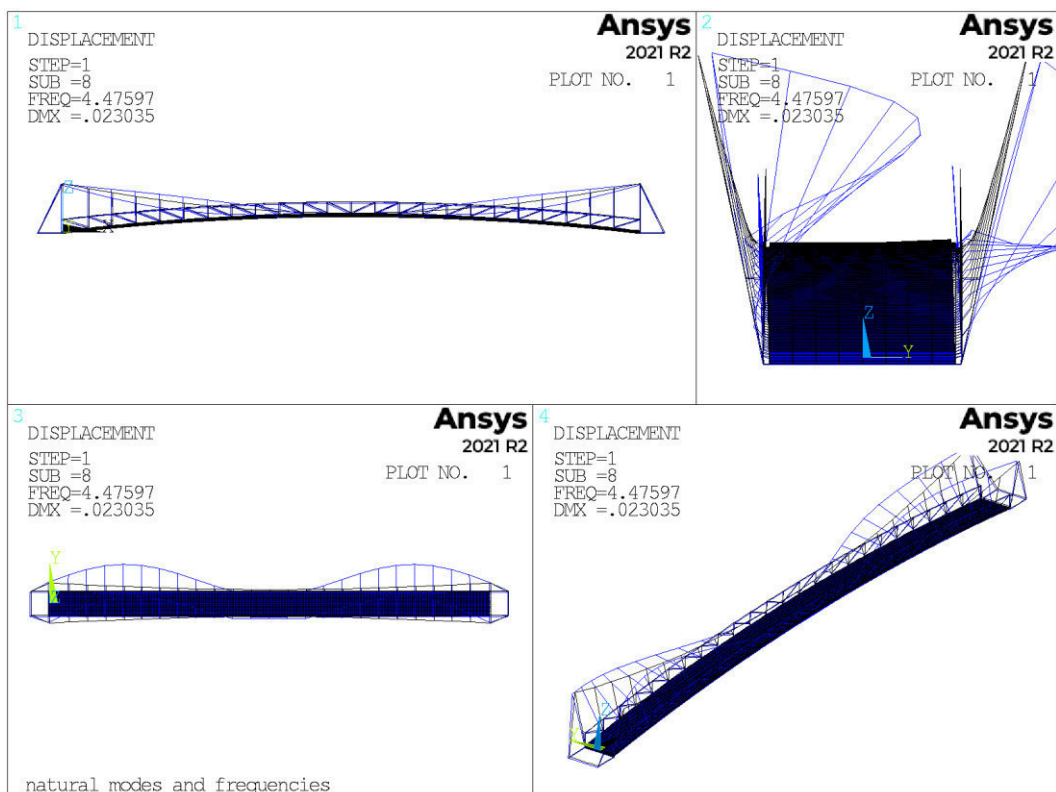
Obr. 69 Pátý tvar



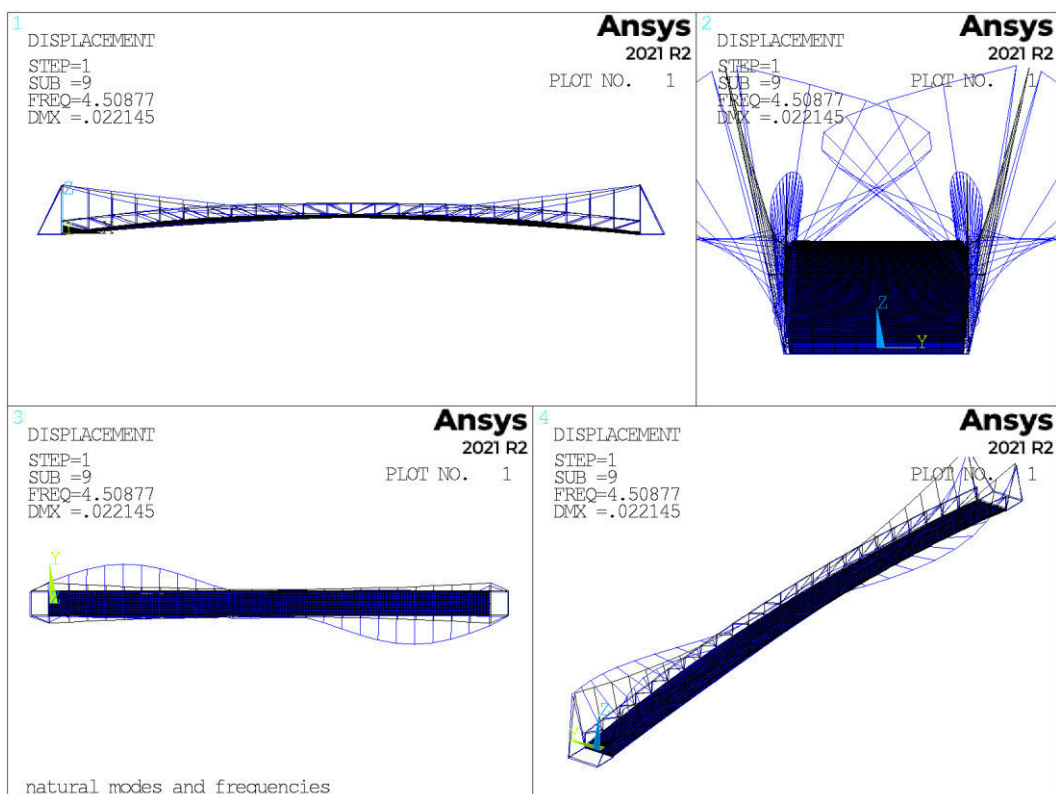
Obr. 70 Šestý tvar



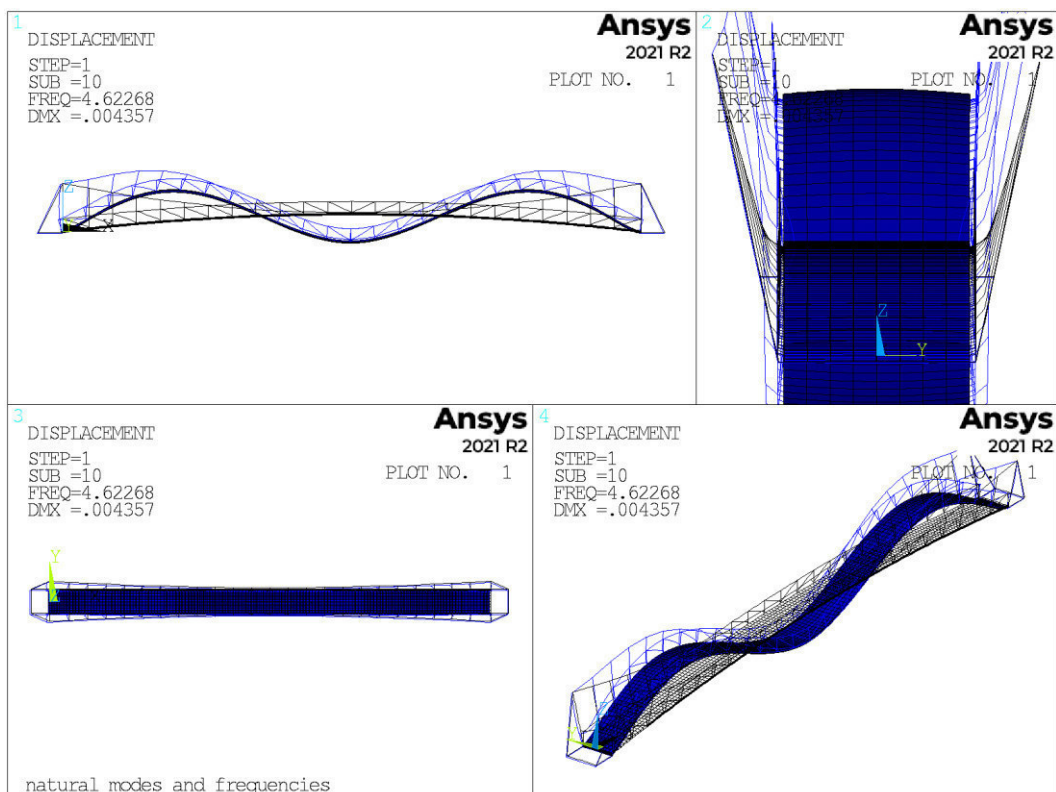
Obr. 71 Sedmý tvar



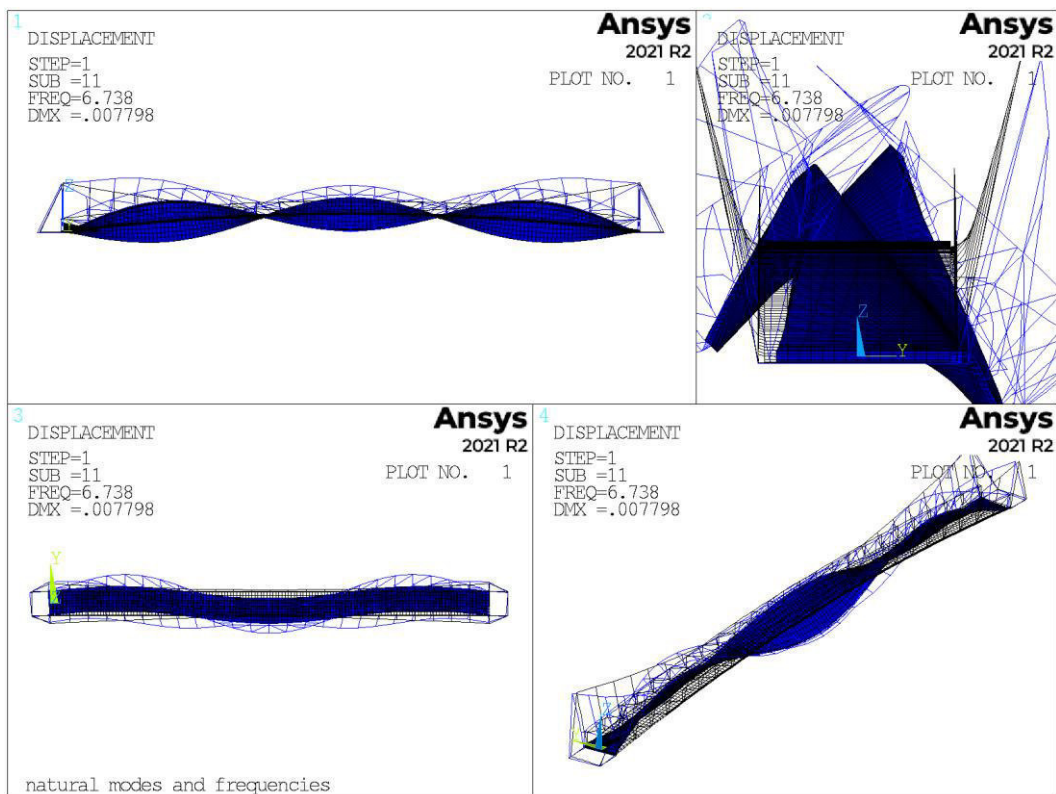
Obr. 72 Osmý tvar



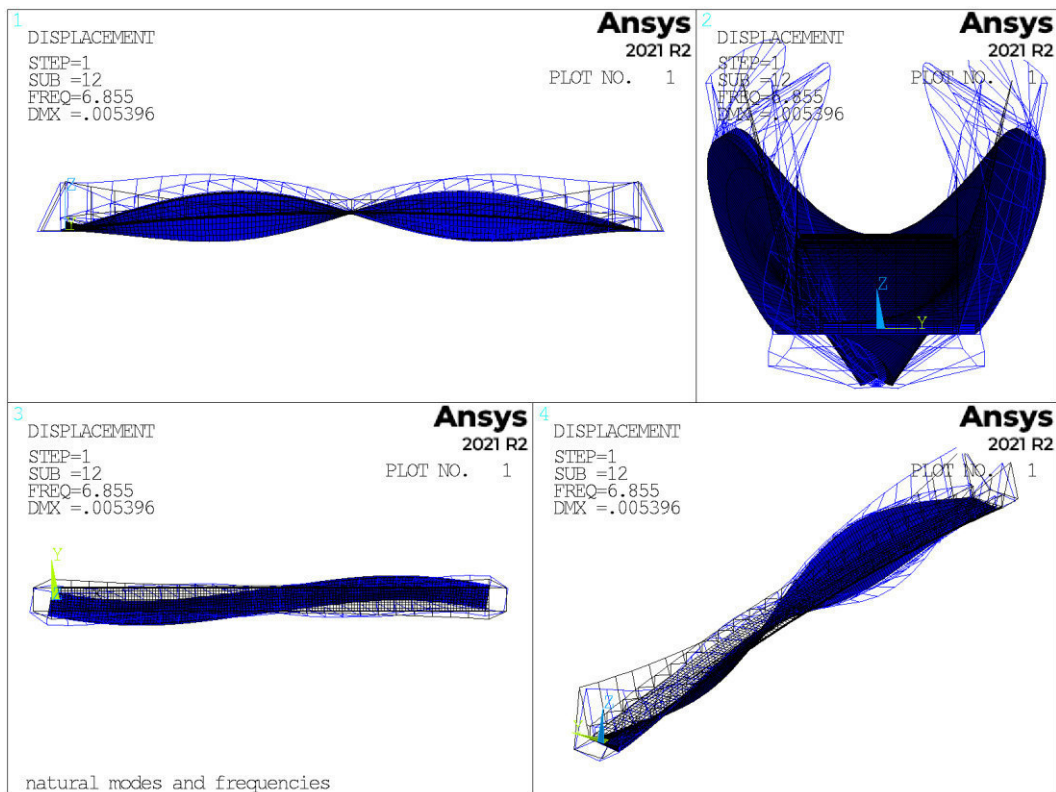
Obr. 73 Devátý tvar



Obr. 74 Desátý tvar

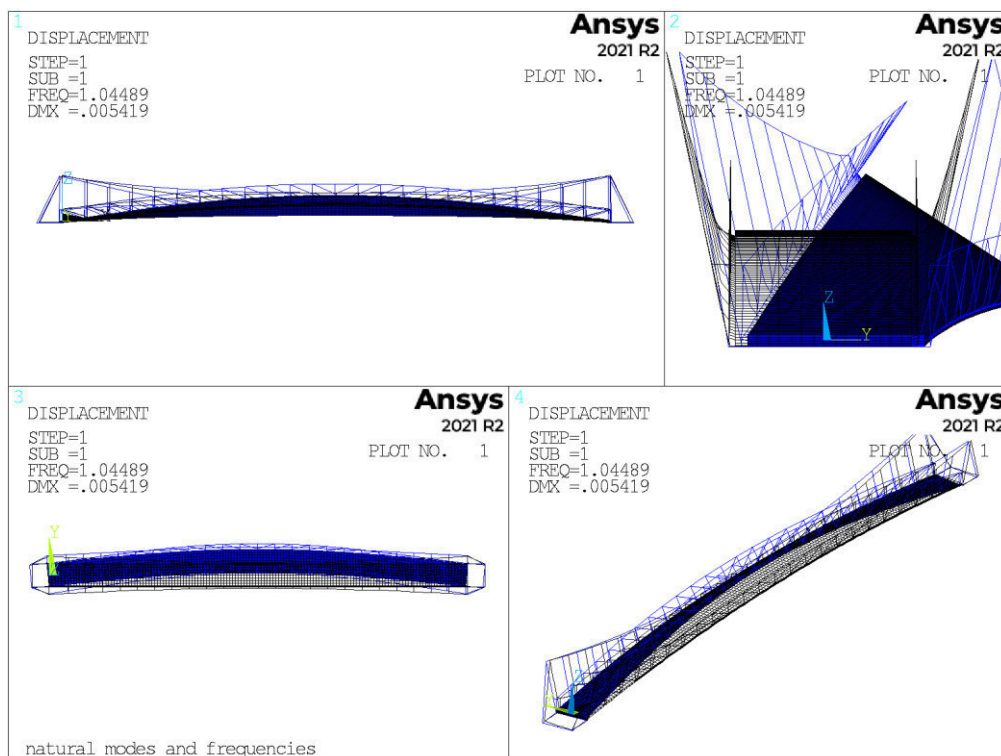


Obr. 75 Jedenáctý tvar

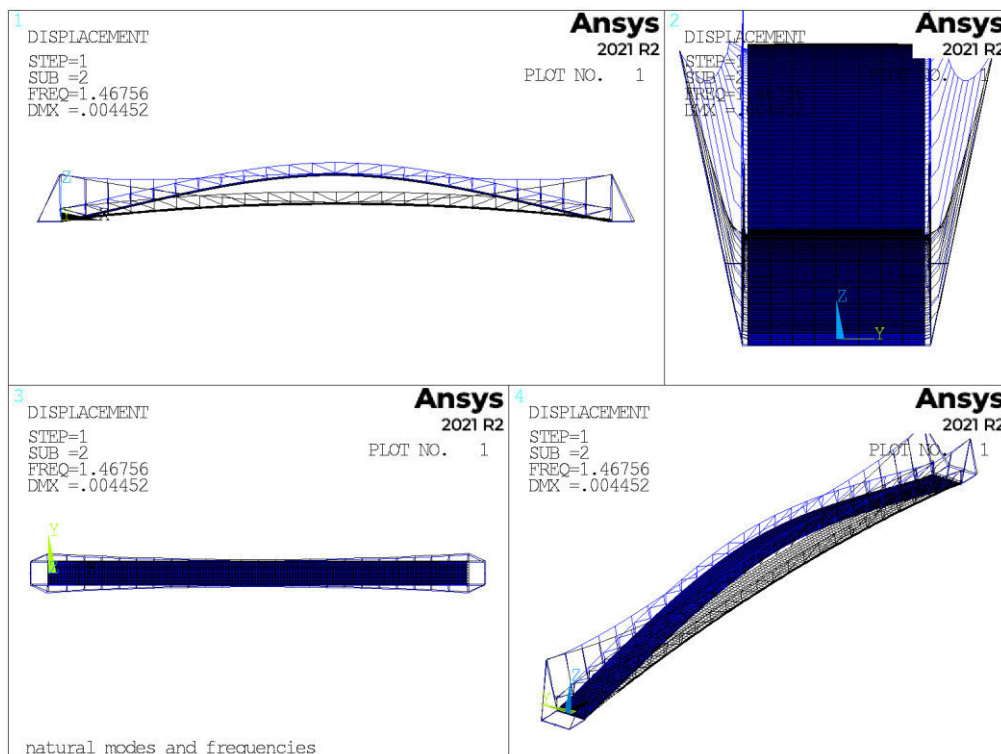


Obr. 76 Dvanáctý tvar

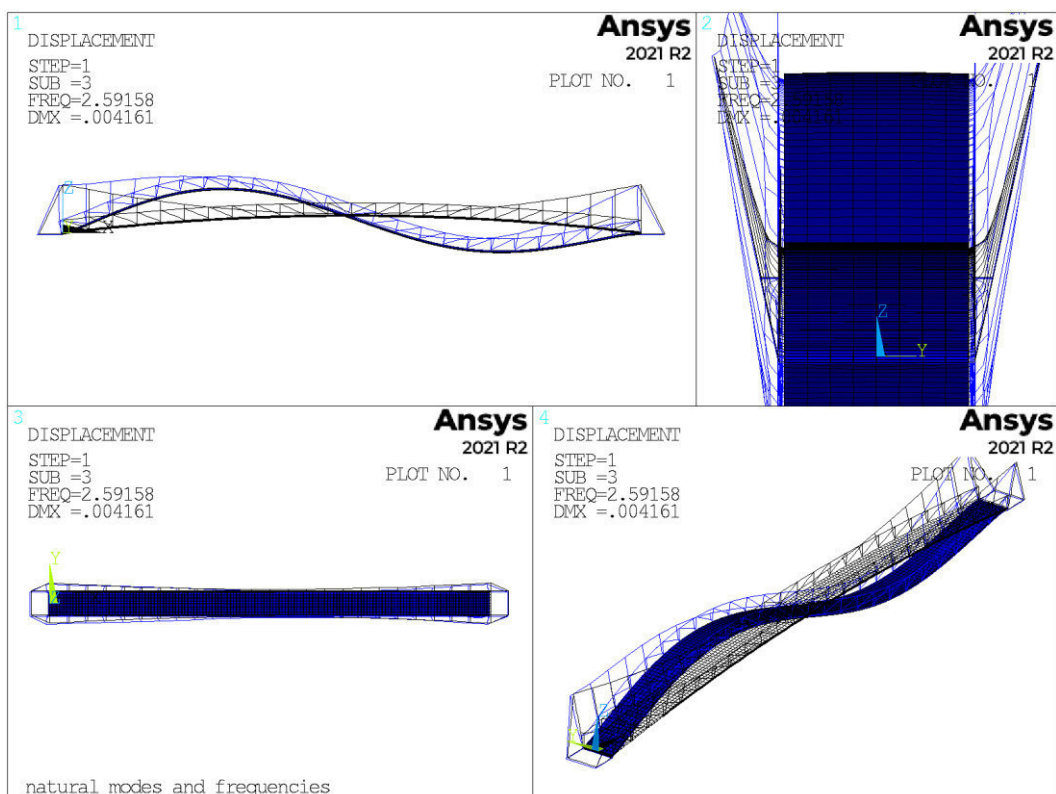
7.3.2 Model 02b - podepření ux pomocí pružin



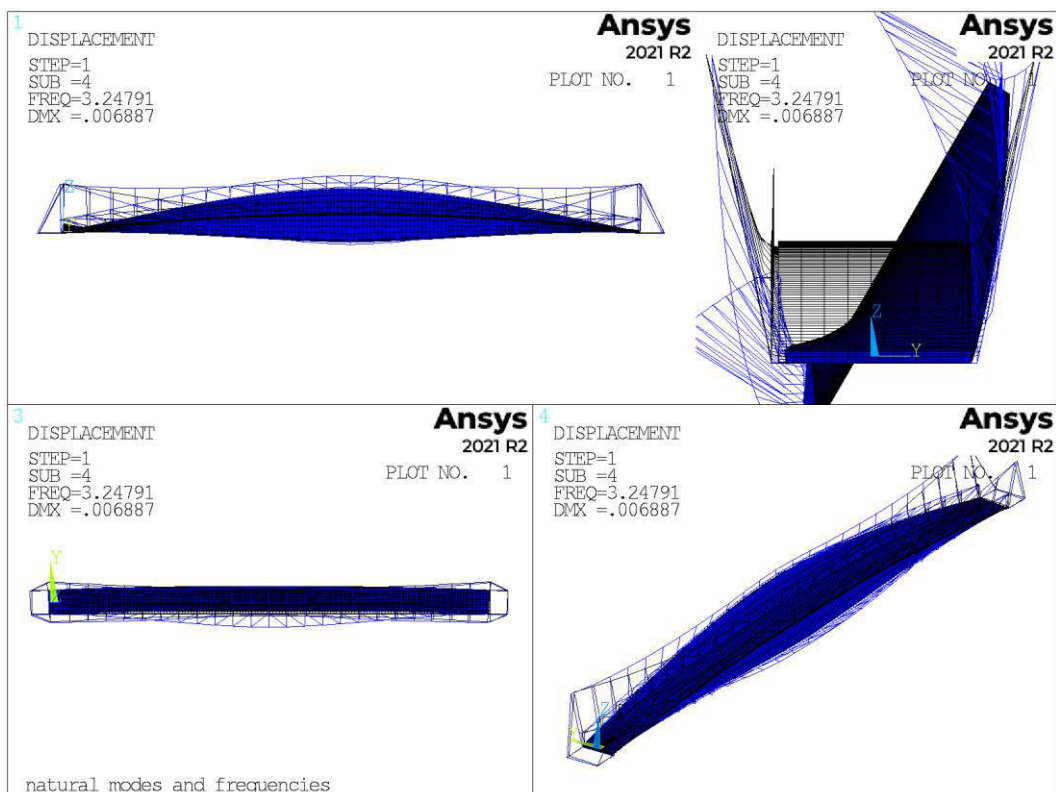
Obr. 77 První tvar



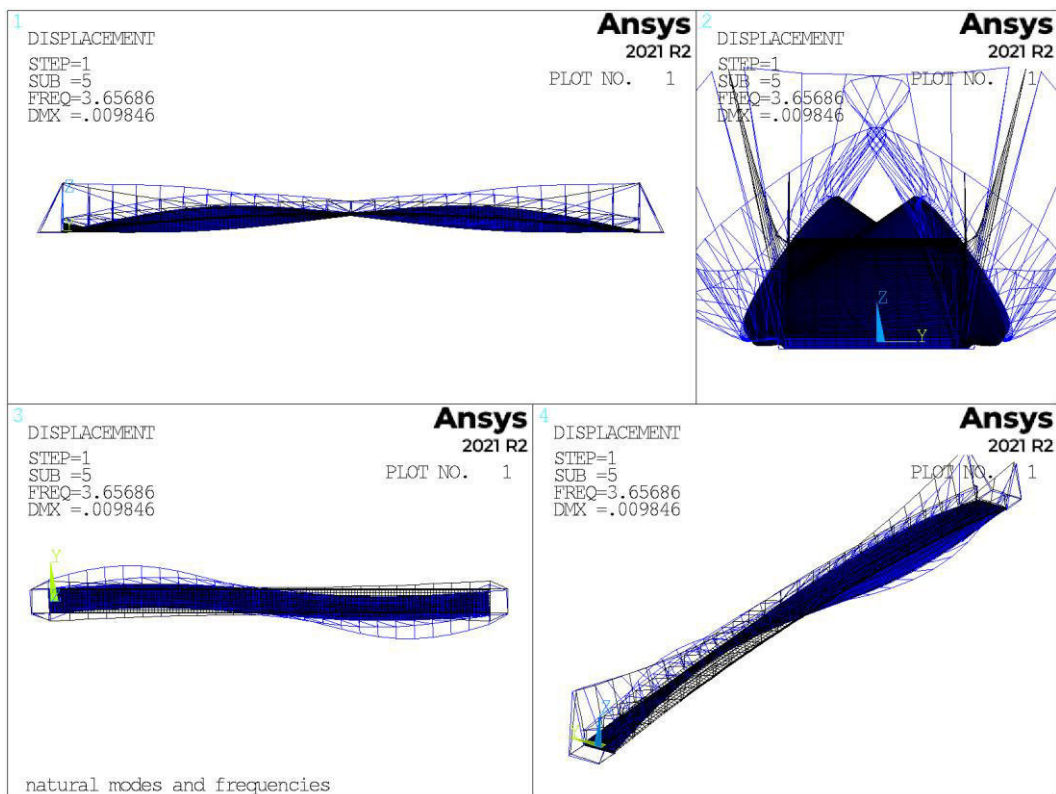
Obr. 78 Druhý tvar



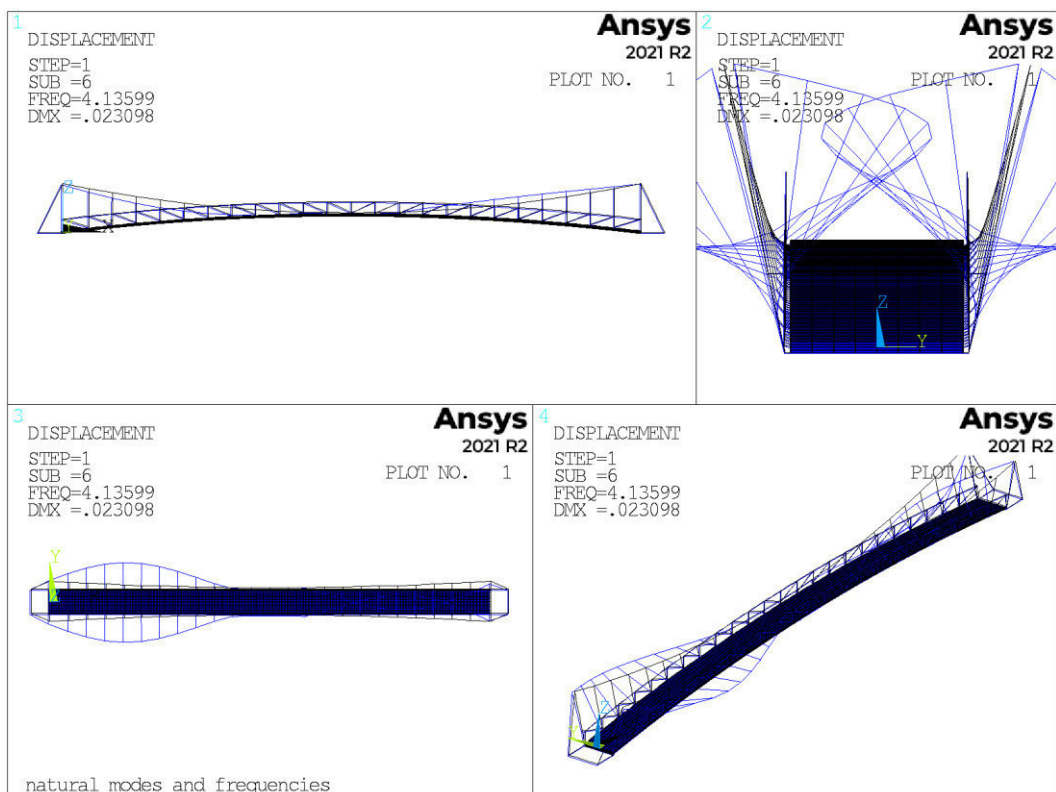
Obr. 79 Třetí tvar



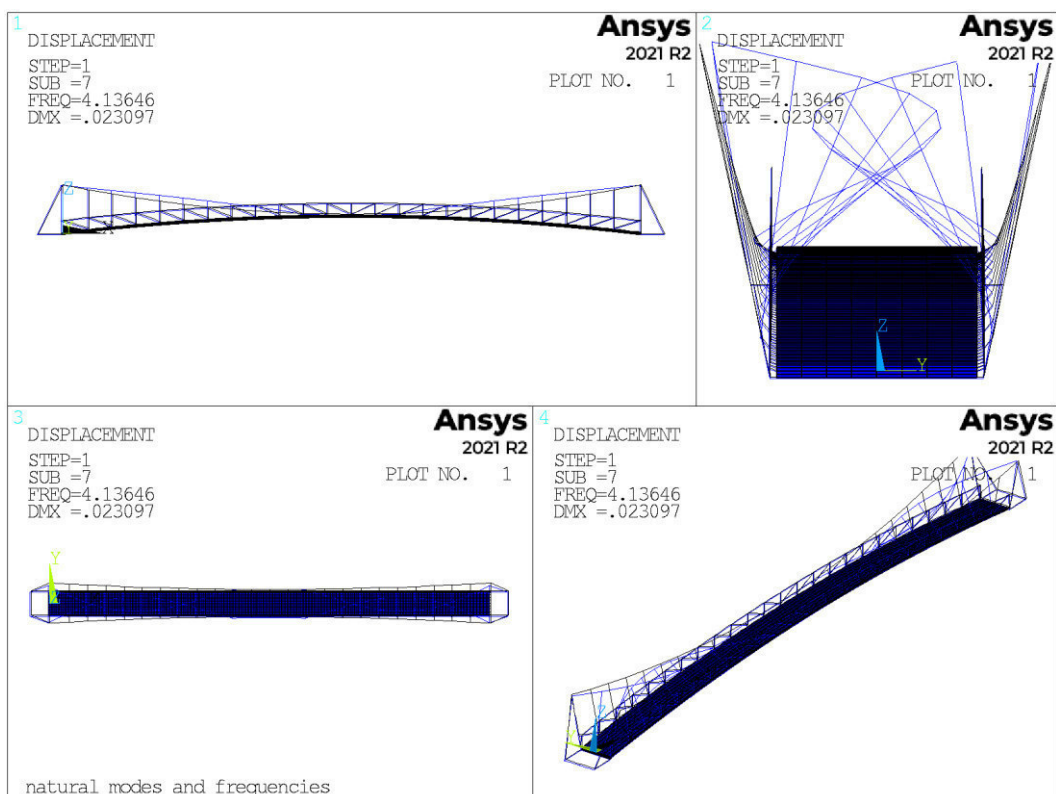
Obr. 80 Čtvrtý tvar



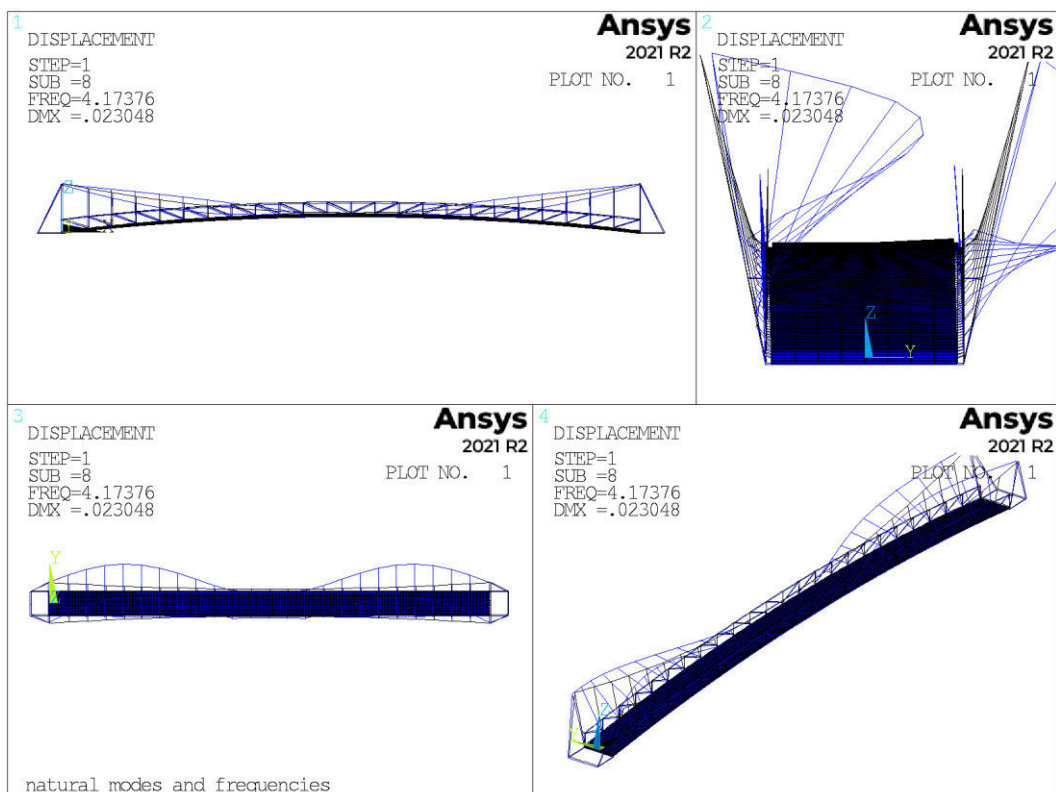
Obr. 81 Pátý tvar



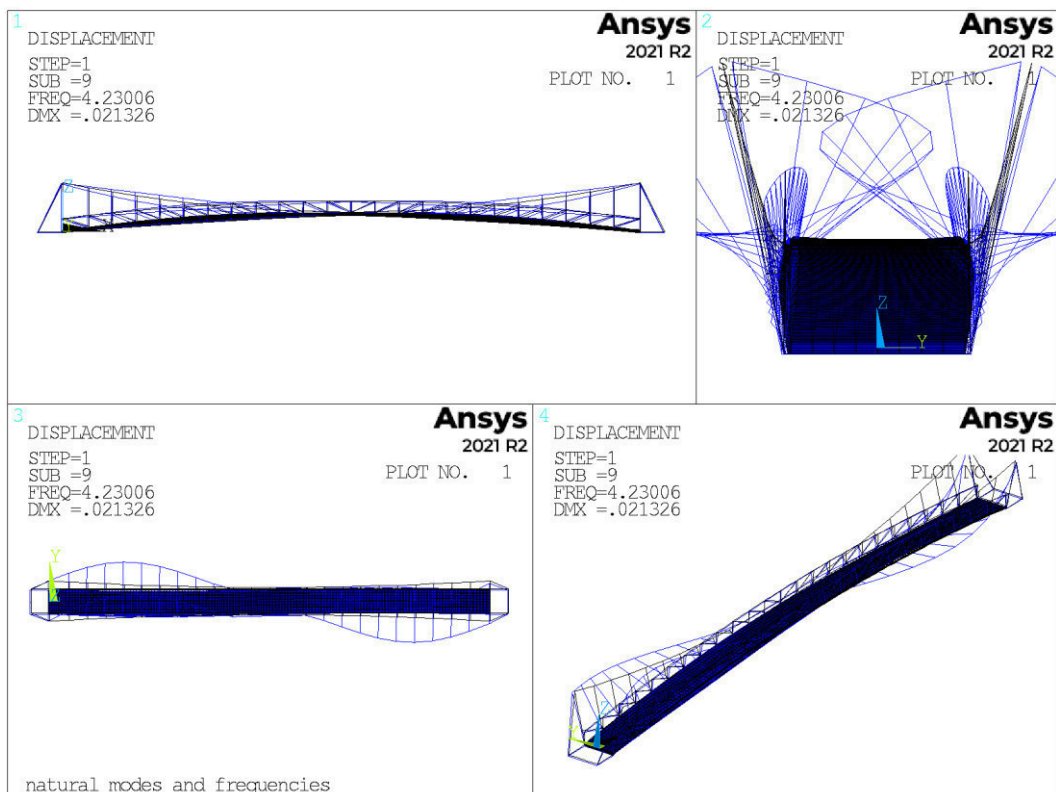
Obr. 82 Šestý tvar



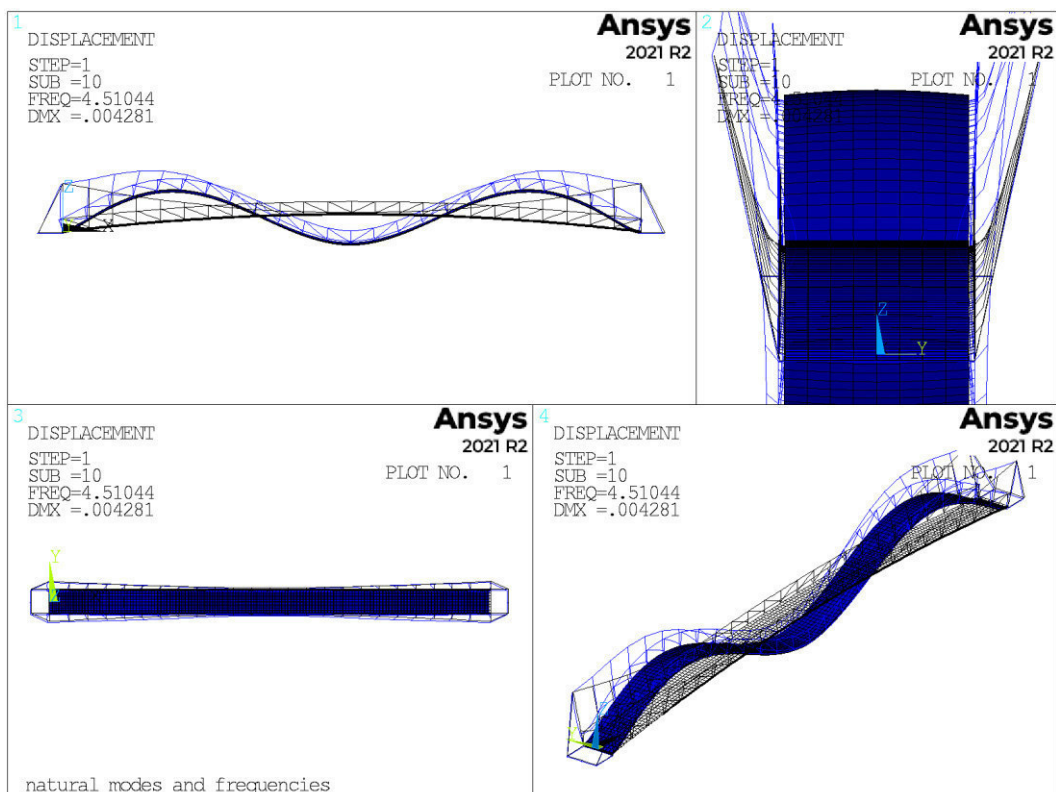
Obr. 83 Sedmý tvar



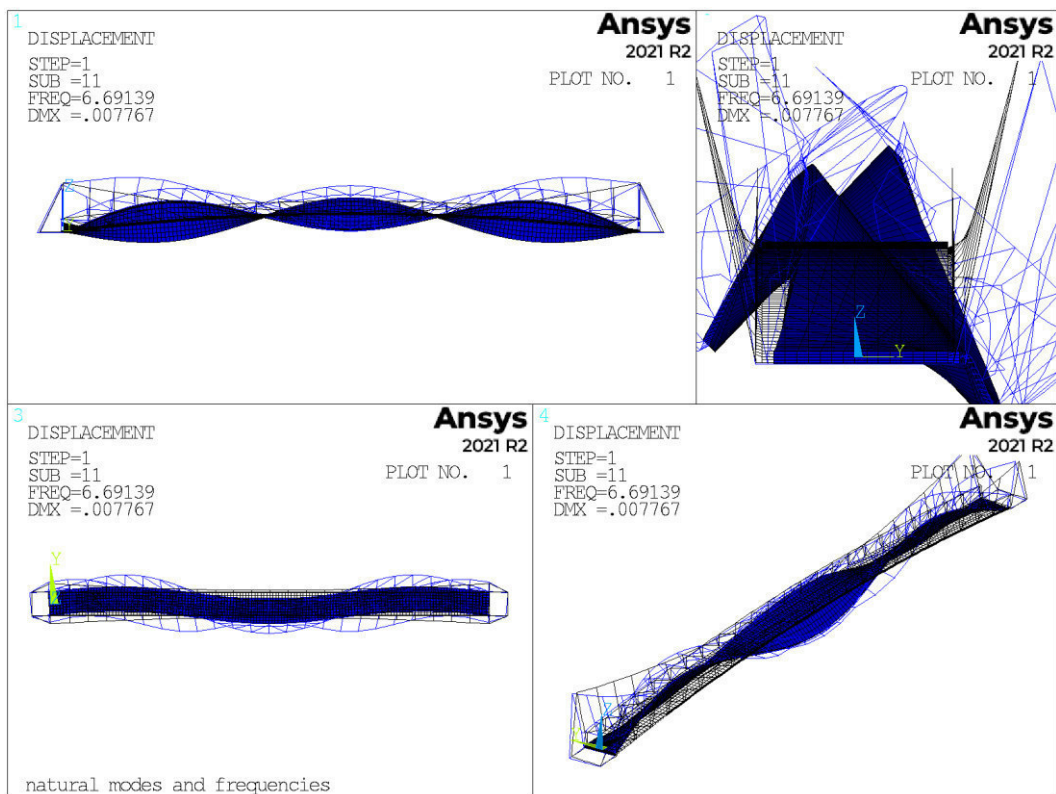
Obr. 84 Osmý tvar



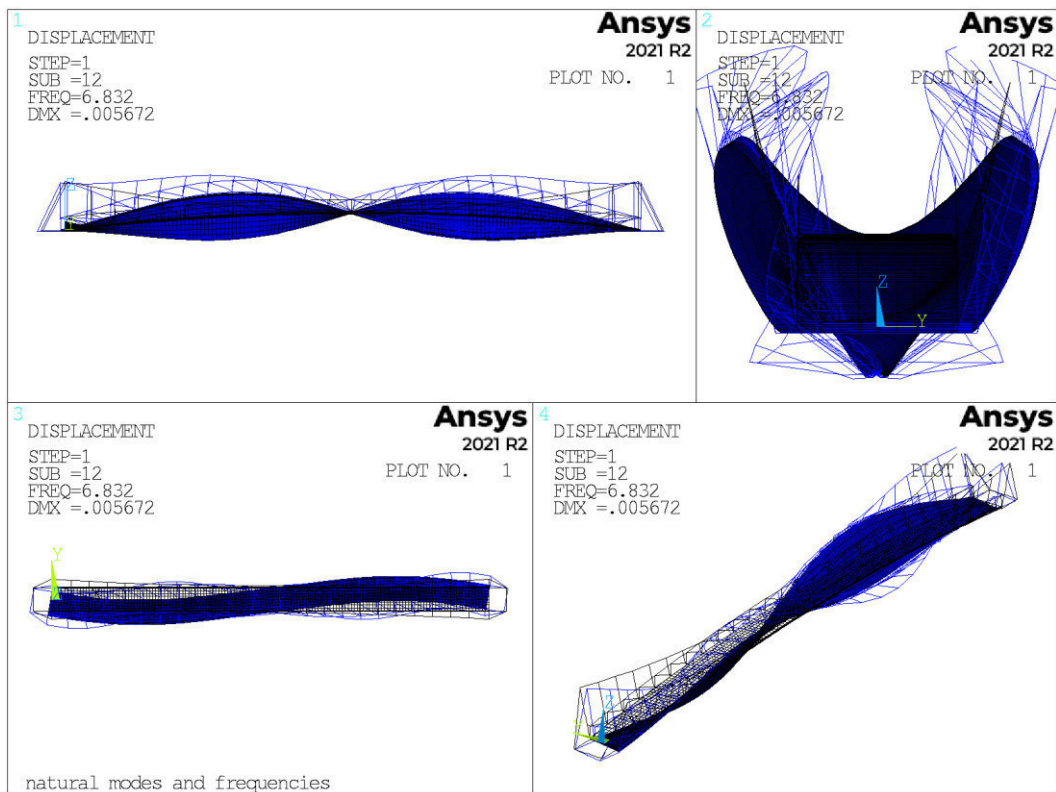
Obr. 85 Devátý tvar



Obr. 86 Desátý tvar

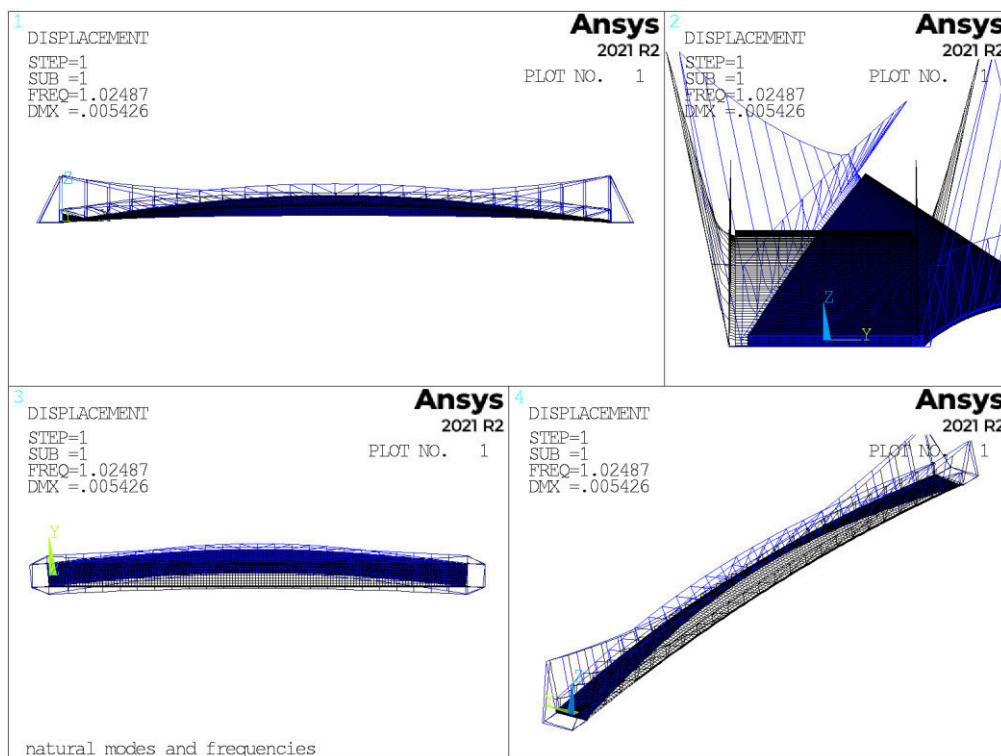


Obr. 87 Jedenáctý tvar

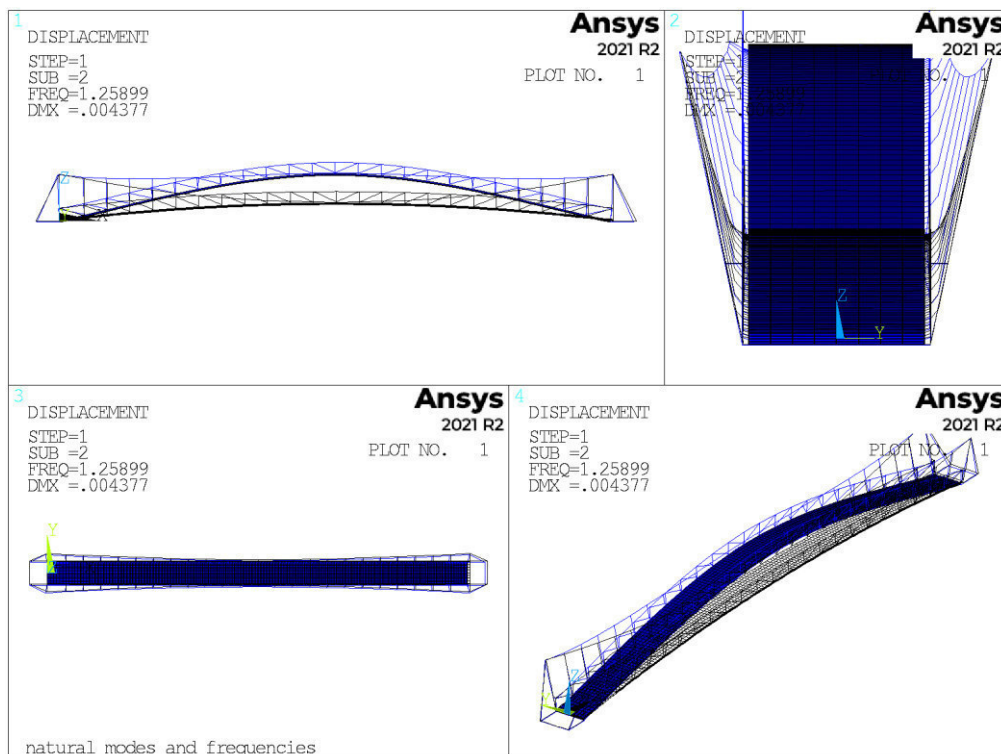


Obr. 88 Dvanáctý tvar

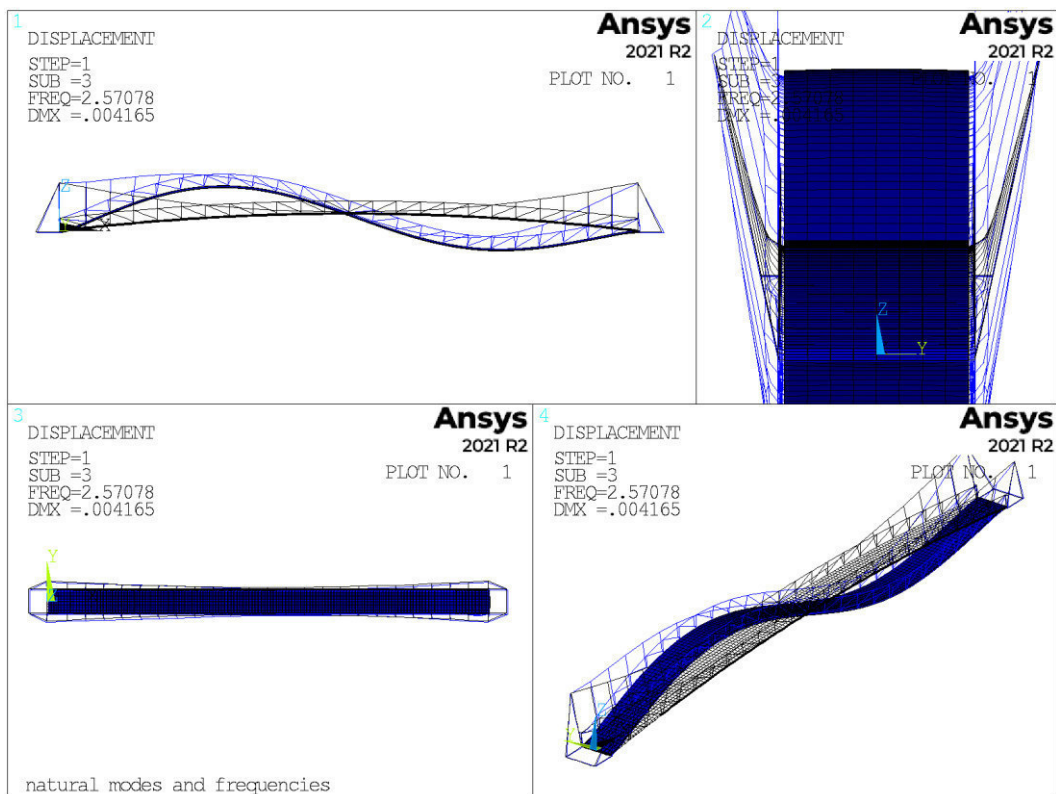
7.3.3 Model 02c - podepření ux volné



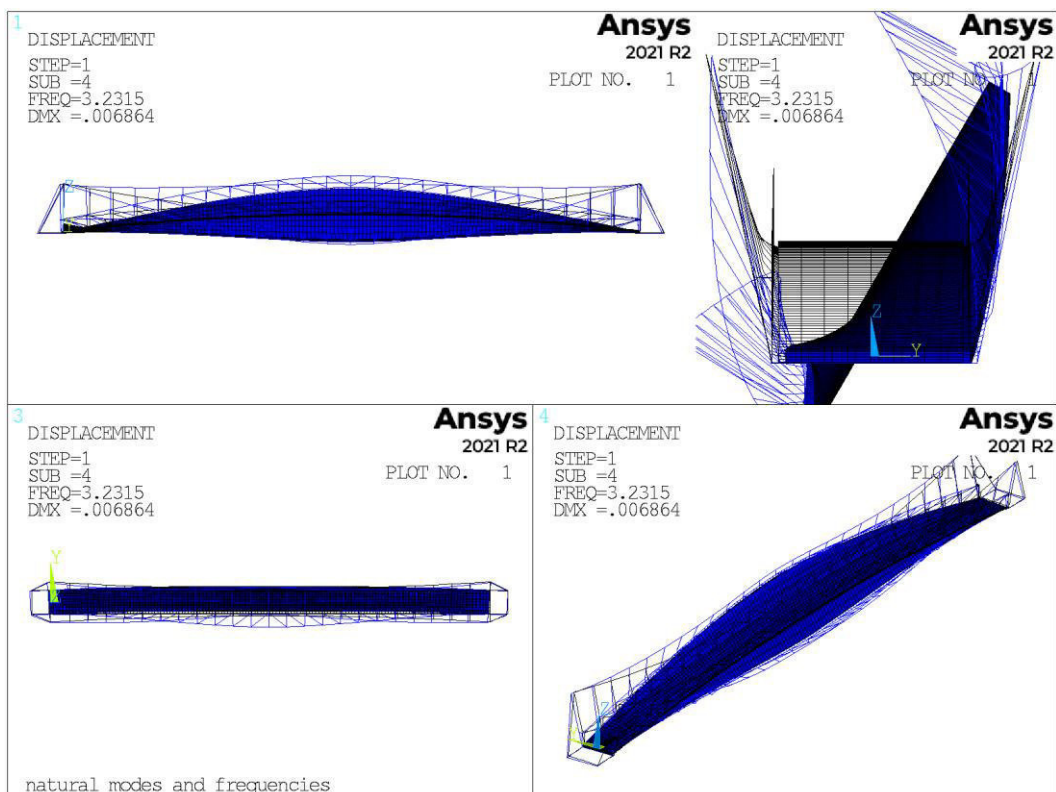
Obr. 89 První tvar



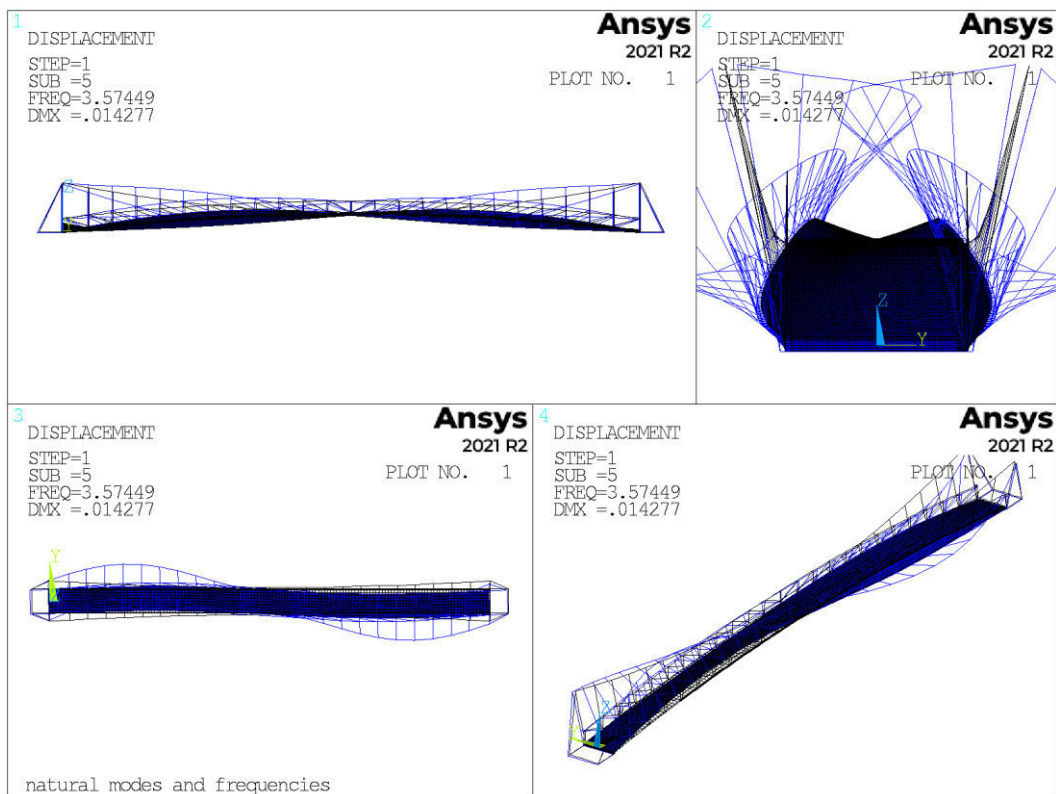
Obr. 90 Druhý tvar



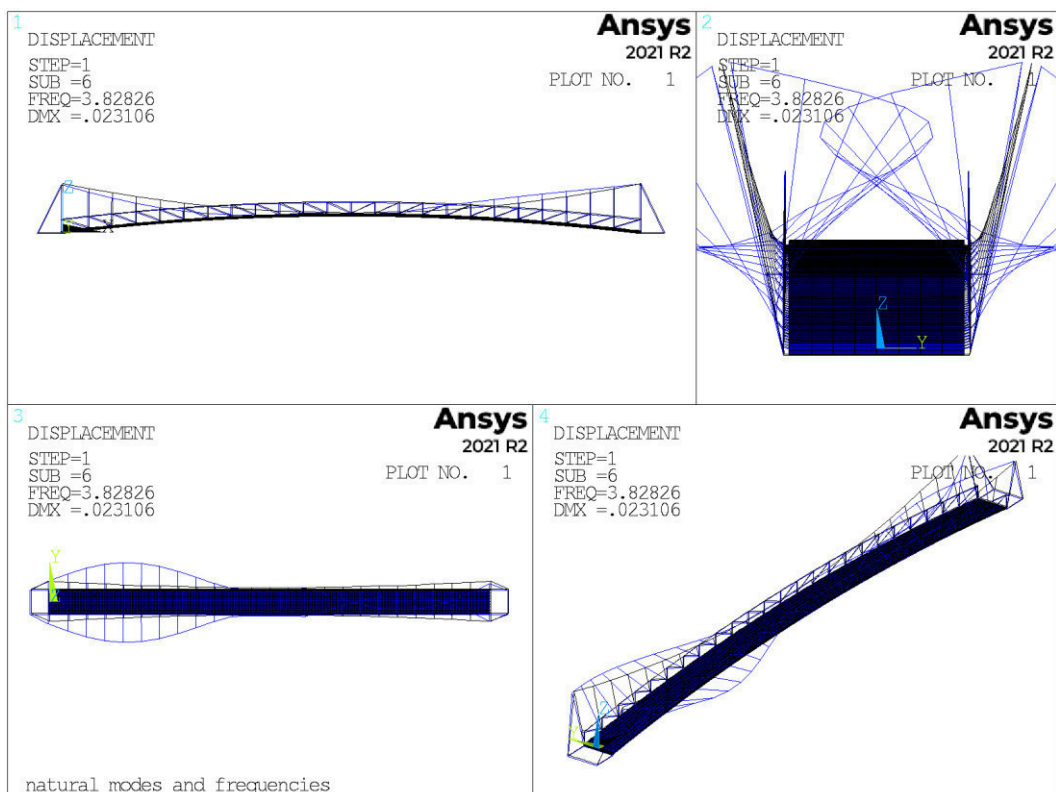
Obr. 91 Třetí tvar



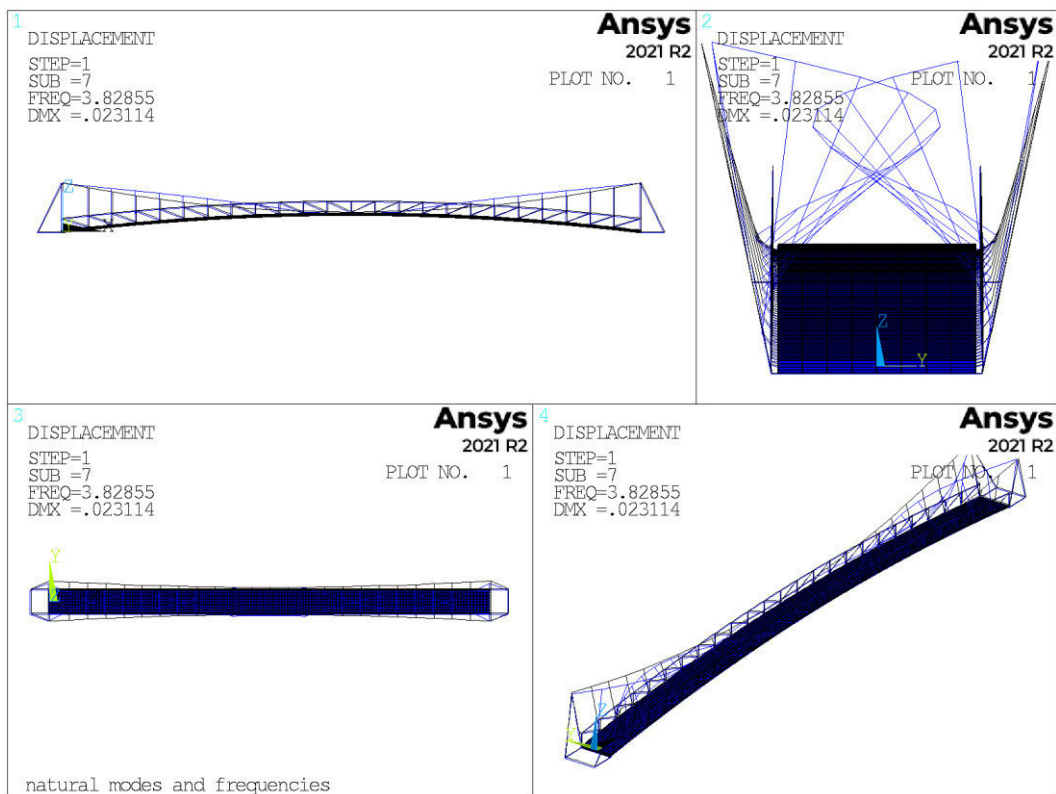
Obr. 92 Čtvrtý tvar



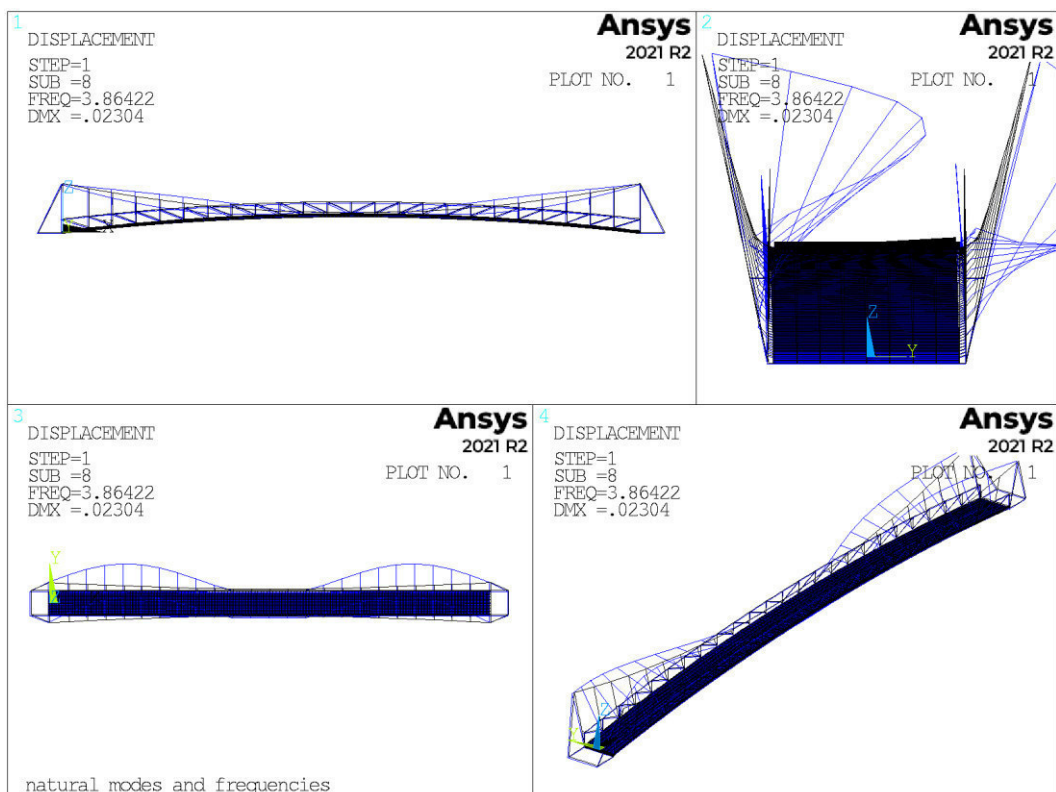
Obr. 93 Pátý tvar



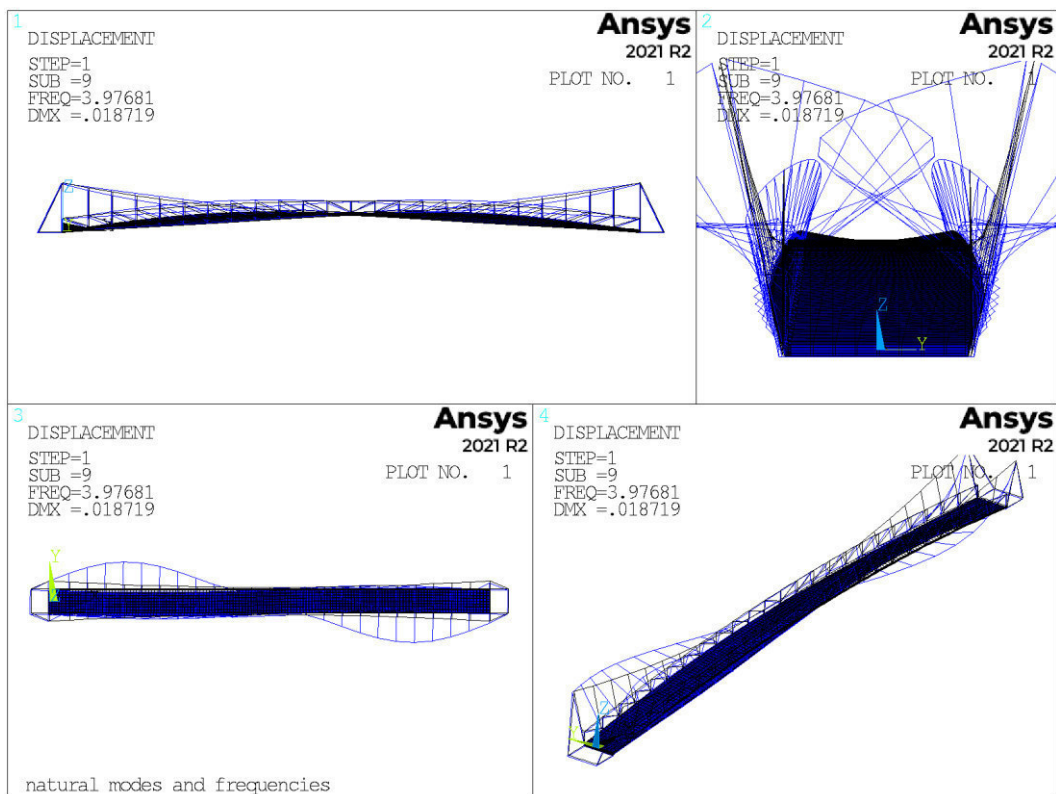
Obr. 94 Šestý tvar



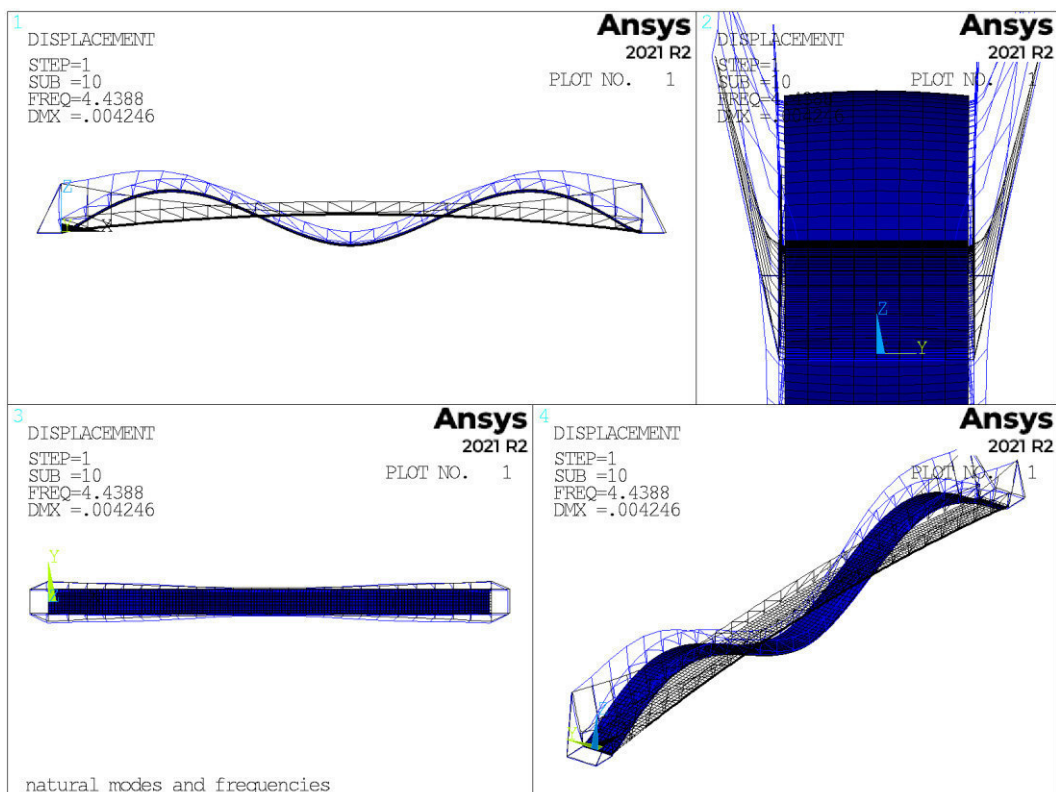
Obr. 95 Sedmý tvar



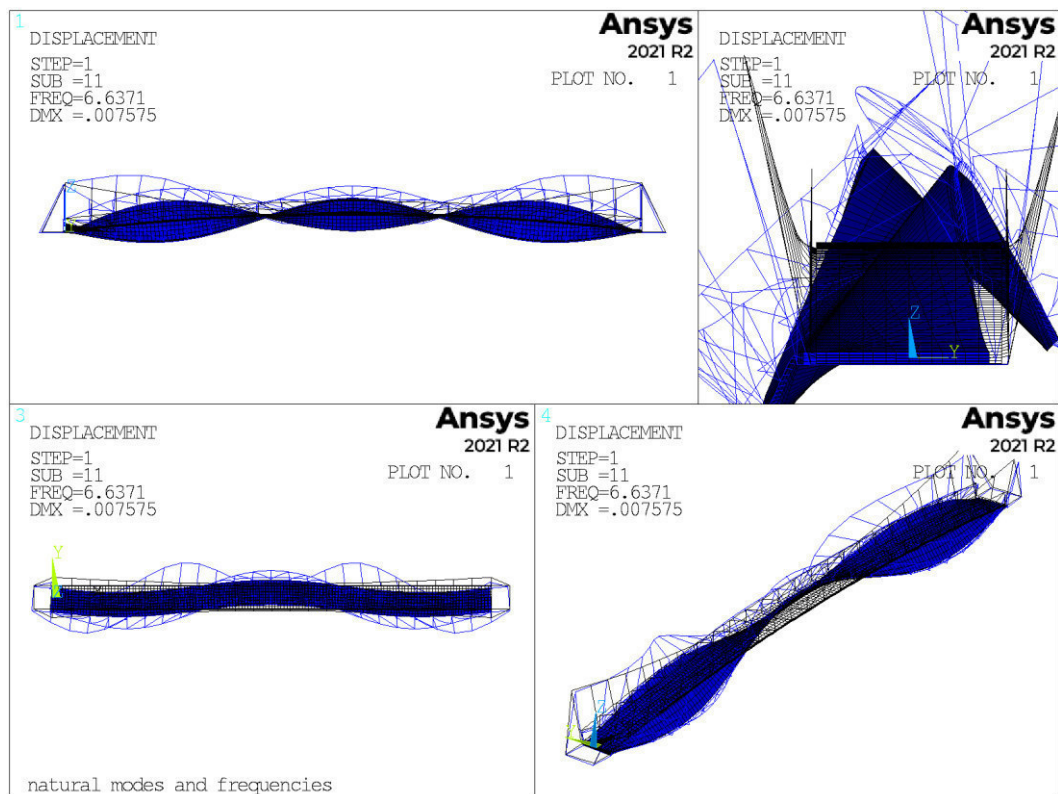
Obr. 96 Osmý tvar



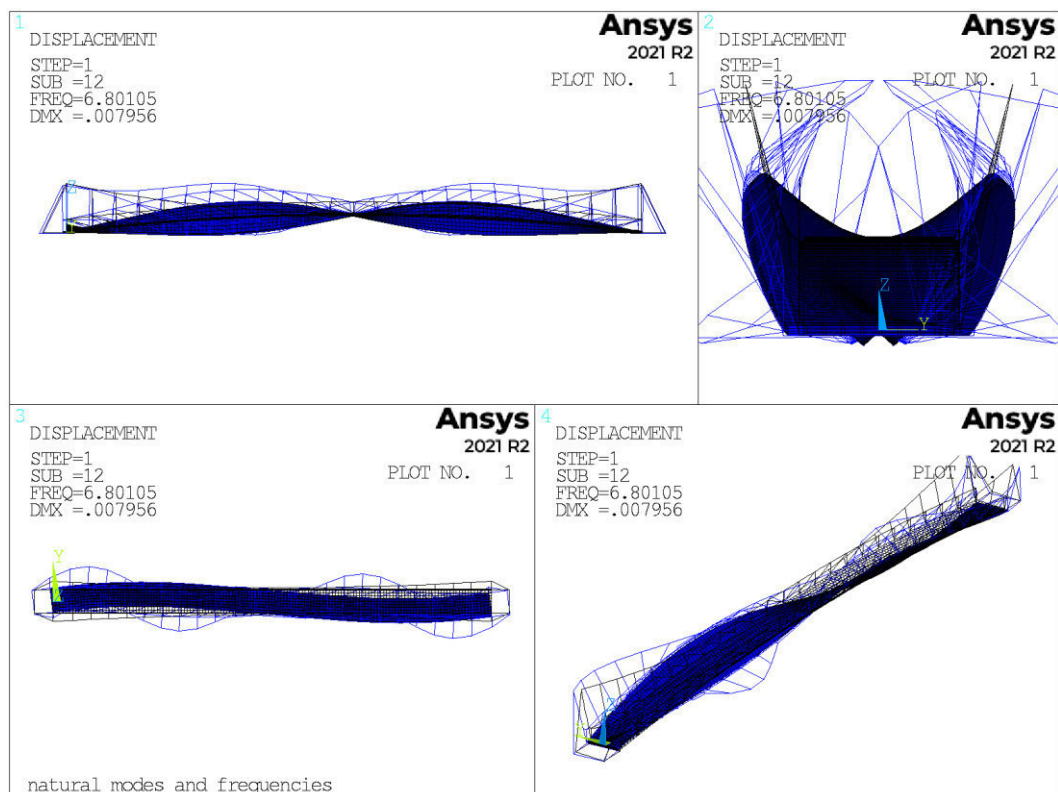
Obr. 97 Devátý tvar



Obr. 98 Desátý tvar



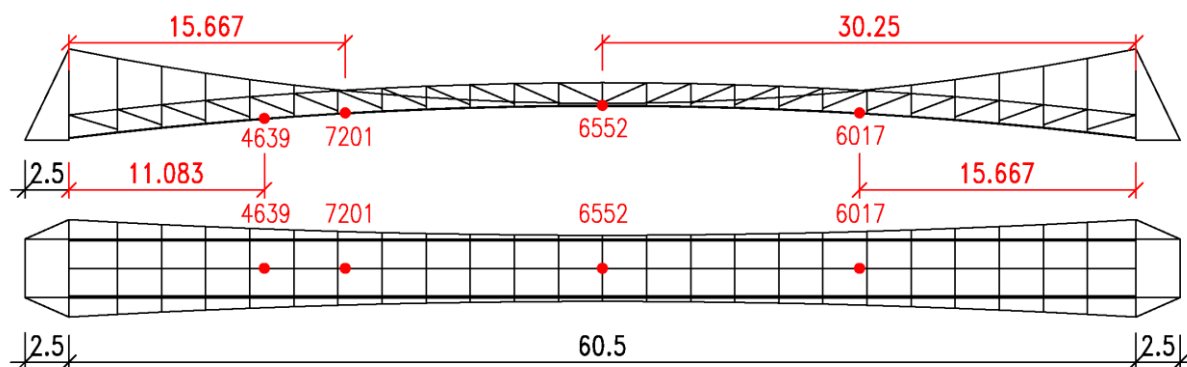
Obr. 99 Jedenáctý tvar



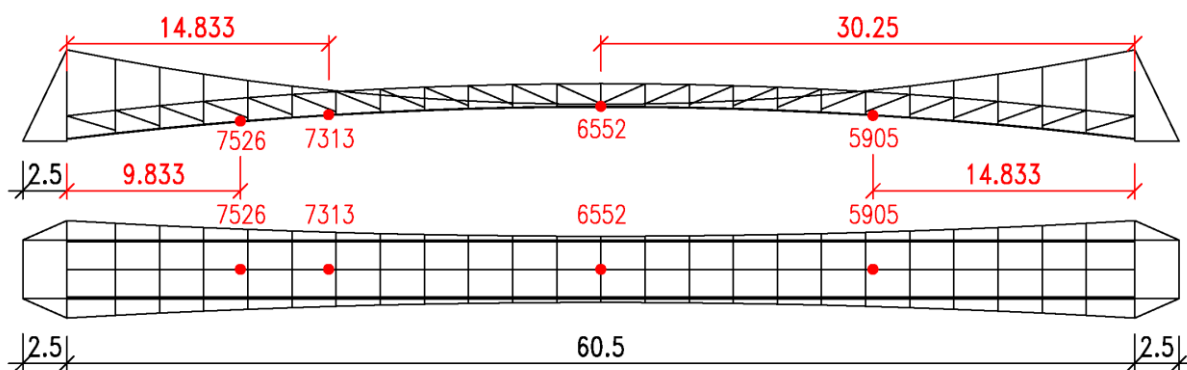
Obr. 100 Dvanáctý tvar

7.4 Harmonická analýza modelu 01

7.4.1 Sledované body



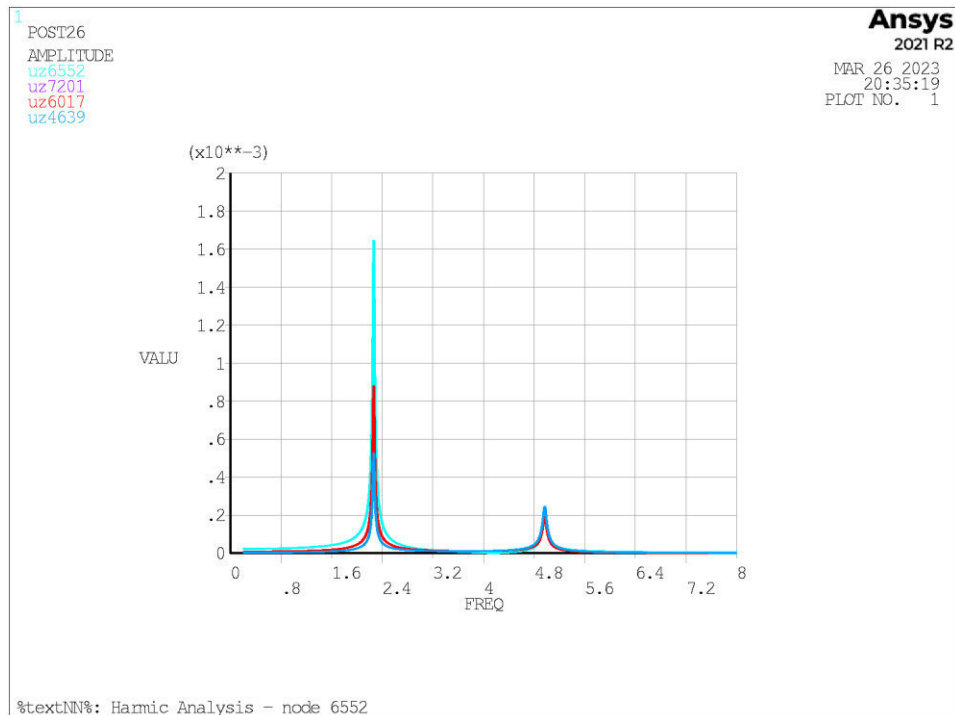
Obr. 101 Sledované body pro podélný směr



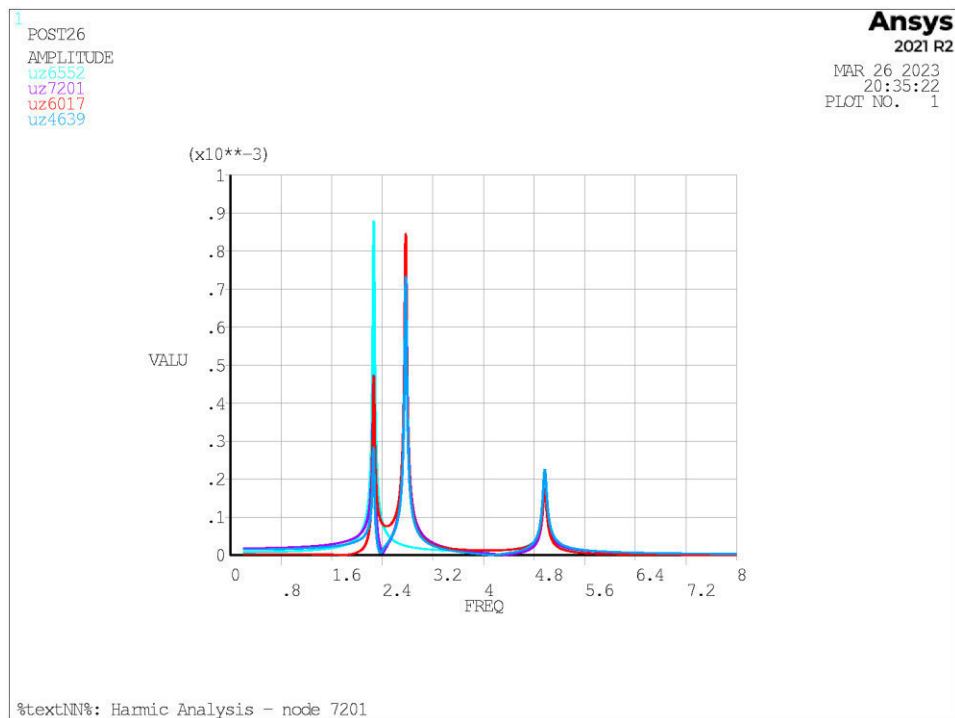
Obr. 102 Sledované body pro příčný směr

7.4.2 Model 01a - podepření ux bráněno v opěrách

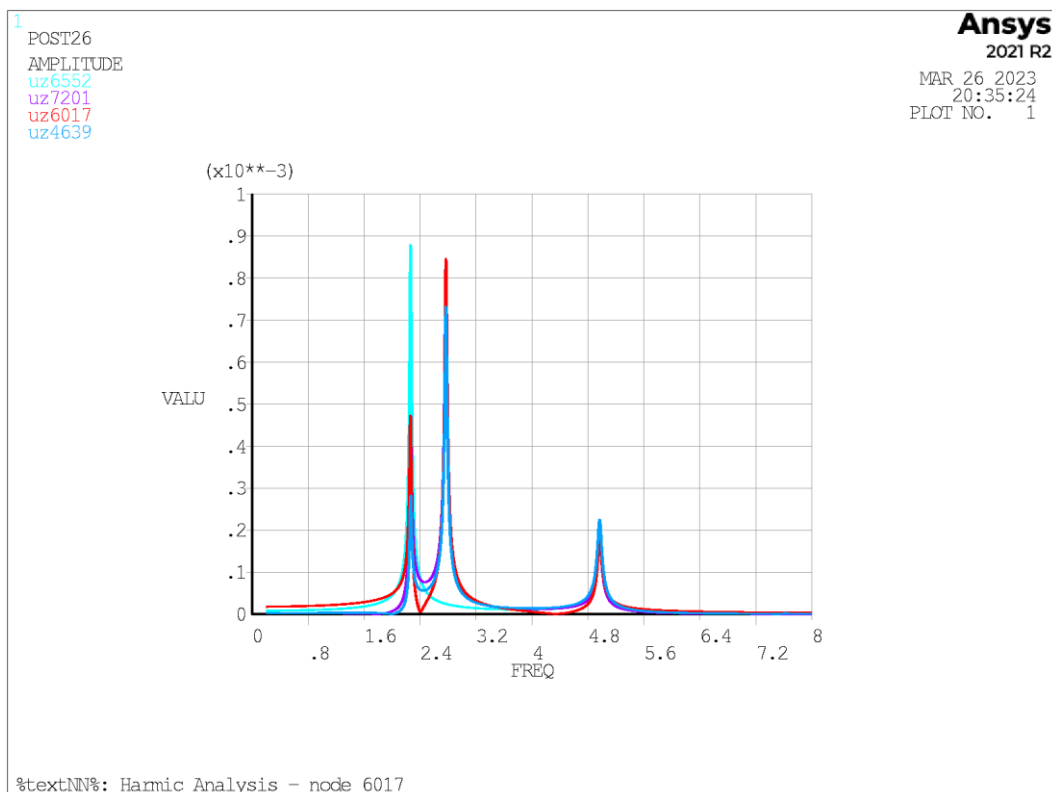
7.4.2.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



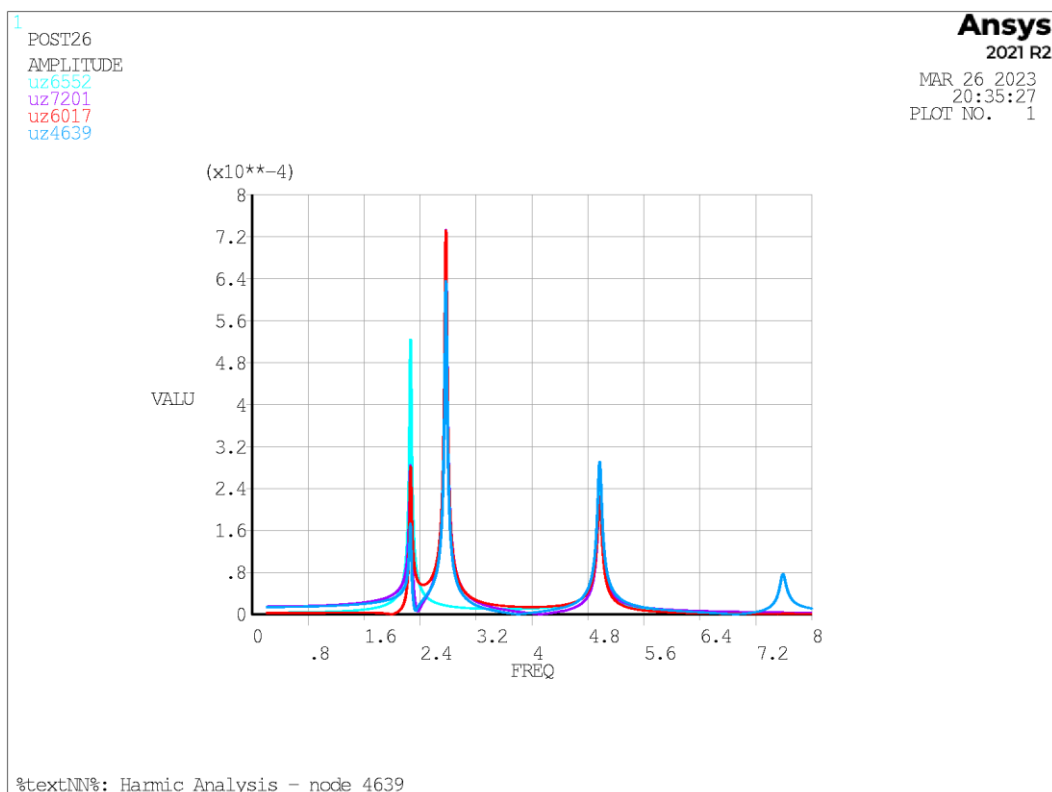
Obr. 103 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 104 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 105 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 106 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$$\begin{aligned}
 f &= 2.265 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00053 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 89.6357^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00053 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.007 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.106 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.752 \text{ m/s}^2 > 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.106 m/s ²	OK	a_{lim} 0.700 m/s ²
---	----	---

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 15.20\%$$

Pulsující síla v uzlu 6017

$$\begin{aligned}
 f &= 2.265 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00088 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 89.8522^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00088 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.178 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.752 \text{ m/s}^2 > 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.178 m/s ²	OK	a_{lim} 0.700 m/s ²
---	----	---

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 25.44\%$$

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 2.265 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00165 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 90.1465^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00165 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.023 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.334 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.752 \text{ m/s}^2 > 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.334 m/s ²	OK	a_{lim} 0.700 m/s ²
---	----	---

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 47.65\%$$

Pulsující síla v uzlu 7201

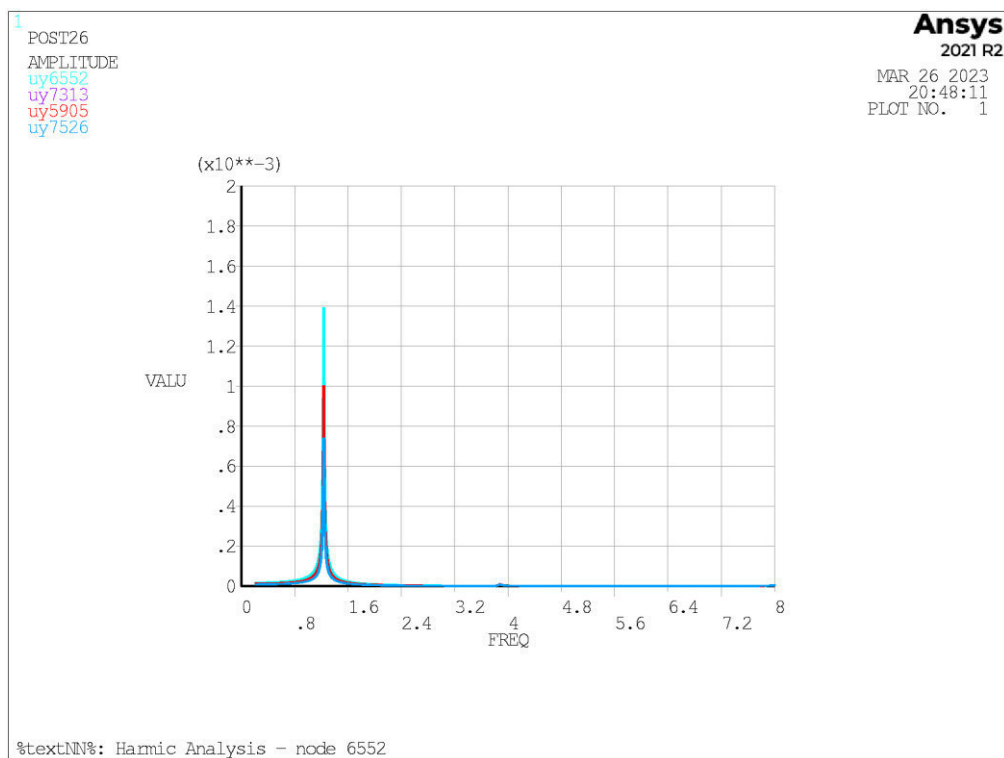
$$\begin{aligned}
 f &= 2.265 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00088 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 89.8522^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00088 \cdot \sin(14.23141 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.178 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.752 \text{ m/s}^2 > 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.178 m/s ²	OK	a_{lim} 0.700 m/s ²
---	----	---

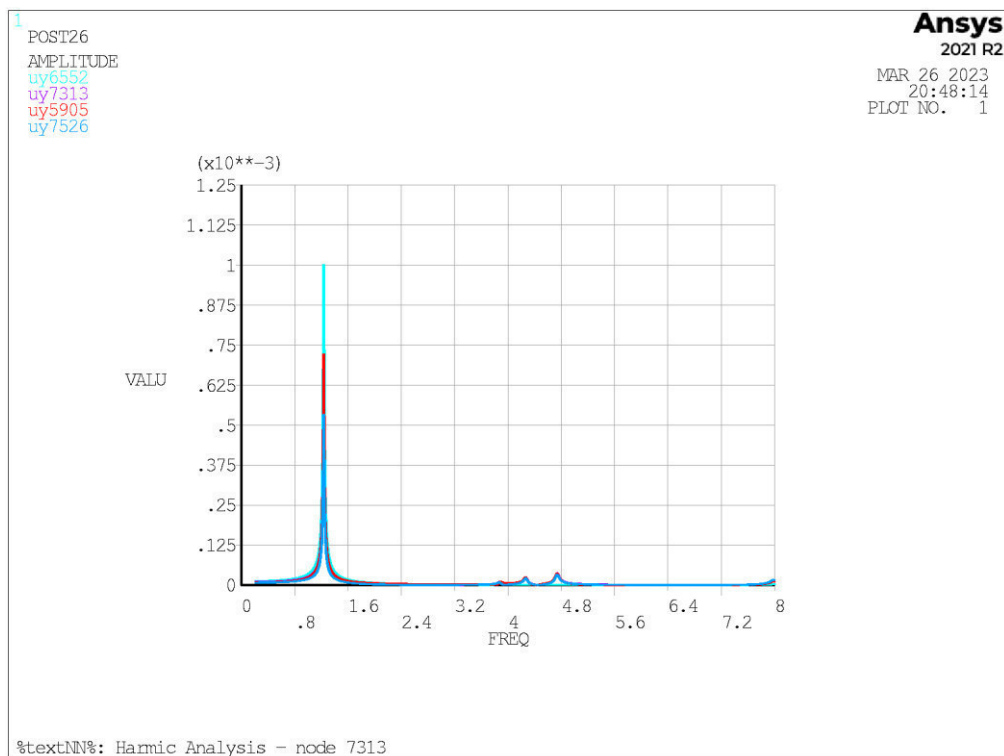
$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 25.44\%$$

Obr. 107 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

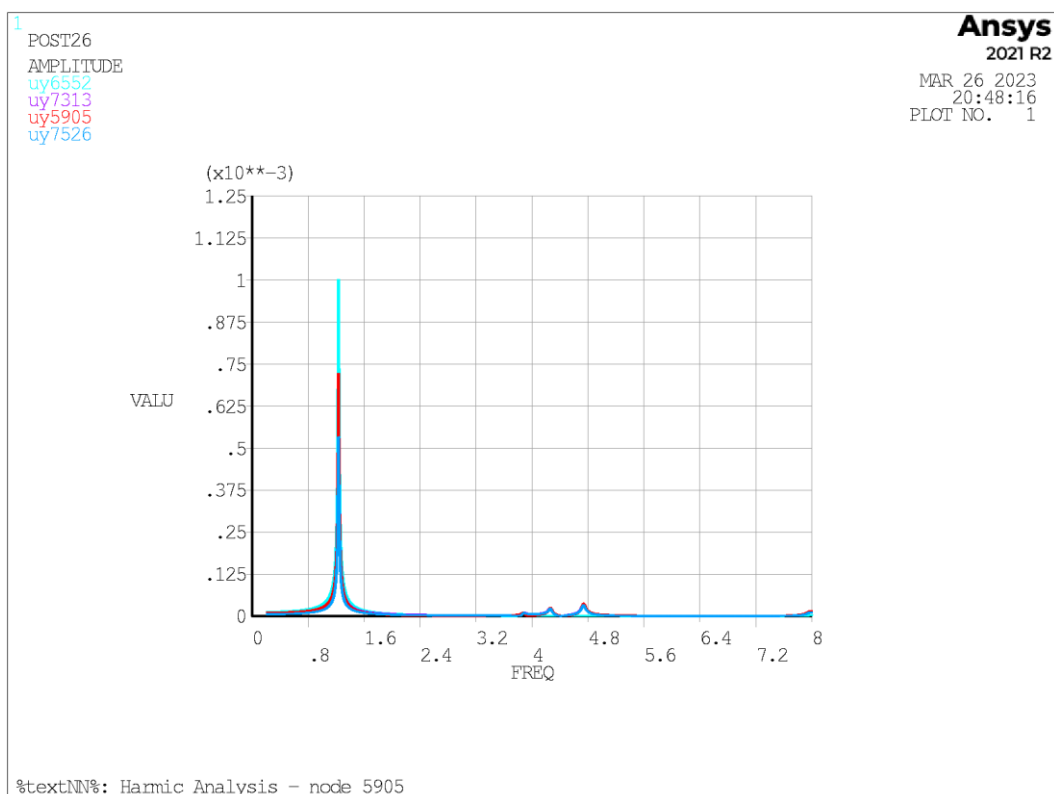
7.4.2.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



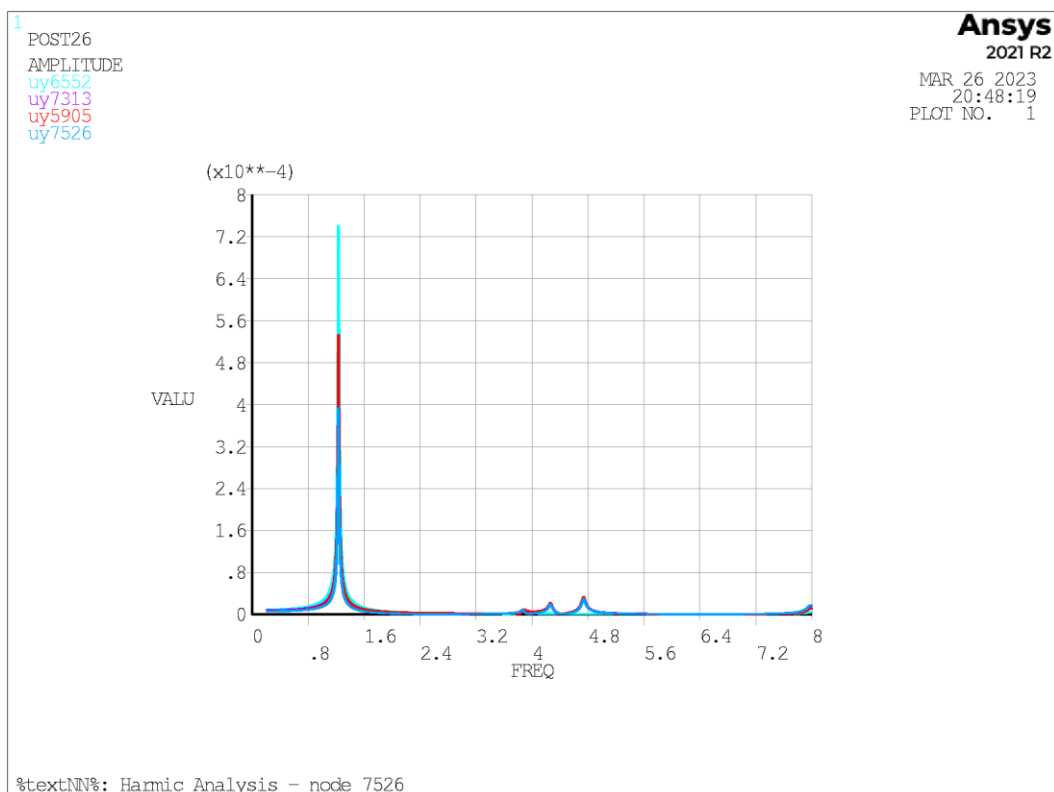
Obr. 108 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 109 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 110 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 111 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.236 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00100 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \phi &= -92.1778^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00100 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.156 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.33\%$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.236 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00139 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \phi &= -92.1704^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00139 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.011 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.084 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.156 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 56.04\%$$

a_{max} 0.084 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.236 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00100 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \phi &= -92.1778^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00100 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.156 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.33\%$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7526

$$\begin{aligned}
 f &= 1.236 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00074 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \phi &= -92.1805^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00074 \cdot \sin(7.76602 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.006 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.045 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.156 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

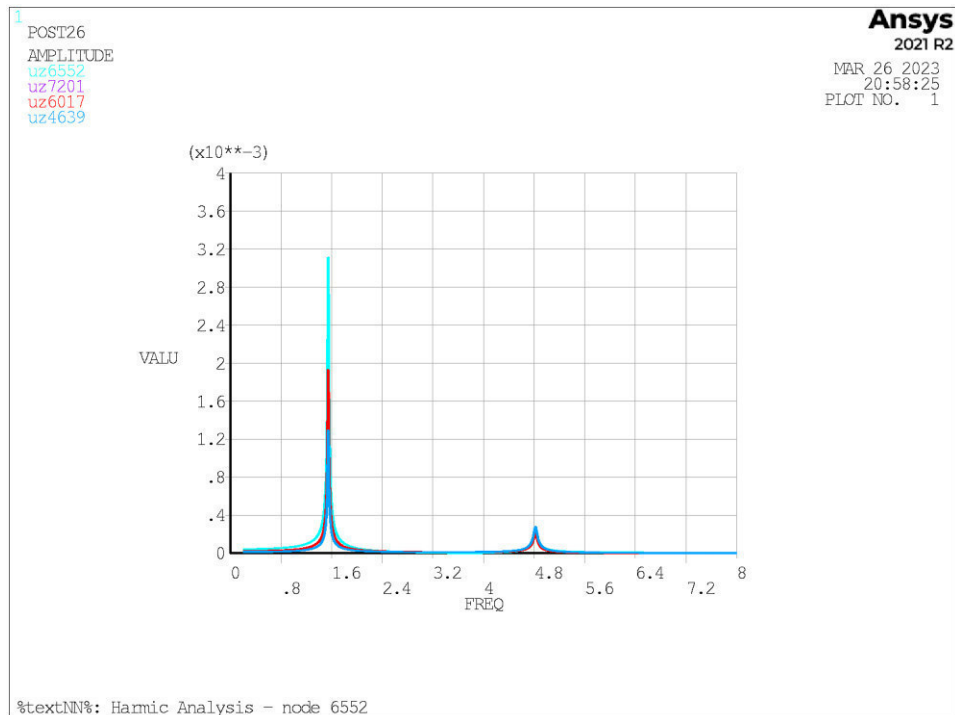
$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29.79\%$$

a_{max} 0.045 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

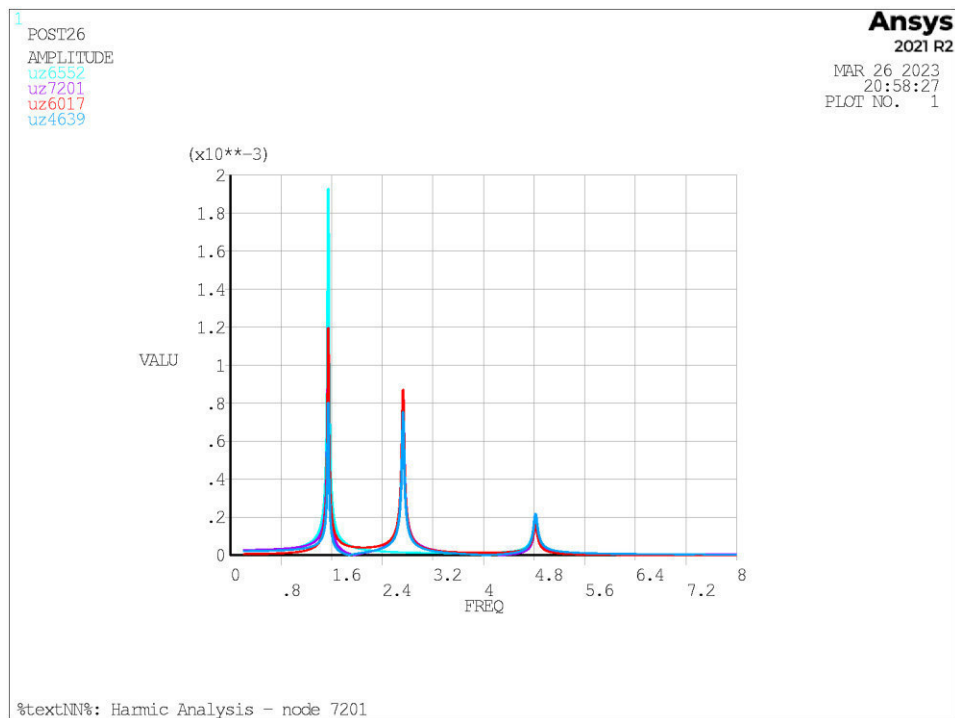
Obr. 112 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

7.4.3 Model 01b - podepření ux pomocí pružin

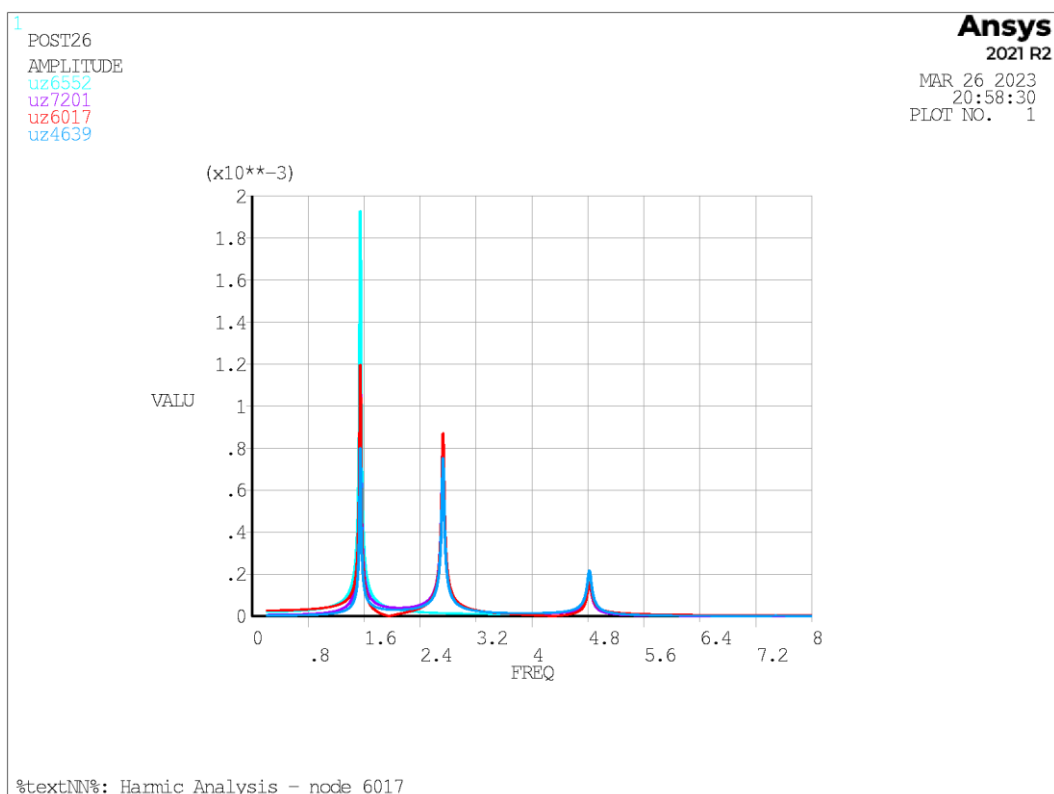
7.4.3.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



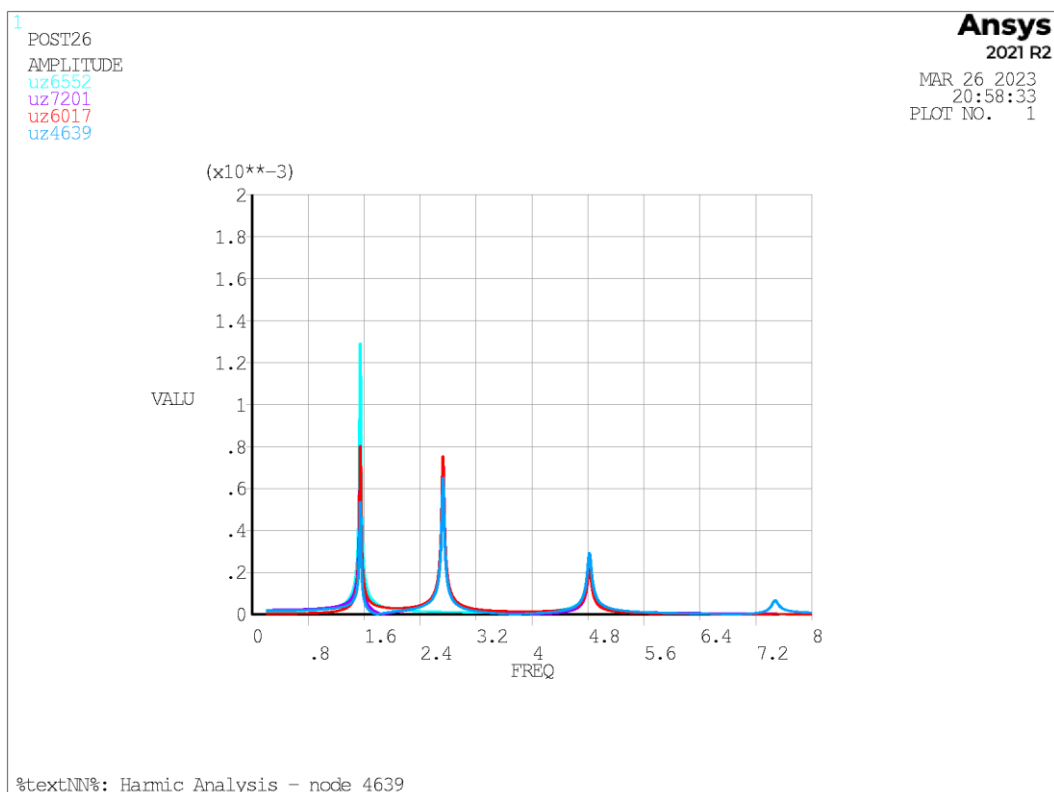
Obr. 113 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 114 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 115 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 116 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$$\begin{aligned}
 f &= 1.546 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 U_{\text{peak}} &= 0.00129 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 92.9452^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= U_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00129 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{m}] && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.122 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.622 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 19.61\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.122 m/s ²	OK	a_{lim} 0.622 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6017

$$\begin{aligned}
 f &= 1.546 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 U_{\text{peak}} &= 0.00193 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 93.0268^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= U_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00193 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{m}] && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.019 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.182 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.622 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 29.27\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.182 m/s ²	OK	a_{lim} 0.622 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.546 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 U_{\text{peak}} &= 0.00311 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 93.1724^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= U_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00311 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{m}] && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.030 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.294 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.622 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 47.25\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.294 m/s ²	OK	a_{lim} 0.622 m/s ²
---	----	---

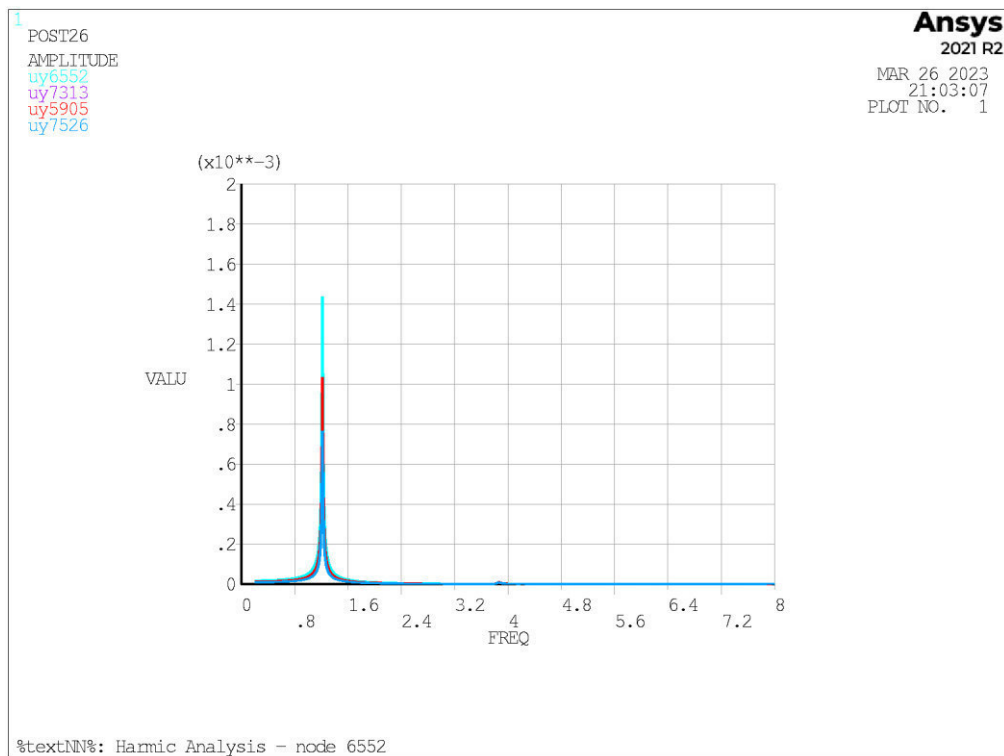
Pulsující síla v uzlu 7201

$$\begin{aligned}
 f &= 1.546 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 U_{\text{peak}} &= 0.00193 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 93.0268^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= U_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00193 \cdot \sin(9.71380 T) \quad [\text{m}] && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.019 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -U_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.182 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.622 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 29.27\%
 \end{aligned}$$

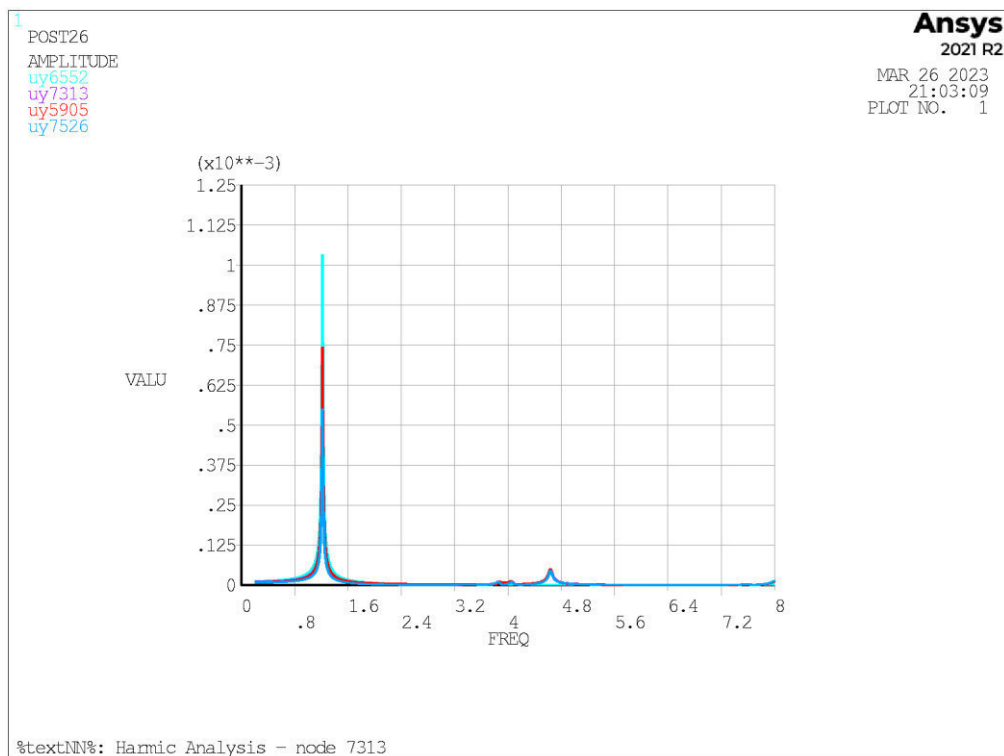
a_{max} 0.182 m/s ²	OK	a_{lim} 0.622 m/s ²
---	----	---

Obr. 117 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

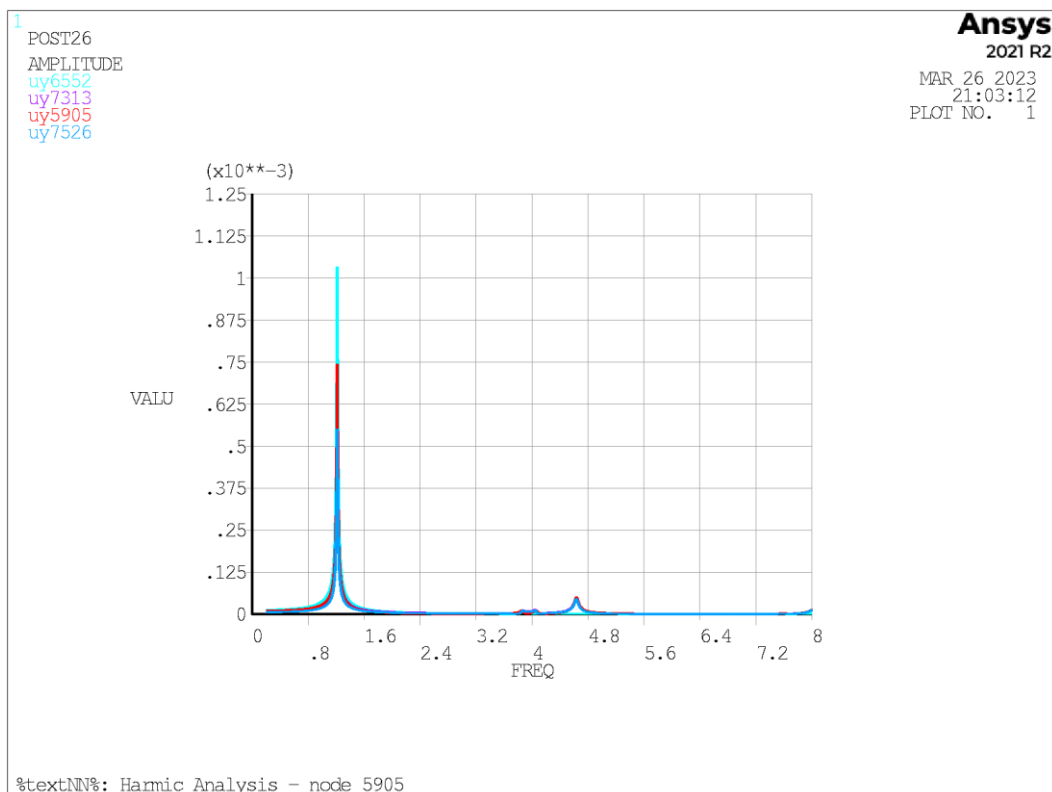
7.4.3.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



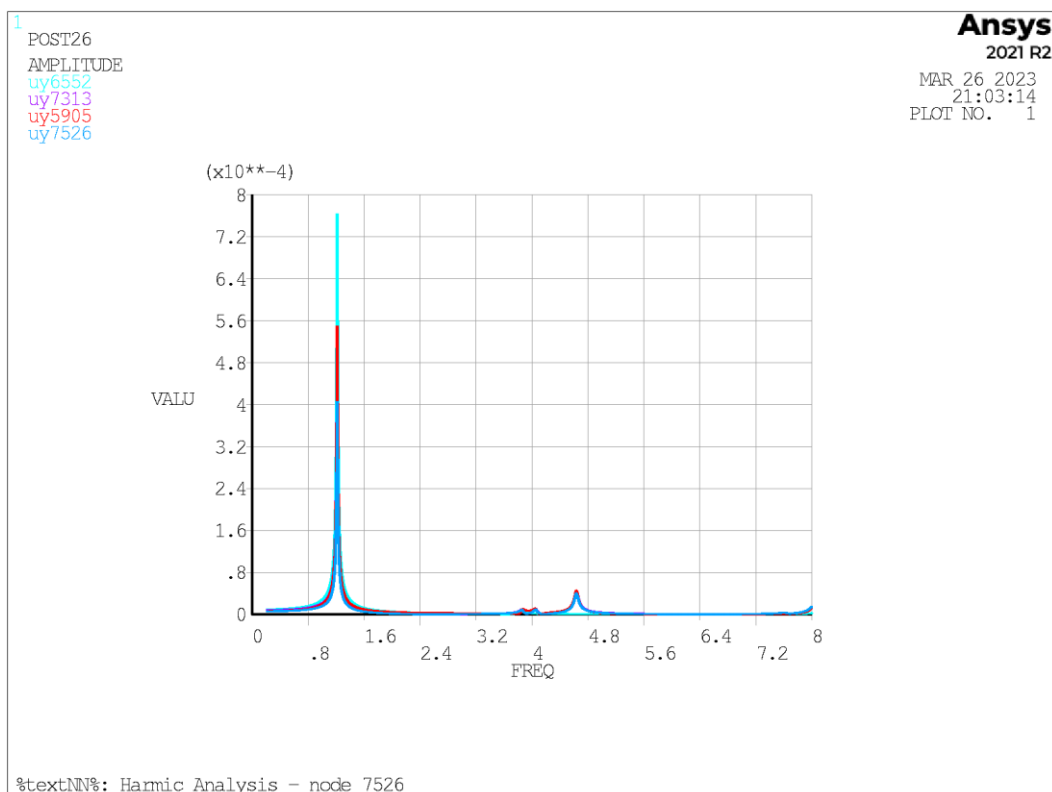
Obr. 118 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 119 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 120 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 121 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.217 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00103 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.7304^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00103 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.31\%$

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.217 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00144 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.7233^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00144 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.011 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.084 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.084 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 56.00\%$

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.217 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00103 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.7304^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00103 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.31\%$

Pulsující síla v uzlu 7526

$$\begin{aligned}
 f &= 1.217 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00076 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.7331^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{N}] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00076 \cdot \sin(7.64664 T) \quad [\text{m}] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.006 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.045 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

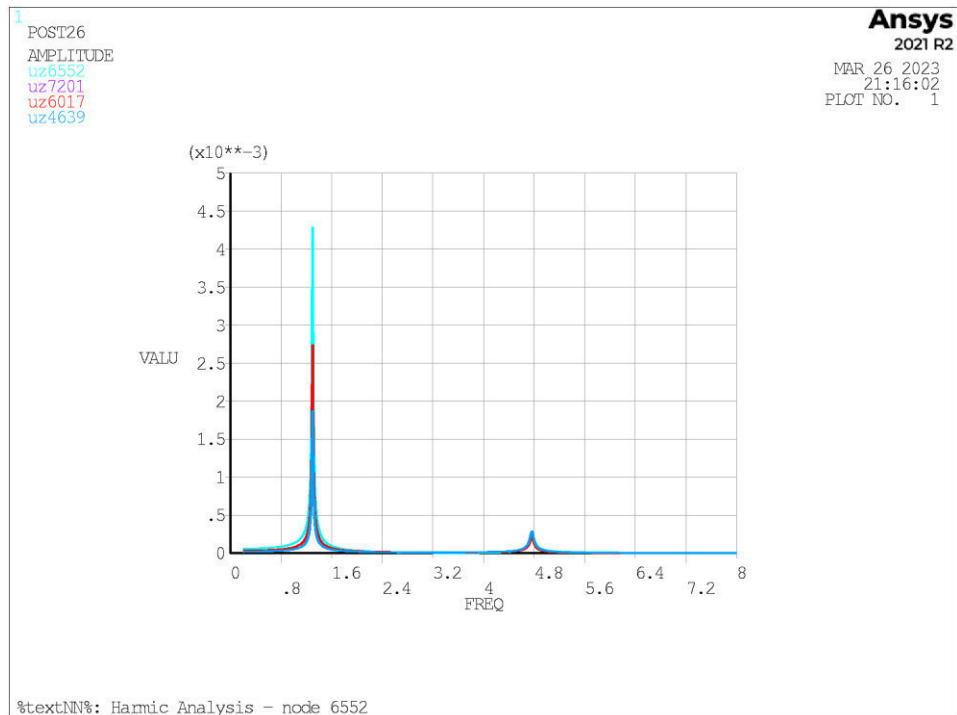
a_{max} 0.045 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29.77\%$

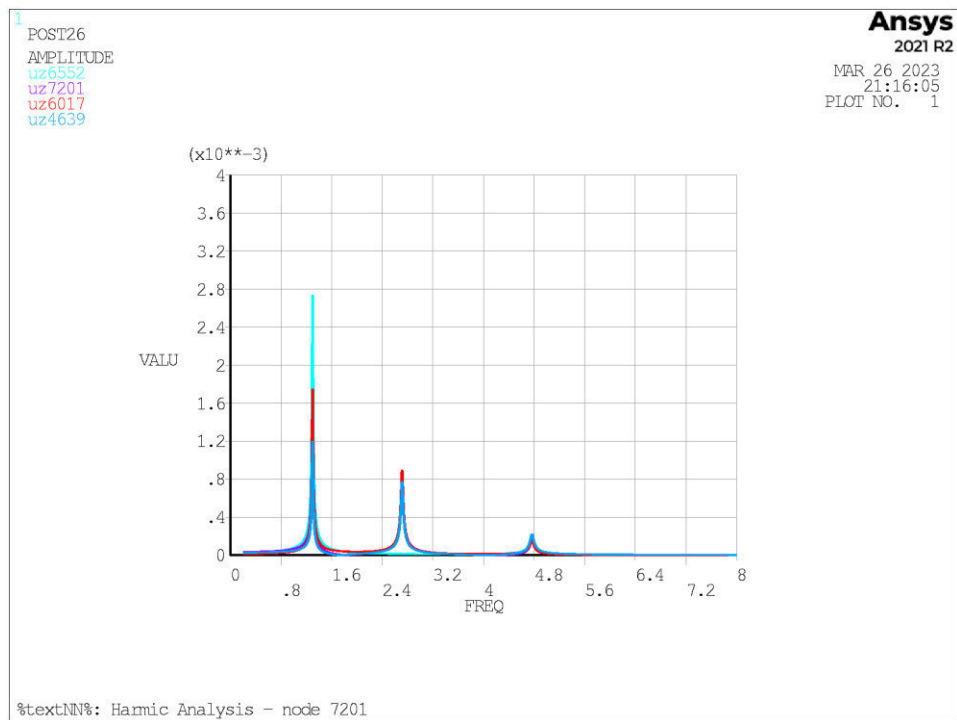
Obr. 122 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

7.4.4 Model 01c - podepření ux volné

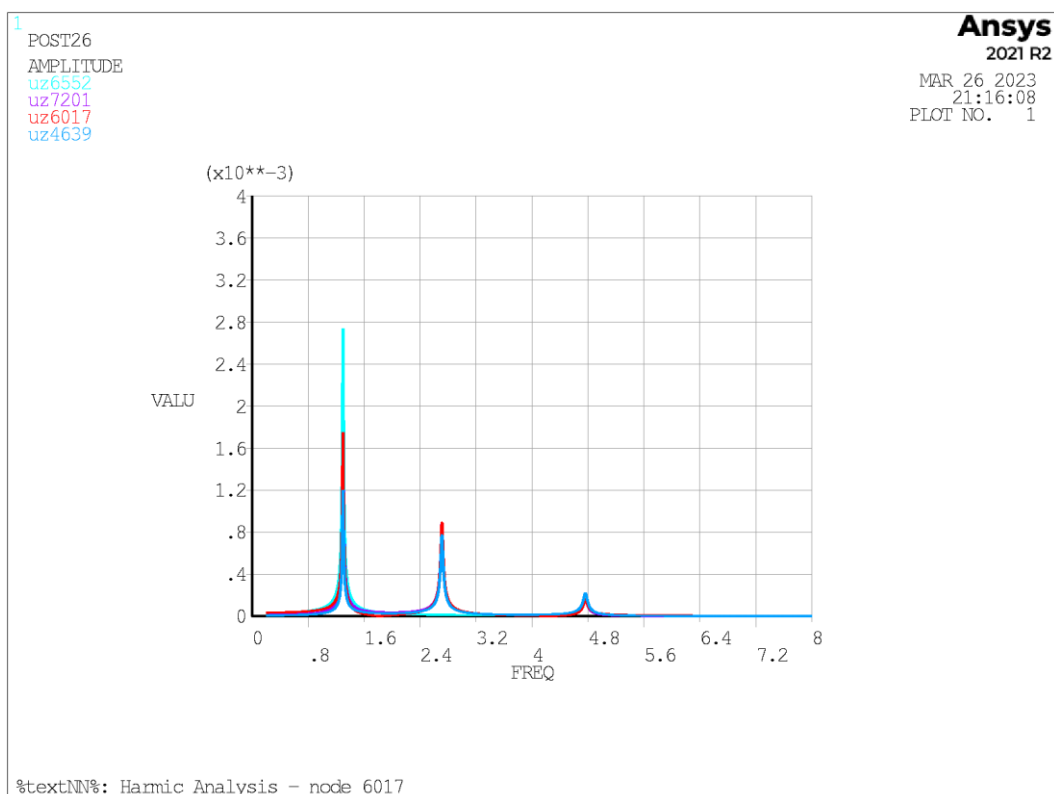
7.4.4.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



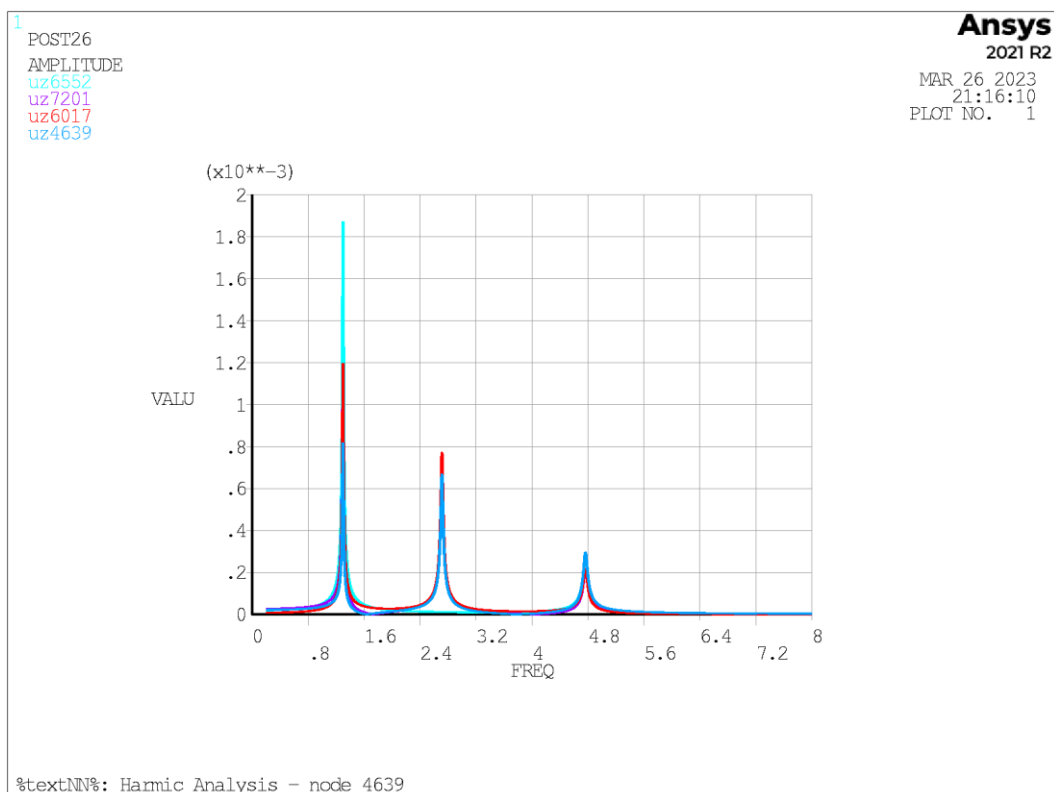
Obr. 123 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 124 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 125 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 126 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$$\begin{aligned}
 f &= 1.299 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00187 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 91.1408^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00187 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.015 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.125 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.570 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.125 m/s ²	OK	a_{lim} 0.570 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 21.89\%$

Pulsující síla v uzlu 6017

$$\begin{aligned}
 f &= 1.299 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00274 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 91.1966^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00274 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.022 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.570 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.183 m/s ²	OK	a_{lim} 0.570 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 32.03\%$

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.299 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00429 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 91.3017^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00429 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.035 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.286 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.570 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.286 m/s ²	OK	a_{lim} 0.570 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 50.15\%$

Pulsující síla v uzlu 7201

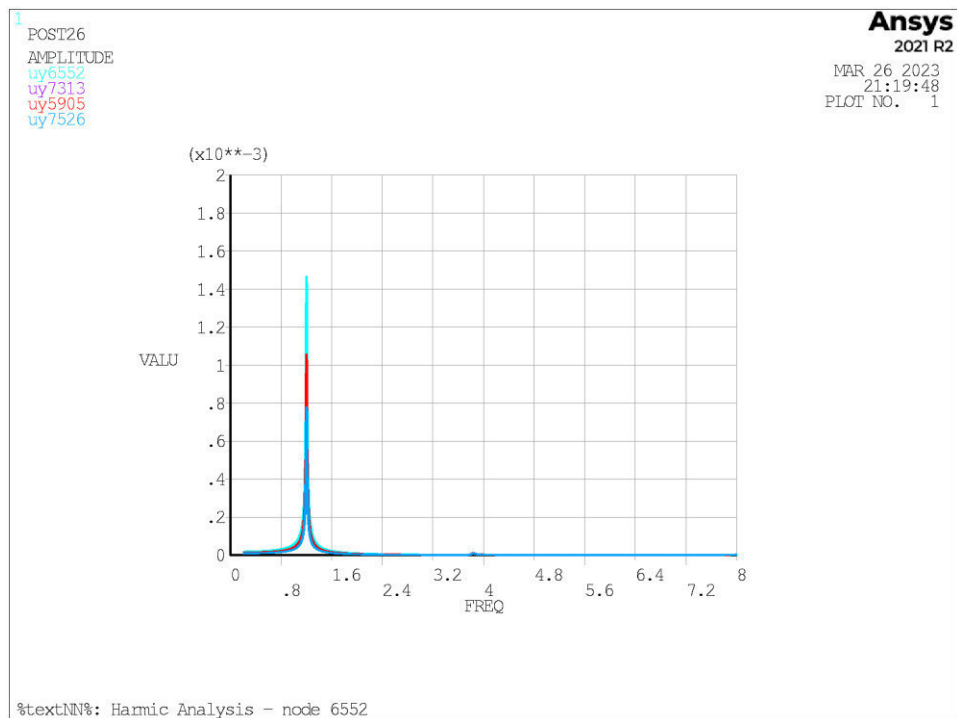
$$\begin{aligned}
 f &= 1.299 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00274 \text{ m} && \text{max. vertikální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= 91.1966^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00274 \cdot \sin(8.16186 T) \text{ [m]} && \text{vertikální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.022 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.5 \sqrt{f_0} = 0.570 \text{ m/s}^2 < 0.700 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.183 m/s ²	OK	a_{lim} 0.570 m/s ²
---	----	---

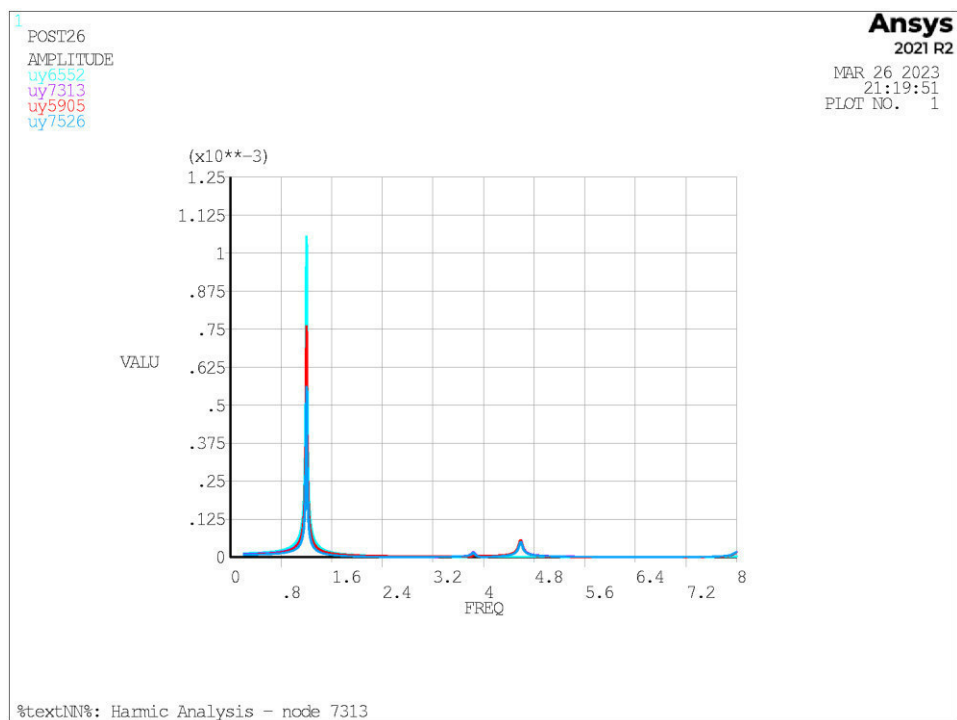
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 32.03\%$

Obr. 127 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

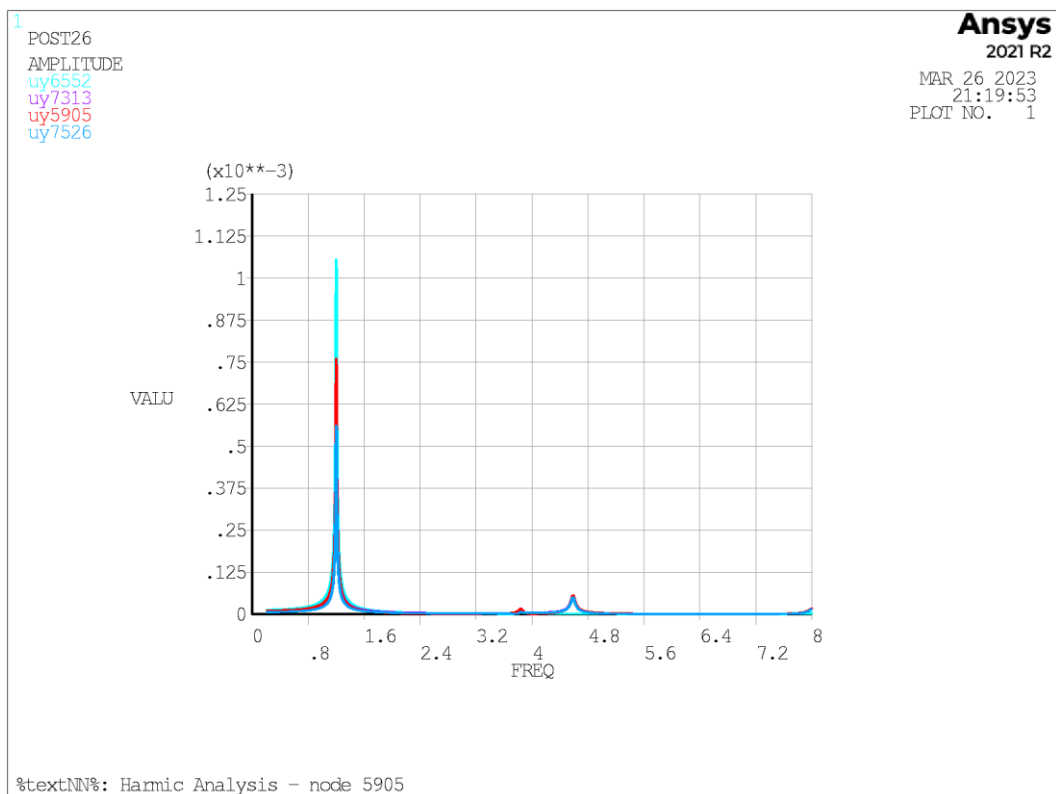
7.4.4.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



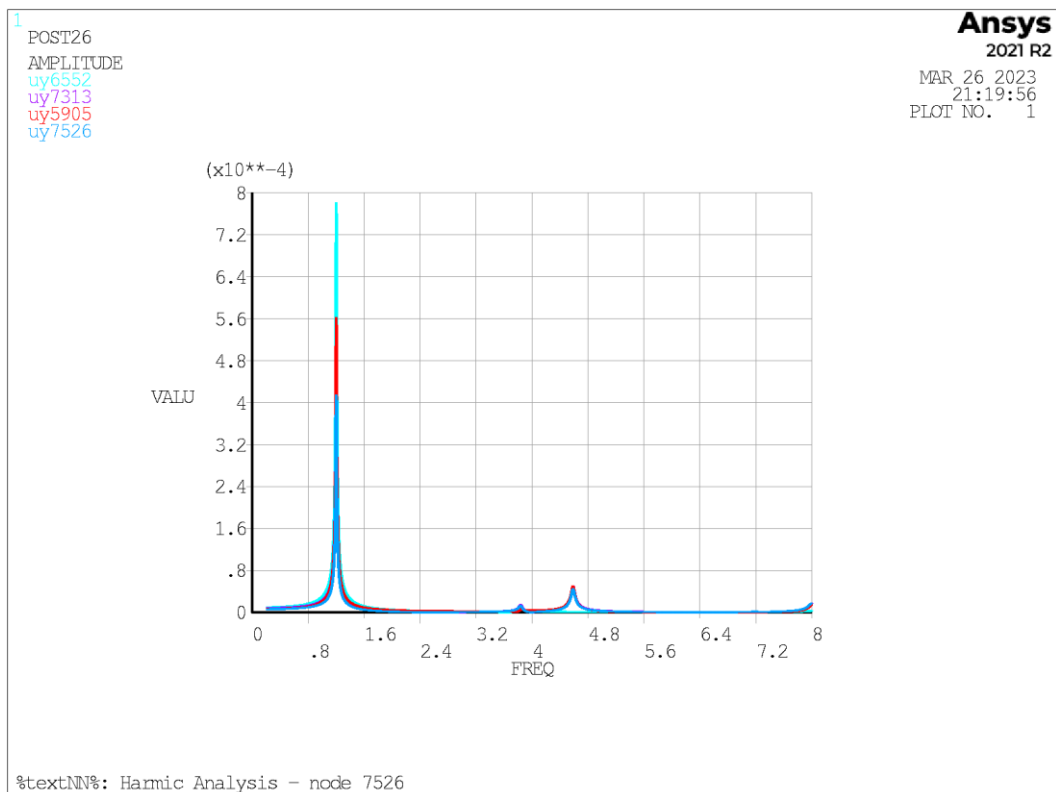
Obr. 128 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 129 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 130 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 131 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.203 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00106 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.3008^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00106 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.29\%$

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.203 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00147 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.2937^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00147 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.011 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.084 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.084 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 55.98\%$

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.203 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00106 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.3008^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00106 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.008 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.060 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.060 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 40.29\%$

Pulsující síla v uzlu 7526

$$\begin{aligned}
 f &= 1.203 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00078 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.3034^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00078 \cdot \sin(7.55867 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.006 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.045 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.154 \text{ m/s}^2 > 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

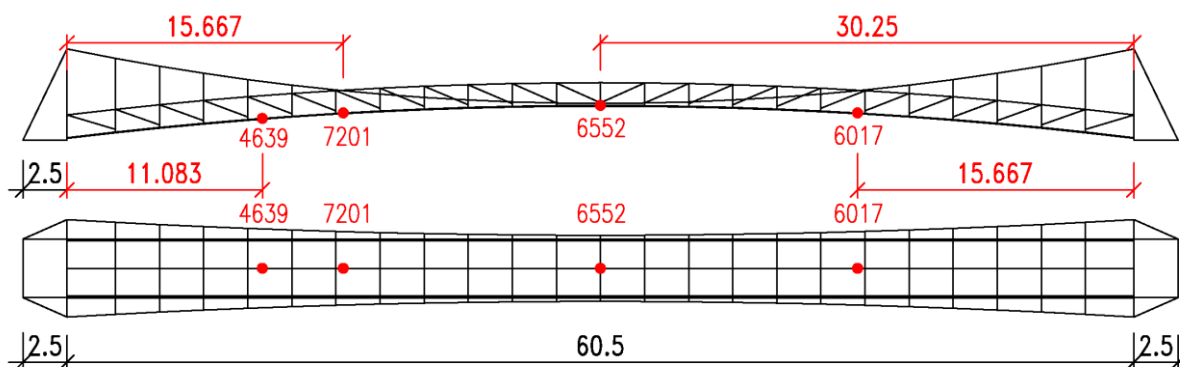
a_{max} 0.045 m/s ²	OK	a_{lim} 0.150 m/s ²
---	----	---

$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 29.76\%$

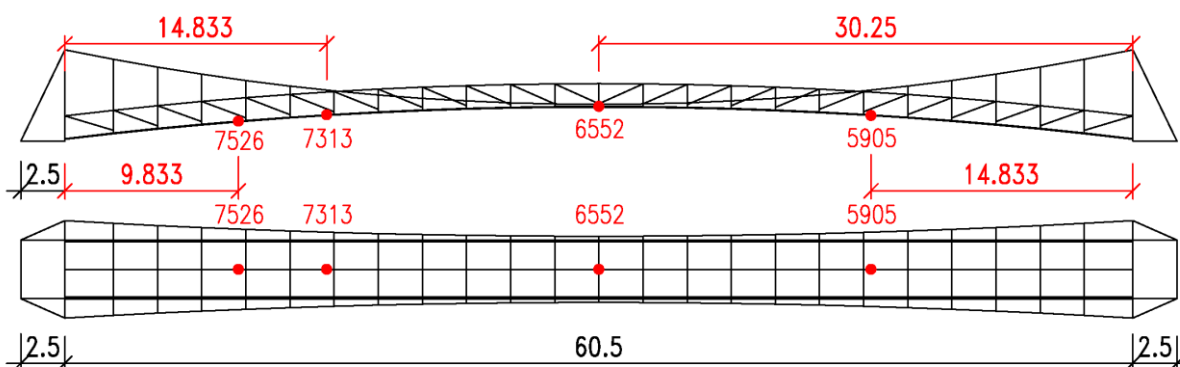
Obr. 132 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

7.5 Harmonická analýza modelu 02

7.5.1 Sledované body



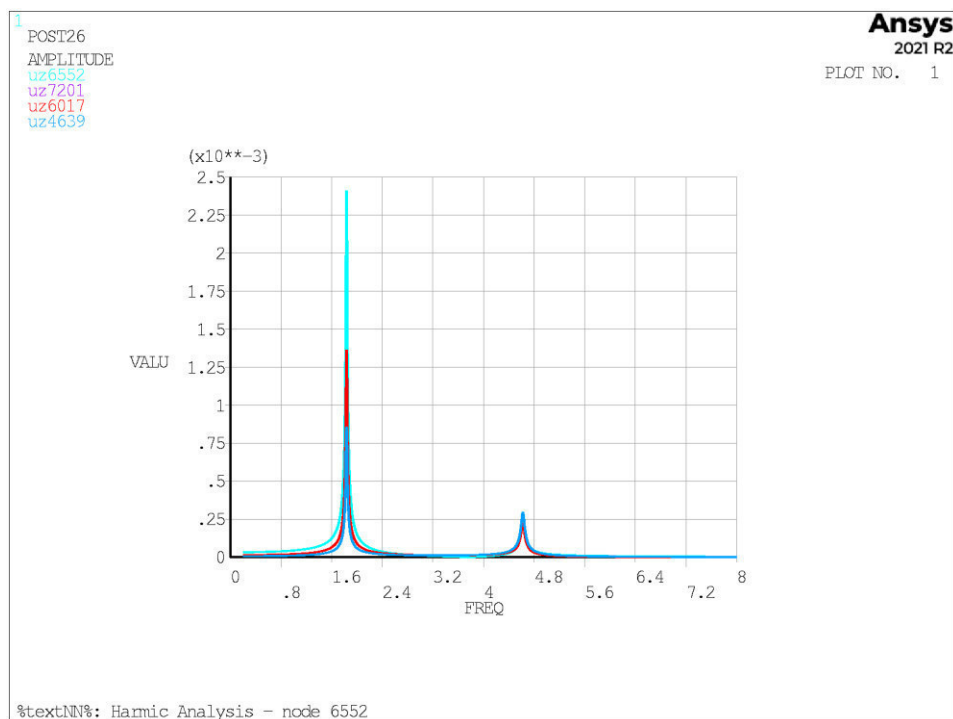
Obr. 133 Sledované body pro podélný směr



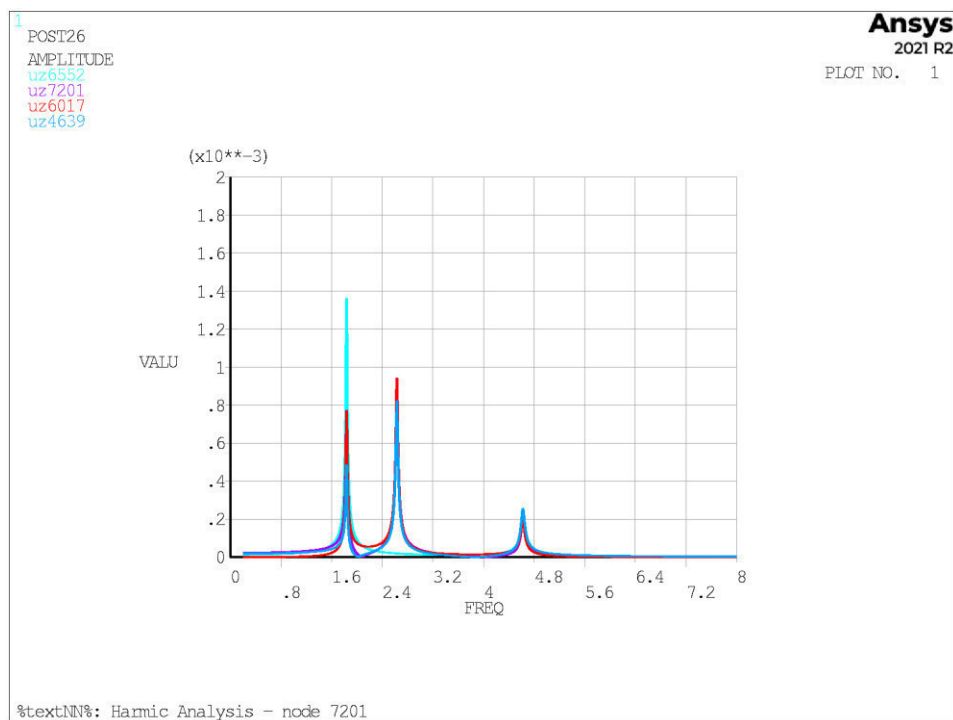
Obr. 134 Sledované body pro příčný směr

7.5.2 Model 02a - podepření ux bráněno v opěrách

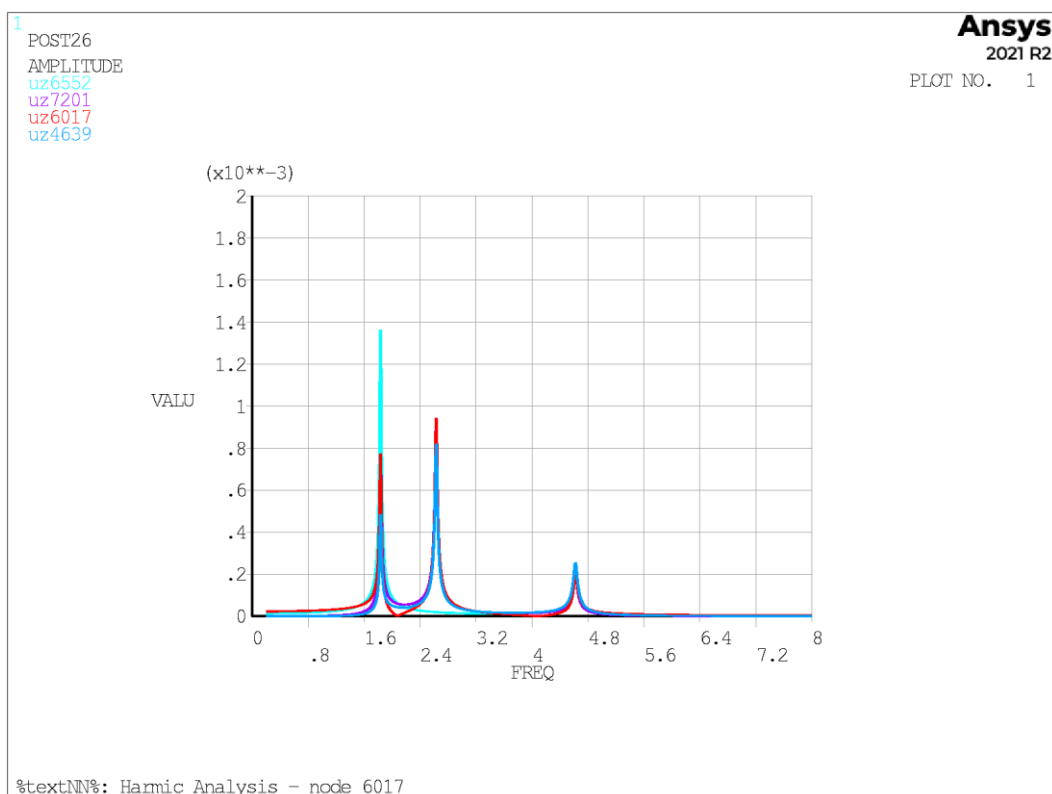
7.5.2.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



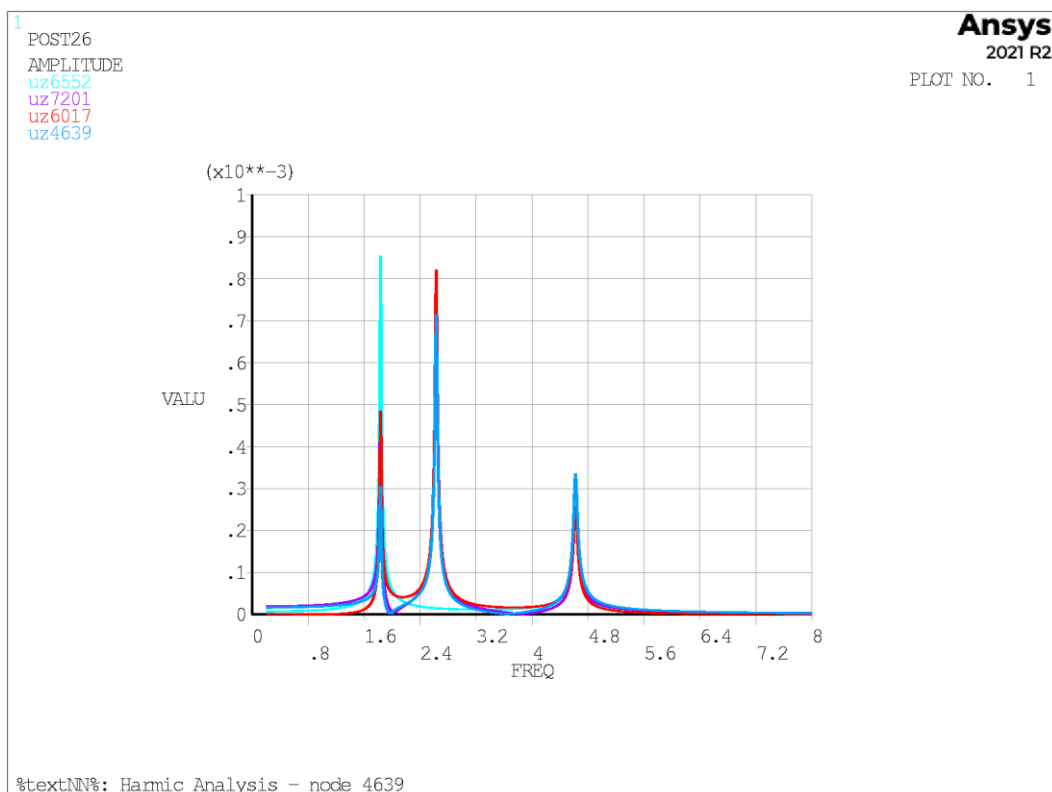
Obr. 135 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 136 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 137 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 138 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$f =$	1.836 Hz	budící frekvence ve špičce odezvy
$u_{\text{peak}} =$	0.00085 m	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy
$\phi =$	90.7888 °	fázový úhel
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) =$	180 · sin (11.53593 T)	[N] pulsující síla
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) =$	0.00085 · sin (11.53593 T)	[m] vertikální posunutí
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) =$	0.010 m/s	maximální rychlost
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 =$	-0.114 m/s ²	maximální akcelerace
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} =$	0.678 m/s ² < 0.700 m/s ²	
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} =$	16.79%	

a_{max} 0.114 m/s ²	OK	a_{lim} 0.678 m/s ²
--	-----------	--

Pulsující síla v uzlu 6017

$f =$	1.836 Hz	budící frekvence ve špičce odezvy
$u_{\text{peak}} =$	0.00136 m	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy
$\phi =$	90.9356 °	fázový úhel
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) =$	180 · sin (11.53593 T)	[N] pulsující síla
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) =$	0.00136 · sin (11.53593 T)	[m] vertikální posunutí
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) =$	0.016 m/s	maximální rychlost
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 =$	-0.181 m/s ²	maximální akcelerace
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} =$	0.678 m/s ² < 0.700 m/s ²	
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} =$	26.76%	

a_{max} 0.181 m/s ²	OK	a_{lim} 0.678 m/s ²
--	-----------	--

Pulsující síla v uzlu 6552

$f =$	1.836 Hz	budící frekvence ve špičce odezvy
$u_{\text{peak}} =$	0.00241 m	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy
$\phi =$	91.1557 °	fázový úhel
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) =$	180 · sin (11.53593 T)	[N] pulsující síla
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) =$	0.00241 · sin (11.53593 T)	[m] vertikální posunutí
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) =$	0.028 m/s	maximální rychlost
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 =$	-0.321 m/s ²	maximální akcelerace
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} =$	0.678 m/s ² < 0.700 m/s ²	
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} =$	47.37%	

a_{max} 0.321 m/s ²	OK	a_{lim} 0.678 m/s ²
--	-----------	--

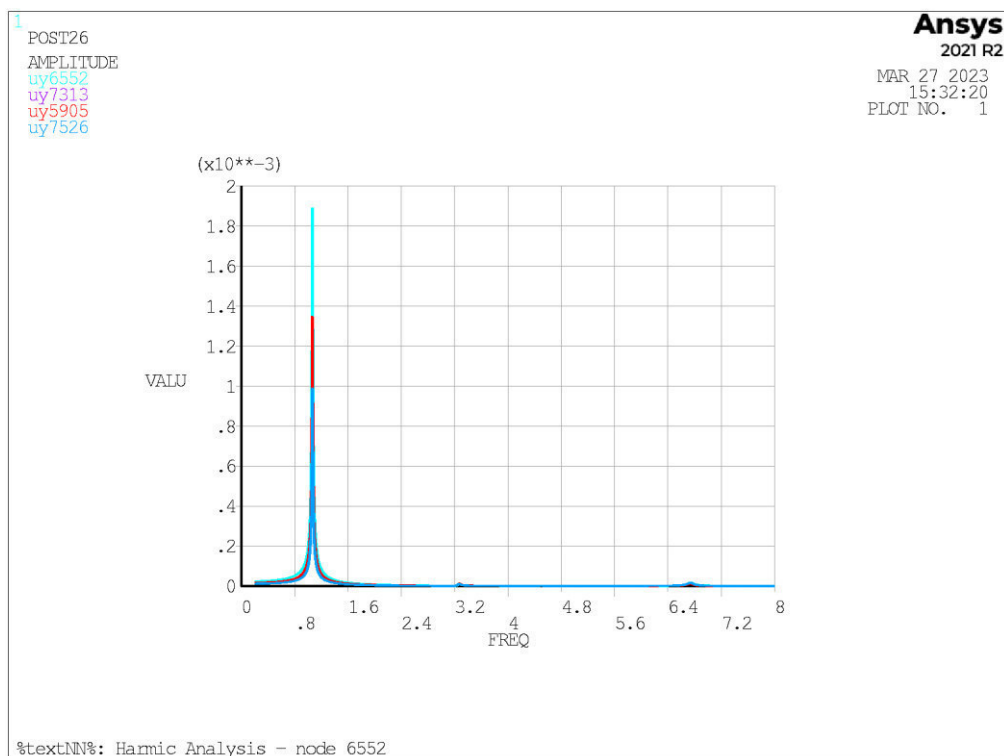
Pulsující síla v uzlu 7201

$f =$	1.836 Hz	budící frekvence ve špičce odezvy
$u_{\text{peak}} =$	0.00136 m	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy
$\phi =$	90.9356 °	fázový úhel
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) =$	180 · sin (11.53593 T)	[N] pulsující síla
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) =$	0.00136 · sin (11.53593 T)	[m] vertikální posunutí
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) =$	0.016 m/s	maximální rychlost
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 =$	-0.181 m/s ²	maximální akcelerace
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} =$	0.678 m/s ² < 0.700 m/s ²	
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} =$	26.76%	

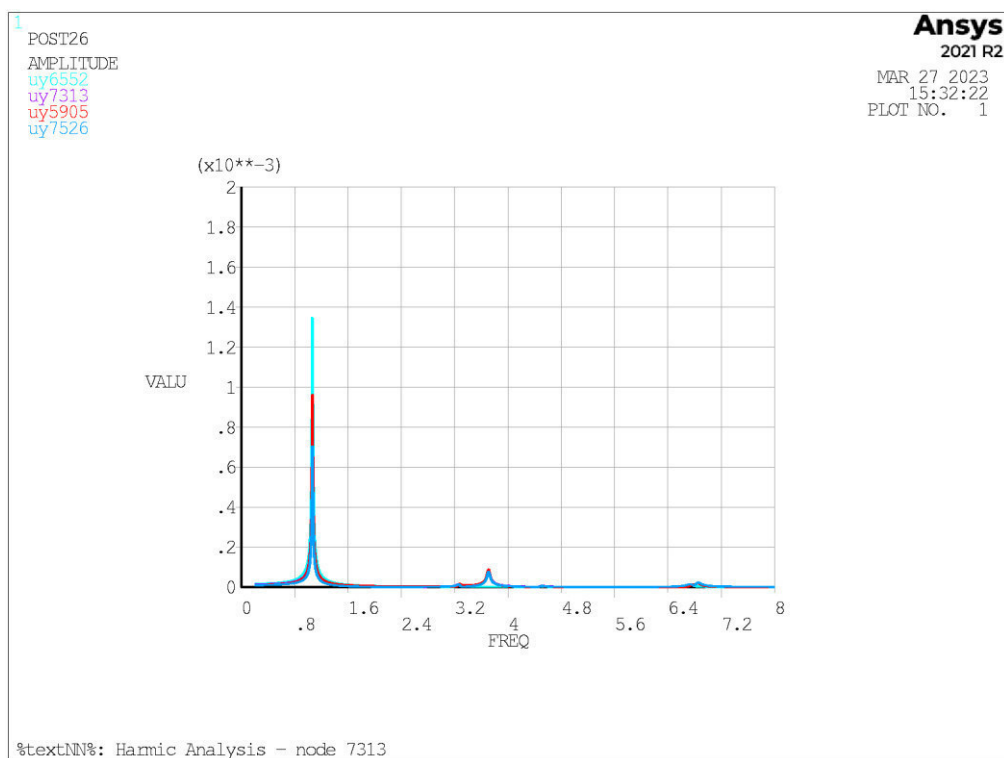
a_{max} 0.181 m/s ²	OK	a_{lim} 0.678 m/s ²
--	-----------	--

Obr. 139 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

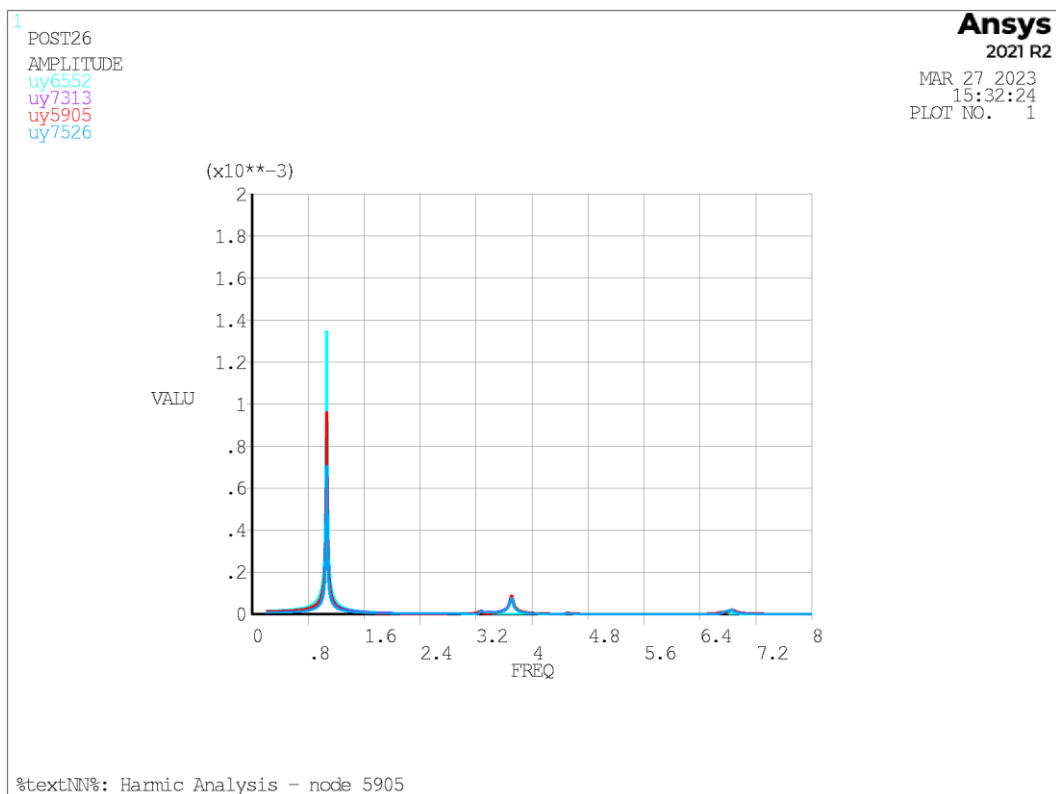
7.5.2.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



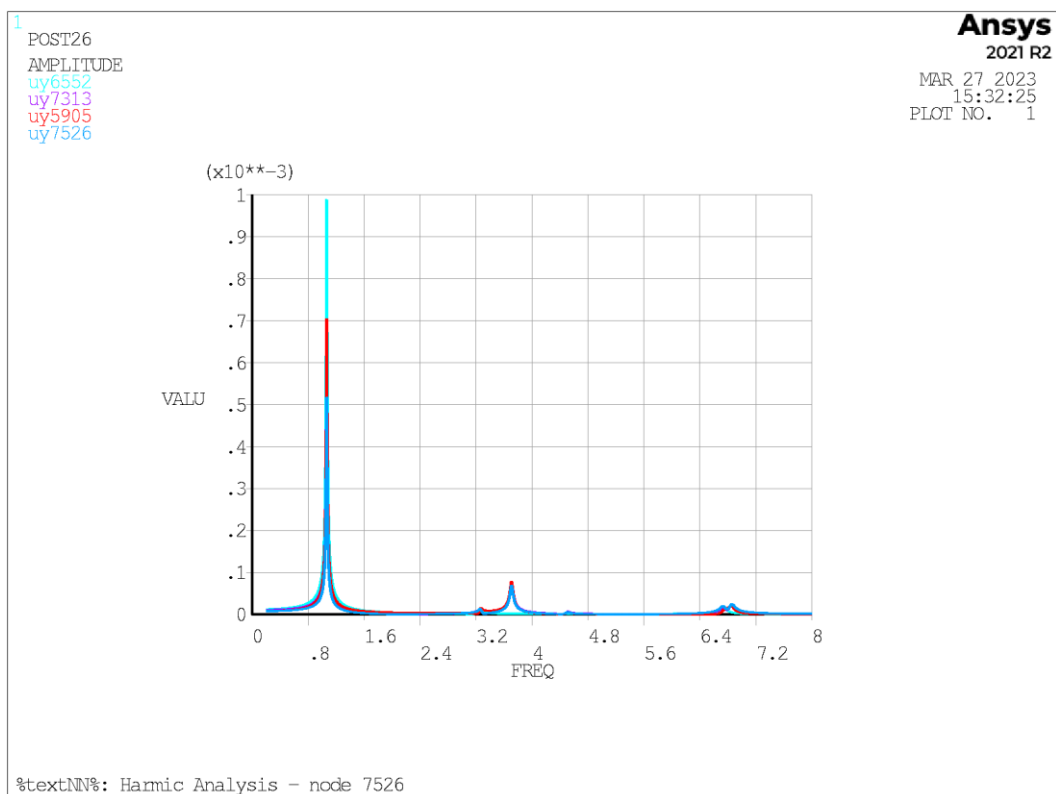
Obr. 140 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 141 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 142 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 143 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.067 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00135 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -93.1566^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00135 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [m]} && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.145 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 41.93\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.145 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.067 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00189 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -93.1453^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00189 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [m]} && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.085 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.145 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 58.78\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.085 m/s ²	OK	a_{lim} 0.145 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.067 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00135 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -93.1566^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00135 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [m]} && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.145 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 41.93\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.145 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7526

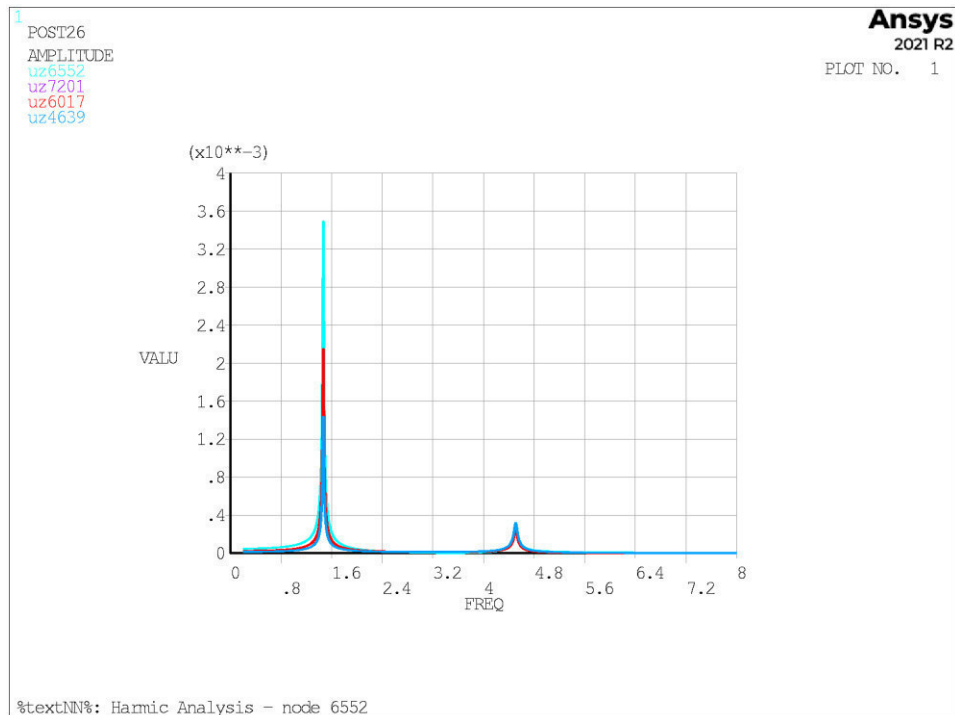
$$\begin{aligned}
 f &= 1.067 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00099 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -93.1613^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [N]} && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00099 \cdot \sin(6.70416 T) \text{ [m]} && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.007 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.044 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.145 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2 \\
 a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} &= 30.74\%
 \end{aligned}$$

a_{max} 0.044 m/s ²	OK	a_{lim} 0.145 m/s ²
---	----	---

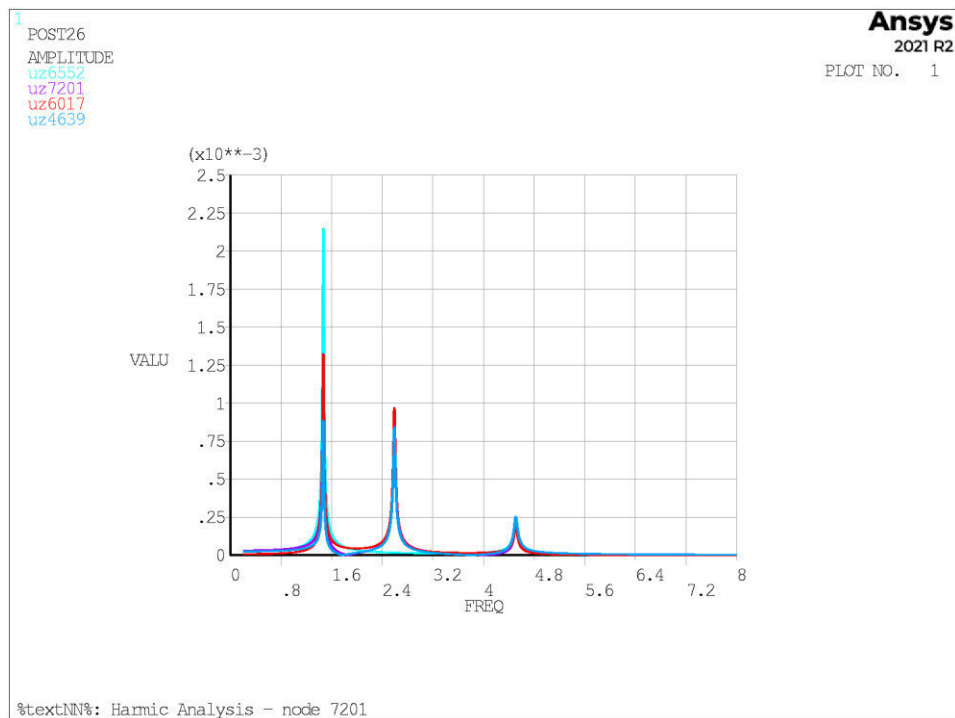
Obr. 144 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

7.5.3 Model 02b - podepření ux pomocí pružin

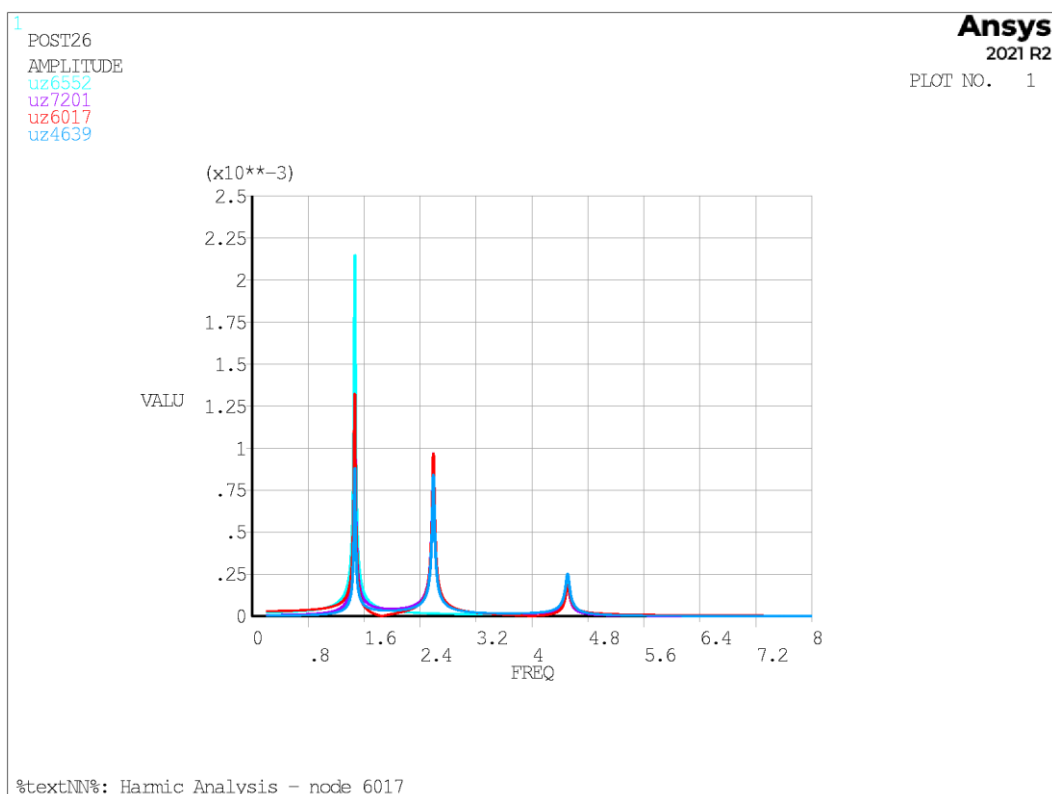
7.5.3.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



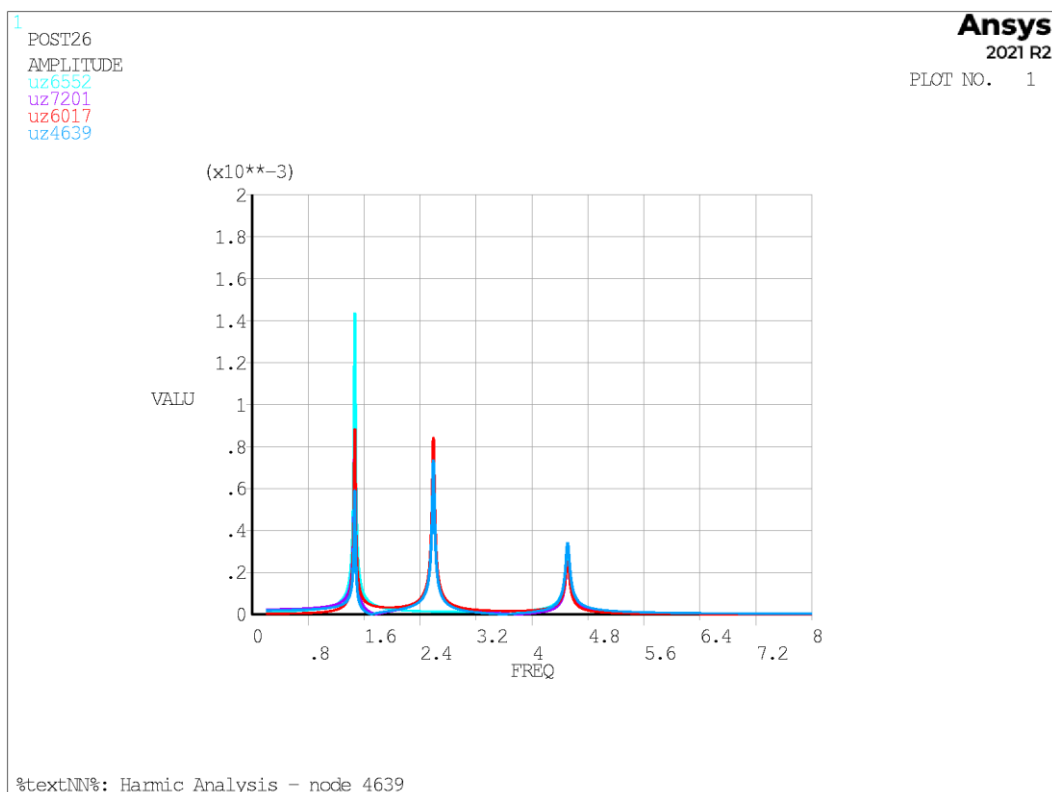
Obr. 145 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 146 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 147 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 148 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$f = 1.468 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00143 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 86.9542^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00143 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.122 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.606 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 20.16\%$		

a_{max} 0.122 m/s^2	OK	a_{lim} 0.606 m/s^2
--	-----------	--

Pulsující síla v uzlu 6017

$f = 1.468 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00215 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 87.0403^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00215 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.020 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.606 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 30.17\%$		

a_{max} 0.183 m/s^2	OK	a_{lim} 0.606 m/s^2
--	-----------	--

Pulsující síla v uzlu 6552

$f = 1.467 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00349 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 93.6906^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.21743 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00349 \cdot \sin(9.21743 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.032 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.297 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.606 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 48.98\%$		

a_{max} 0.297 m/s^2	OK	a_{lim} 0.606 m/s^2
--	-----------	--

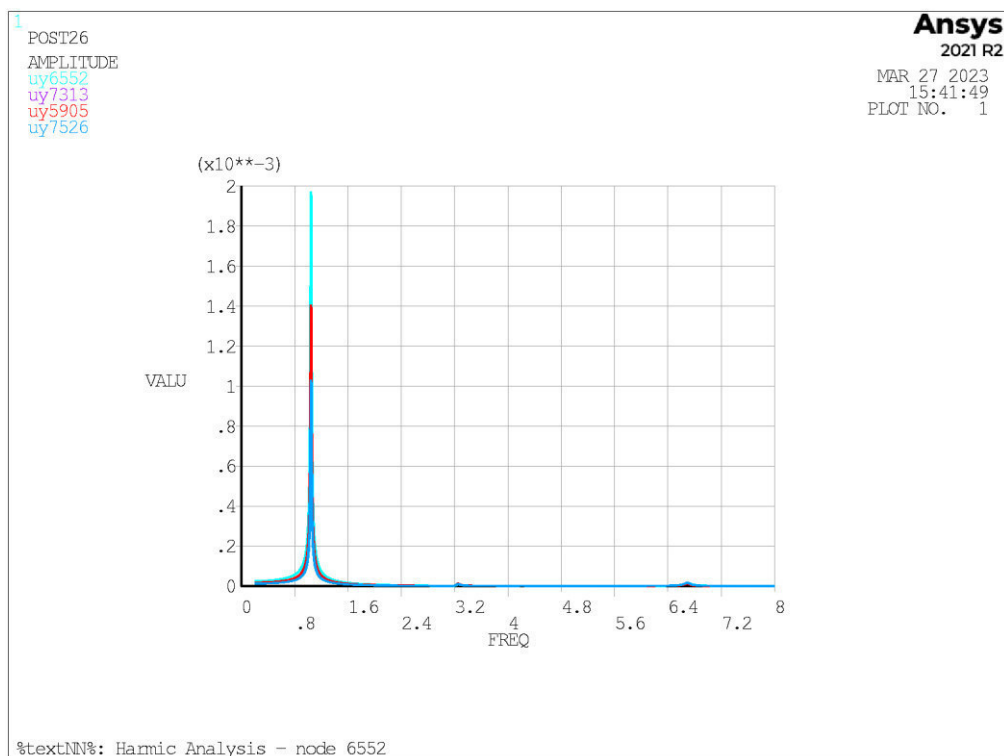
Pulsující síla v uzlu 7201

$f = 1.468 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00215 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 87.0403^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00215 \cdot \sin(9.22372 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.020 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.606 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 30.17\%$		

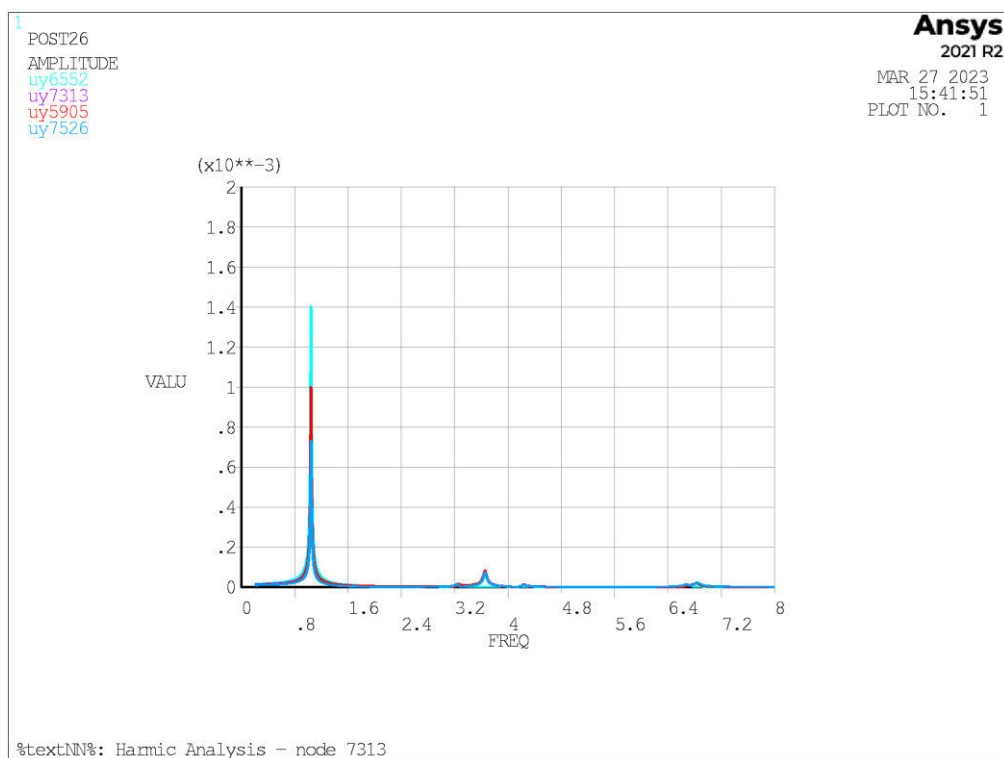
a_{max} 0.183 m/s^2	OK	a_{lim} 0.606 m/s^2
--	-----------	--

Obr. 149 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

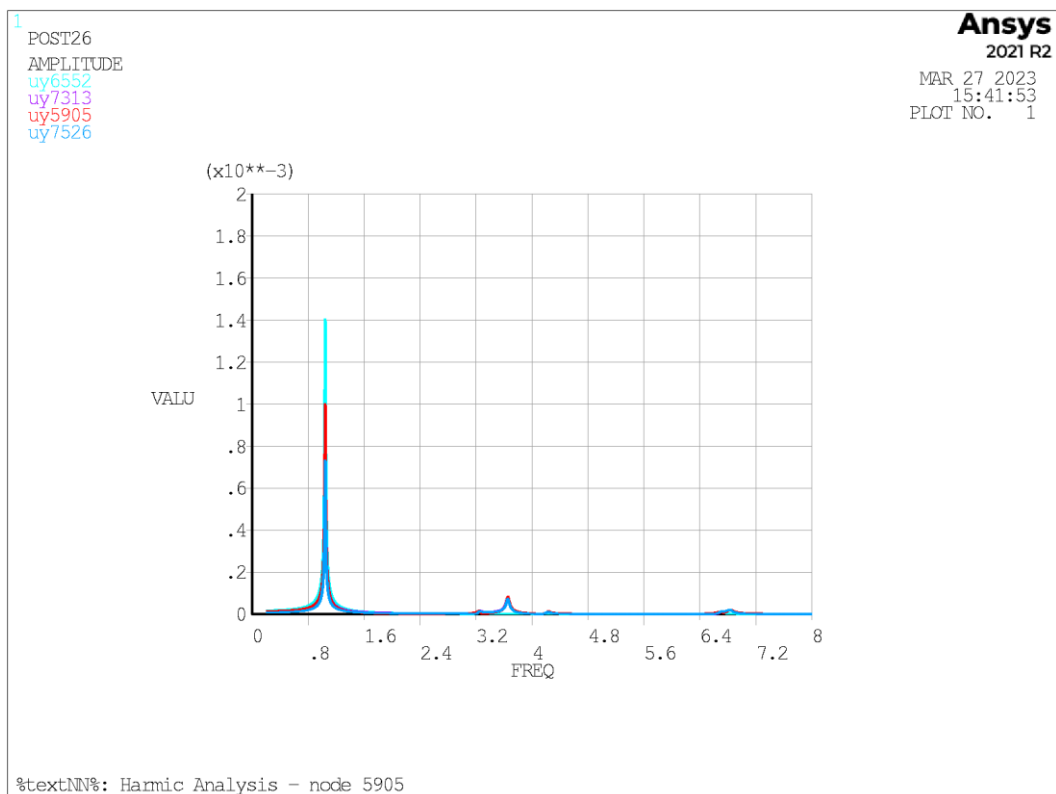
7.5.3.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



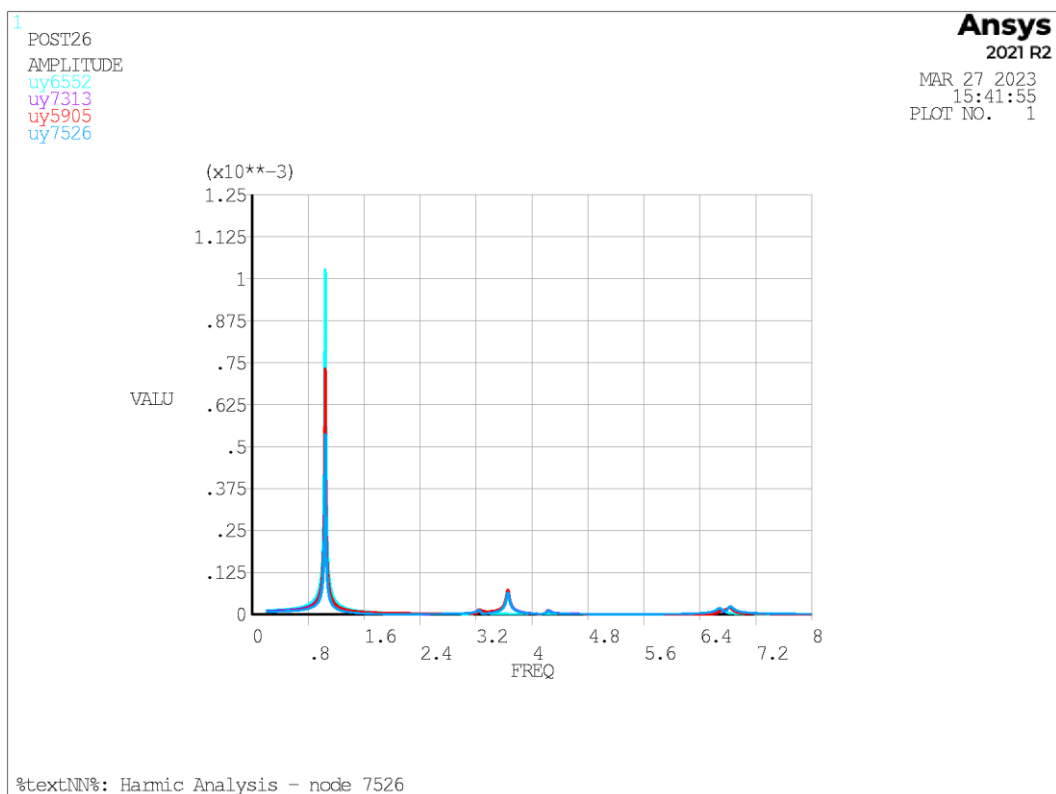
Obr. 150 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 151 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 152 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 153 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.045 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00141 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.9756^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00141 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.143 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 42.35\%$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.143 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.045 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00197 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.9654^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00197 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.085 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.143 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 59.39\%$$

a_{max} 0.085 m/s ²	OK	a_{lim} 0.143 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.045 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00141 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.9756^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00141 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.143 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 42.35\%$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.143 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7526

$$\begin{aligned}
 f &= 1.045 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00103 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -90.9795^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00103 \cdot \sin(6.56593 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.007 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.044 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.143 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

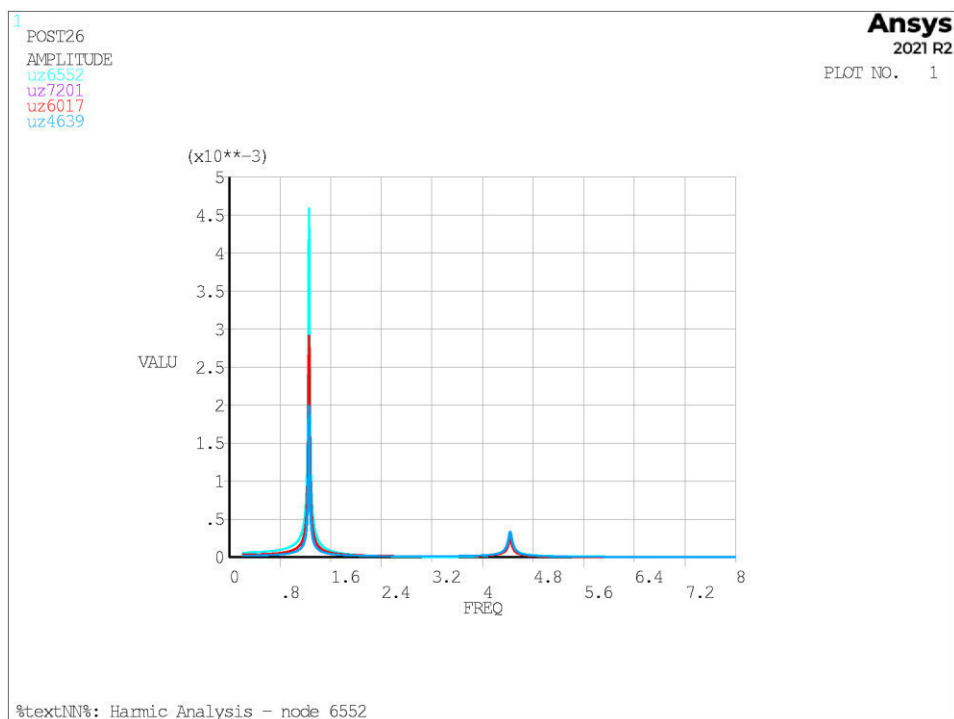
$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 31.04\%$$

a_{max} 0.044 m/s ²	OK	a_{lim} 0.143 m/s ²
---	----	---

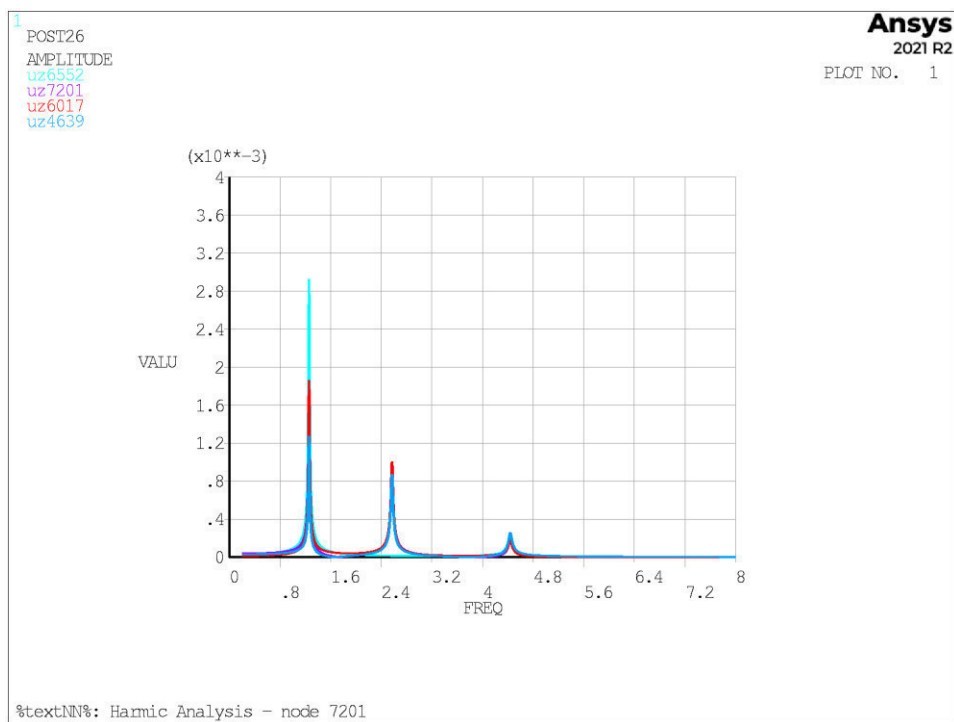
Obr. 154 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

7.5.4 Model 02c - podepření ux volné

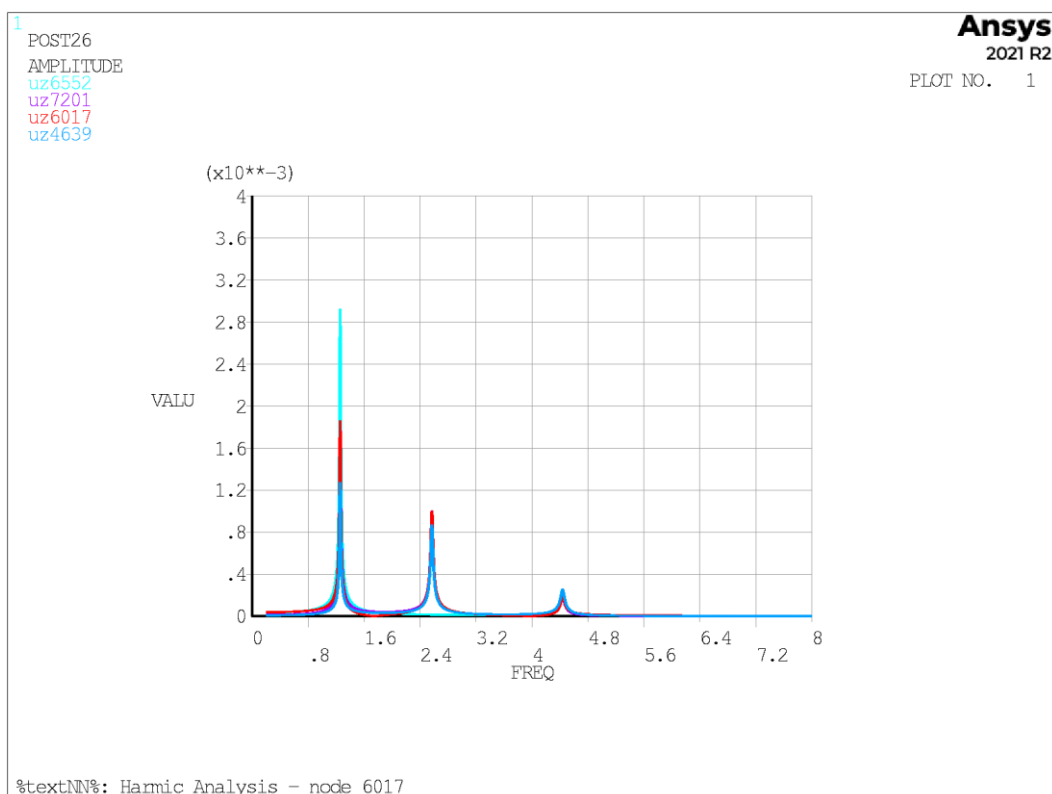
7.5.4.1 Stanovení zrychlení v podélném směru



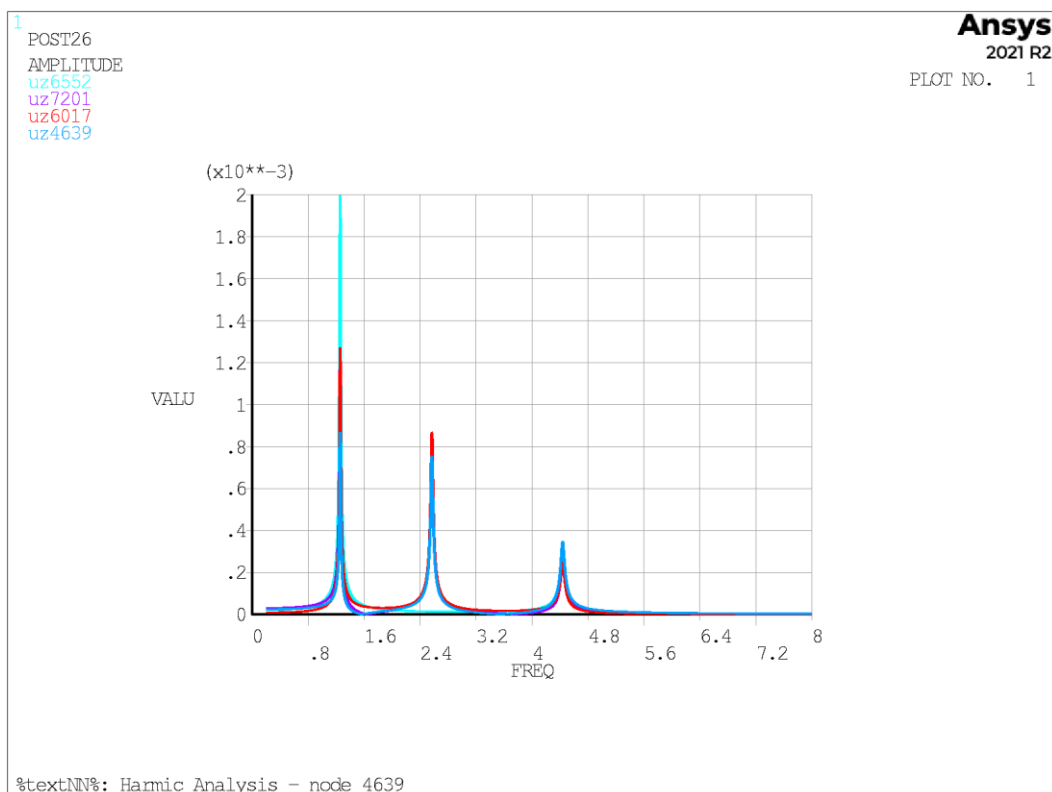
Obr. 155 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 156 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7201



Obr. 157 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6017



Obr. 158 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 4639

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 4639

$f = 1.259 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00200 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 89.7635^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00200 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.016 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.125 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.561 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 22.29\%$		

a_{max} 0.125 m/s ²	OK	a_{lim} 0.561 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6017

$f = 1.259 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00292 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 89.8256^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00292 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.023 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.561 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 32.62\%$		

a_{max} 0.183 m/s ²	OK	a_{lim} 0.561 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$f = 1.259 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00459 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 89.9407^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00459 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.036 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.287 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.561 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 51.23\%$		

a_{max} 0.287 m/s ²	OK	a_{lim} 0.561 m/s ²
---	----	---

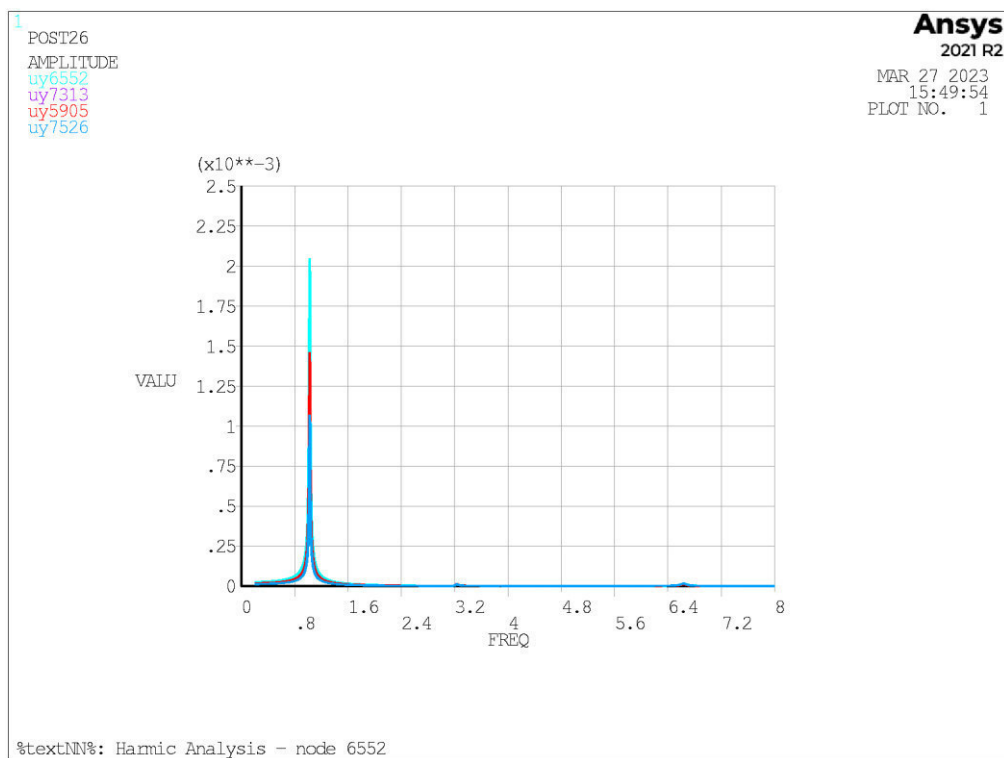
Pulsující síla v uzlu 7201

$f = 1.259 \text{ Hz}$	budící frekvence ve špičce odezvy	
$u_{\text{peak}} = 0.00292 \text{ m}$	max. vertikální posunutí ve špičce odezvy	
$\Phi = 89.8256^\circ$	fázový úhel	
$F = 180 \cdot \sin(2\pi f T) = 180 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [N]}$	pulsující síla	
$u = u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00292 \cdot \sin(7.91053 T) \text{ [m]}$	vertikální posunutí	
$v_{\text{max}} = u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.023 \text{ m/s}$	maximální rychlost	
$a_{\text{max}} = -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.183 \text{ m/s}^2$	maximální akcelerace	
$a_{\text{lim}} = 0.5 \sqrt{f_0} = 0.561 \text{ m/s}^2$		
$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 32.62\%$		

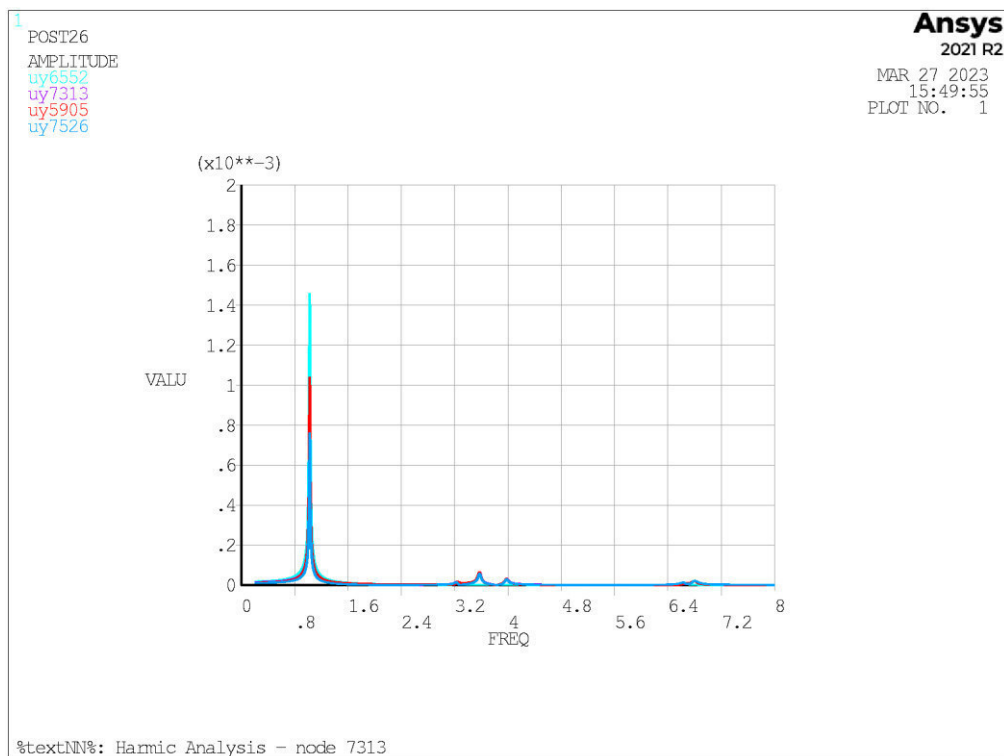
a_{max} 0.183 m/s ²	OK	a_{lim} 0.561 m/s ²
---	----	---

br. 159 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552

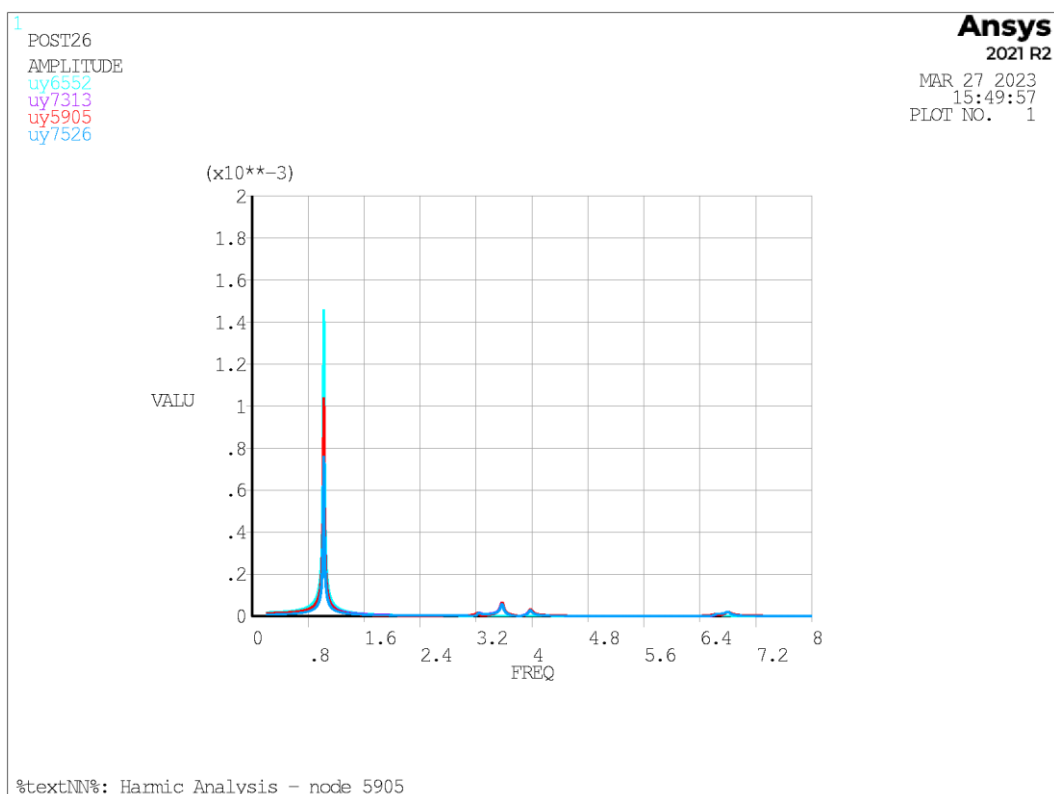
7.5.4.2 Stanovení zrychlení v příčném směru



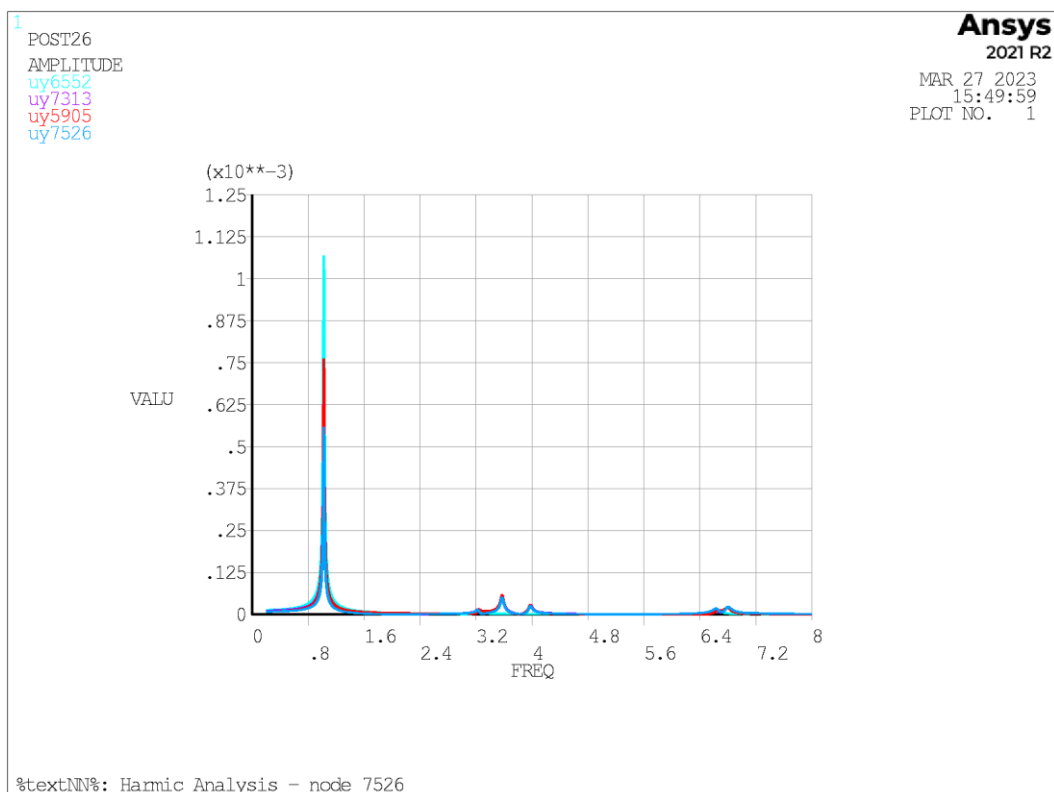
Obr. 160 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 6552



Obr. 161 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7313



Obr. 162 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 5905



Obr. 163 Frekvenční spektrum sledovaných uzlů pro harmonickou sílu v bodě 7526

Ustálený stav - harmonická odezva uzlu 6552

Pulsující síla v uzlu 5905

$$\begin{aligned}
 f &= 1.025 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00146 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.1887^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00146 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.142 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 42.71\%$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.142 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 6552

$$\begin{aligned}
 f &= 1.025 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00205 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.1789^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00205 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.013 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.085 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.142 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 59.90\%$$

a_{max} 0.085 m/s ²	OK	a_{lim} 0.142 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7313

$$\begin{aligned}
 f &= 1.025 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00146 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.1887^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00146 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.009 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.061 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.142 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 42.71\%$$

a_{max} 0.061 m/s ²	OK	a_{lim} 0.142 m/s ²
---	----	---

Pulsující síla v uzlu 7526

$$\begin{aligned}
 f &= 1.025 \text{ Hz} && \text{budící frekvence ve špičce odezvy} \\
 u_{\text{peak}} &= 0.00107 \text{ m} && \text{max. horizontální posunutí ve špičce odezvy} \\
 \Phi &= -91.1925^\circ && \text{fázový úhel} \\
 F &= 70 \cdot \sin(2\pi f T) = 70 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [N] && \text{pulsující síla} \\
 u &= u_{\text{peak}} \cdot \sin(2\pi f T) = 0.00107 \cdot \sin(6.44026 T) \quad [m] && \text{horizontální posunutí} \\
 v_{\text{max}} &= u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f) = 0.007 \text{ m/s} && \text{maximální rychlost} \\
 a_{\text{max}} &= -u_{\text{peak}} \cdot (2\pi f)^2 = -0.044 \text{ m/s}^2 && \text{maximální akcelerace} \\
 a_{\text{lim}} &= 0.14 \sqrt{f_0} = 0.142 \text{ m/s}^2 < 0.150 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$a_{\text{max}} / a_{\text{lim}} = 31.30\%$$

a_{max} 0.044 m/s ²	OK	a_{lim} 0.142 m/s ²
---	----	---

Obr. 164 Výpočet zrychlení ve sledovaných bodech pro harmonickou sílu v bodě 6552