

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

STANOVENÍ MODÁLNÍCH CHARAKTERISTIK CELOKOMPOZITOVÉHO KŘÍDLA S VYUŽITÍM MKP METOD

DETERMINATION OF MODAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE WINGS USING FEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ CHURÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN ŠPLÍCHAL

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Churý

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Stavba letadel (2301T039)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Stanovení modálních charakteristik celokompozitového křídla s využitím MKP metod

v anglickém jazyce:

Determination of modal characteristics of composite wings using FEM

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě poskytnutého geometrického modelu a vrstvení vypracujte podrobný MKP model celokompozitního křídla kluzáku včetně mechanizace křídla a systému řízení. Model bude zahrnovat jak tuhostní tak hmotovou podobnost se skutečnou konstrukcí. Zvažte okrajové podmínky a ovlivnění od propojení pravého a levého křídla. Na tomto modelu proveďte výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitání tohoto křídla.

Následně proveďte redukci tohoto MKP modelu na nosníkový model. Vytvořte postup pro převod celé konstrukce celokompozitního křídla na tuhostně a hmotově ekvivalentní nosníkový MKP model. Stanovte vlastní frekvence a tvary kmitání tohoto MKP modelu. U obou modelů porovnejte jak frekvence, tak tvary kmitání pro jednotlivé mody.

Cíle diplomové práce:

- Vytvoření podrobného MKP modelu celokompozitního křídla
- Analýza vlastních frekvencí a tvarů kmitání na podrobném MKP modelu
- Vytvoření postup pro redukci celé konstrukce celokompozitního křídla na nosníkový MKP model a vytvořte samotný model
- Analýza vlastních frekvencí a tvarů kmitání na nosníkovém MKP modelu
- Porovnání výsledky obou analýz

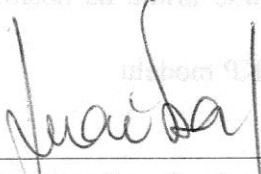
Seznam odborné literatury:

- [1] Niu, C.Y.M., Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., Brno, 2005, 664 stran
- [2] Middleton, D.H., Composite Material in Aircraft Structure, Longman Singapore Publisher Ltd., 1990, 379 stran
- [3] MSC Software Corporation: MSC/Nastran 2013 Linear Static Analysis, MSC Software Corporation, Santa Ana, 2013
- [4] R&G Faserverbundwerkstoffe. [Online] <http://www.r-g.de/>.

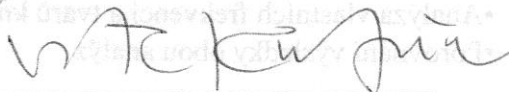
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Šplíchal

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 15.11.2013


doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu




prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce se zabývá vypracováním podrobného MKP modelu celokompozitního křídla kluzáku a následně provedení redukce vytvořeného MKP modelu na nosníkový model. U vytvořených modelů jsou vypočítány vlastní frekvence, tvary kmitání křídla a následně porovnány získané výsledky analýz obou modelů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vlastní frekvence, MKP-metoda konečných prvků, kompozity

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the creation of a detail FEM model all-composite wing of glider. Reduction created FEM model of the beam model. The models are calculated natural frequencies, vibration shapes wings and then subsequently compared the results of analyzes of both models.

KEYWORDS

Eigenvalue, FEM-Finite Element Method, Composites

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHURÝ, T. Stanovení modálních charakteristik celokompozitového křídla s využitím MKP metod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 137 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Šplíchal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně s použitím odborné literatury.“

V Brně dne

.....

Jméno

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Janu Šplíchalovi za odborné a cenné rady, připomínky a metodické vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za velkou podporu během studia na vysoké škole.

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	DEFINICE ZÁKLADNÍCH ÚDAJŮ O LETOUNU	11
2.1	POPIS LETOUNU	11
2.2	ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY [5].....	12
3	HISTORIE	14
4	MKP MODEL	20
4.1	GEOMETRICKÝ MODEL	20
4.2	STRUKTUÁLNÍ MODEL	23
4.3	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	28
4.4	MODÁLNÍ ANALÝZA	29
5	MKP NOSNÍKOVÝ MODEL	37
5.1	REDUKCE.....	37
5.2	STRUKTUÁLNÍ NOSNÍKOVÝ MODEL.....	48
5.3	OKRAJOVÉ PODMÍNKY	48
5.4	MODÁLNÍ ANALÝZA	49
5.5	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRVNÍ KONFIGURACE	52
6	LADĚNÍ NOSNÍKOVÉHO MKP MODELU	53
6.1	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ DRUHÉ KONFIGURACE	56
7	ZÁVĚR.....	57
8	SEZNAM LITERATURY	58
9	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	59
10	SEZNAM PŘÍLOH	61

1 ÚVOD

Aeroelastické problémy v současné době patří mezi primární otázky při konstruování letadel. V důsledku vysokých rychlostí letu a optimalizování samonosné koncepce s ohledem na minimální hmotnost, je vysoké riziko výskytu nebezpečných aeroelastických jevů. Proto tuhost, která souvisí bezprostředně s odolností proti aeroelastickým jevům, patří dnes v mnoha případech mezi kritické návrhové parametry. Tím narůstá i význam aeroelasticity jako vědního oboru.

Při řešení problematiky s aeroelastickými jevy se využívá cesta výpočtového modelu. Tato varianta je finančně nejméně nákladná, protože nevyžaduje drahou experimentální práci. Hlavním úkolem je nalezení spolehlivého matematického modelu pro výpočet kritických rychlostí letounu. Další velmi významnou výhodou tohoto postupu je možnost předběžné aeroelastické analýzy charakteristických vlastností již ve stádiu projektu. Vyvarujeme se tak možných nutných modifikací na hotovém prototypu. Výpočet obvykle začíná stanovením statických aeroelastických charakteristik, tedy hledáním kritické rychlosti torzní divergence a reverzace řízení. V dalším kroku je proveden výpočet vlastních kmitů a frekvence kmitání (tzv. modální analýza). Závěrečnou etapou výpočtové metody pro průkaz odolnosti je nalezení kritické rychlosti třepetání (tzv. flutteru).

Cesta výpočtového modelu není natolik rozvinutá ve smyslu aplikace moderních metod a přístupů, aby byla dostatečně prokázána odolnost. Analytické výpočtové metody jsou spolehlivě použitelné jen pro křídlo s jednoduše definovanou geometrií a přímou spojitou elastickou osou. V současné době je takováto analýza nedostačující a je zapotřebí ji doplnit o experimentální analýzy a výsledky.

Modální analýza v současné době v MKP výpočtech aeroelastického chování je taková, že přetrvává trend modelování konstrukce letounu pomocí systému náhradních nosníků s použitím nosníkových elementů. Uvedený postup výpočtu vychází z předpokladu, že až donedávna byl tento způsob díky matematické komplikovanosti, jedinou možnou variantou. Výsledkem modální analýzy je výpočet vlastních frekvencí pro konstrukci daného MKP modelu.

V průběhu letu dochází ke kmitání konstrukce doprovázené vibracemi, kdy určité bezpečné frekvence je konstrukce schopna utlumit. Naopak nebezpečnými jsou periodické frekvence kmitů, které jsou stejné jako ty přírodní strukturální. Dochází ke zvýšení a zesílení vibrací

vedené až ke snižování únavové životnosti. Následkem může být strukturální poškození nebo zničení konstrukce.

Cílem diplomové práce je u poskytnutého modelu a vrstvení vypracovat podrobný MKP model celokompozitního křídla kluzáku, včetně mechanizace křídla a systému řízení. Model bude zahrnovat tuhostní a hmotovou podobnost se skutečnou konstrukcí, správné uvážení okrajových podmínek a následný výpočet vlastních frekvencí a tvarů kmitání křídla pro podrobný MKP model křídla.

Poté bude provedena redukce na nosníkový MKP model křídla s popisem použitého postupu. Nosníkový MKP model musí být tuhostně a hmotově ekvivalentně podobný s celokompozitní konstrukcí křídla. Bude proveden výpočet první konfigurace vlastních frekvencí a tvarů kmitání pro nosníkový MKP model, zhodnocení výsledků a provedená úprava nosníkového MKP modelu. Následuje výpočet druhé konfigurace vlastních frekvencí a tvarů kmitání pro nosníkový MKP model. Na závěr bude zhodnocení výsledků a porovnání jak frekvencí, tak tvarů kmitání pro jednotlivé mody.

2 DEFINICE ZÁKLADNÍCH ÚDAJŮ O LETOUNU

2.1 POPIS LETOUNU

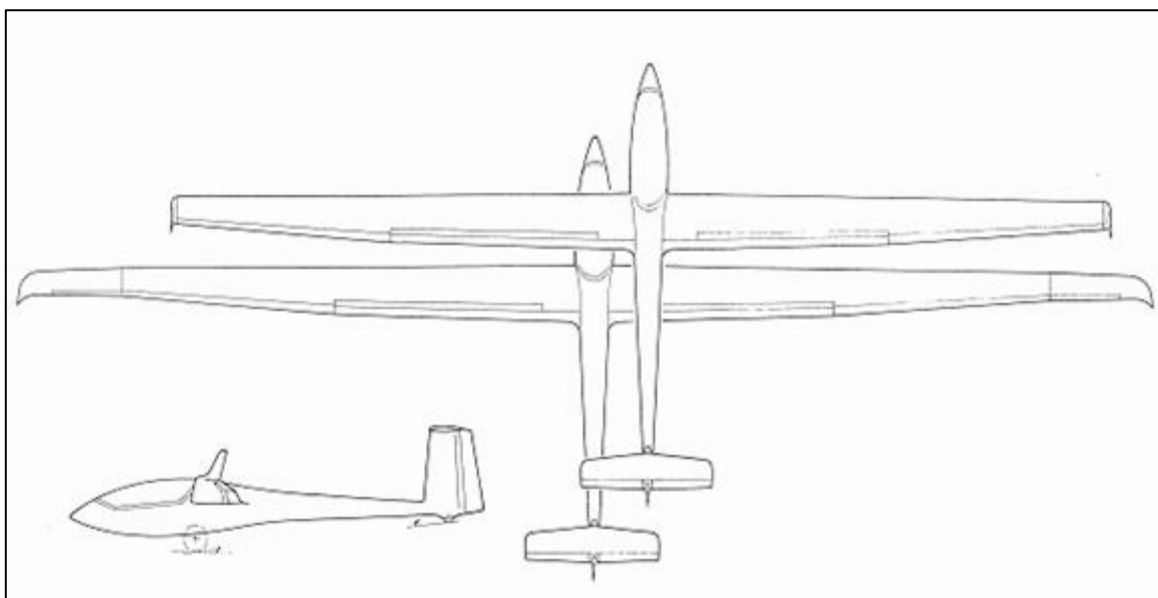
Větroň Glasflügel 304 CZ-17 je jednomístný celokompozitní středoplošník s rozpětím 17,43 metrů. Dvoudílné křídlo s půdorysným tvarem dvojitého lichoběžníku na konci plynule přechází ve winglet. Odtoková hrana je po celém rozpětí opatřena flaperonem. Do křídel je možné umístit vodní zátěž díky integrovaným nádržím o objemu 115 litrů. Ocasní plochy jsou ve tvaru „T“. Letoun je vybavený zatahovacím podvozkem [5].



Obrázek 2.1 – Glasflügel 304 CZ-17 [5]

2.2 ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY [5]

Rozměry:	Rozpětí křídla	17,43	[m]
	Plocha křídla	9,88	[m ²]
	Plošné zatížení	22,78	[-]
	Délka trupu	6,45	[m]
	Výška trupu	1,36	[m]
Hmotnost:	Prázdná	235	[kg]
	Maximální vzletová	450	[kg]
	Max. Wing loading	45,55	[kg/m ²]
	Min. Plošné zatížení	30,80	[kg/m ²]
	Vodní přítěž	115	[l]
	Váha nenosných částí	300	[kg]
Rychlosti:	VNE	250	[km/h]
	Pádová (při max. ploš. zat.)	73	[km/h]
	Nejmenší opadání	0,56	[m/s]
	při rychlosti	60	[km/h]
	Nejlepší klouzavost	44	[-]
	na rychlosti	116	[km/h]



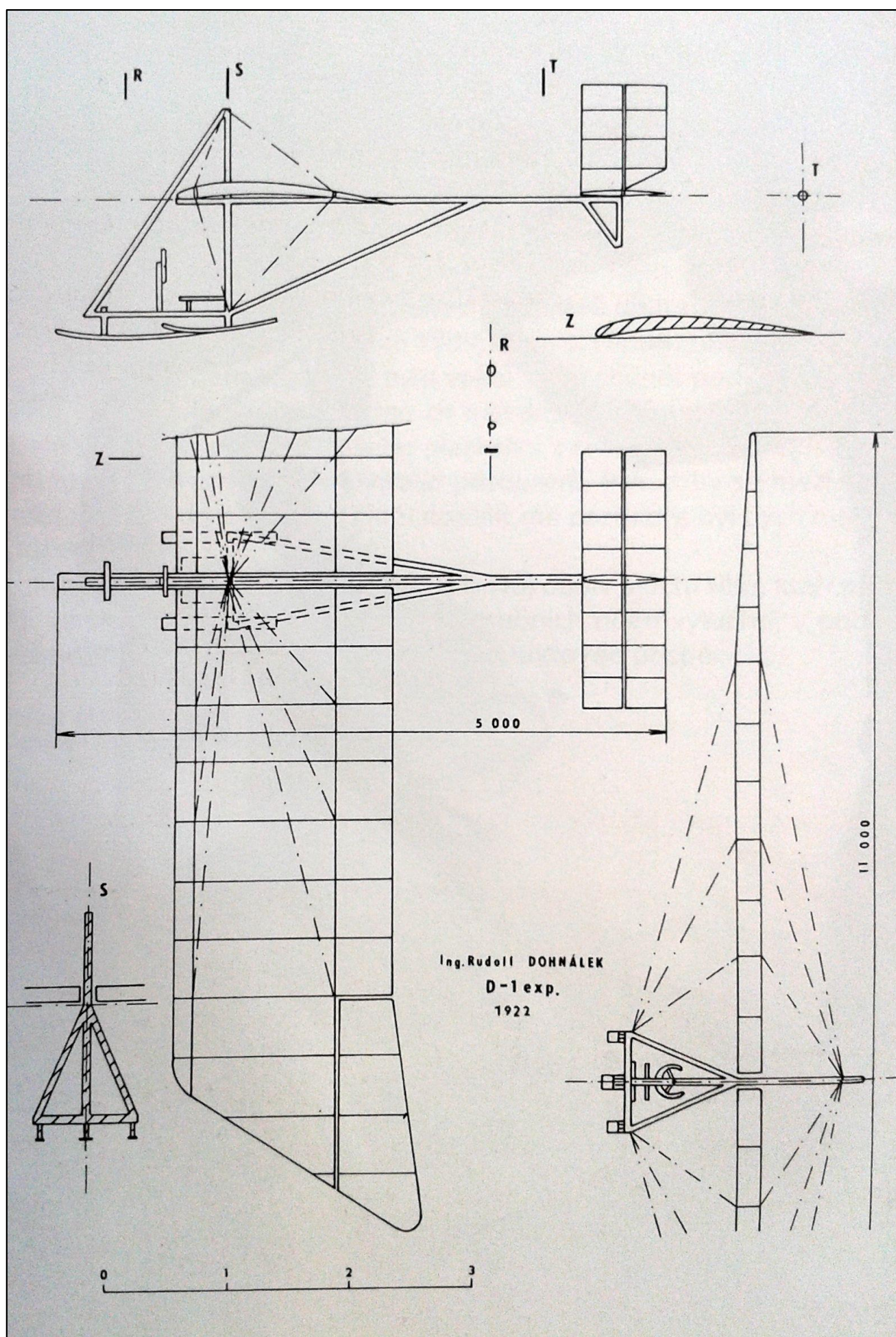
Obrázek 2.2 – Muška větroně Glasflügel 304 CZ [5]

3 HISTORIE

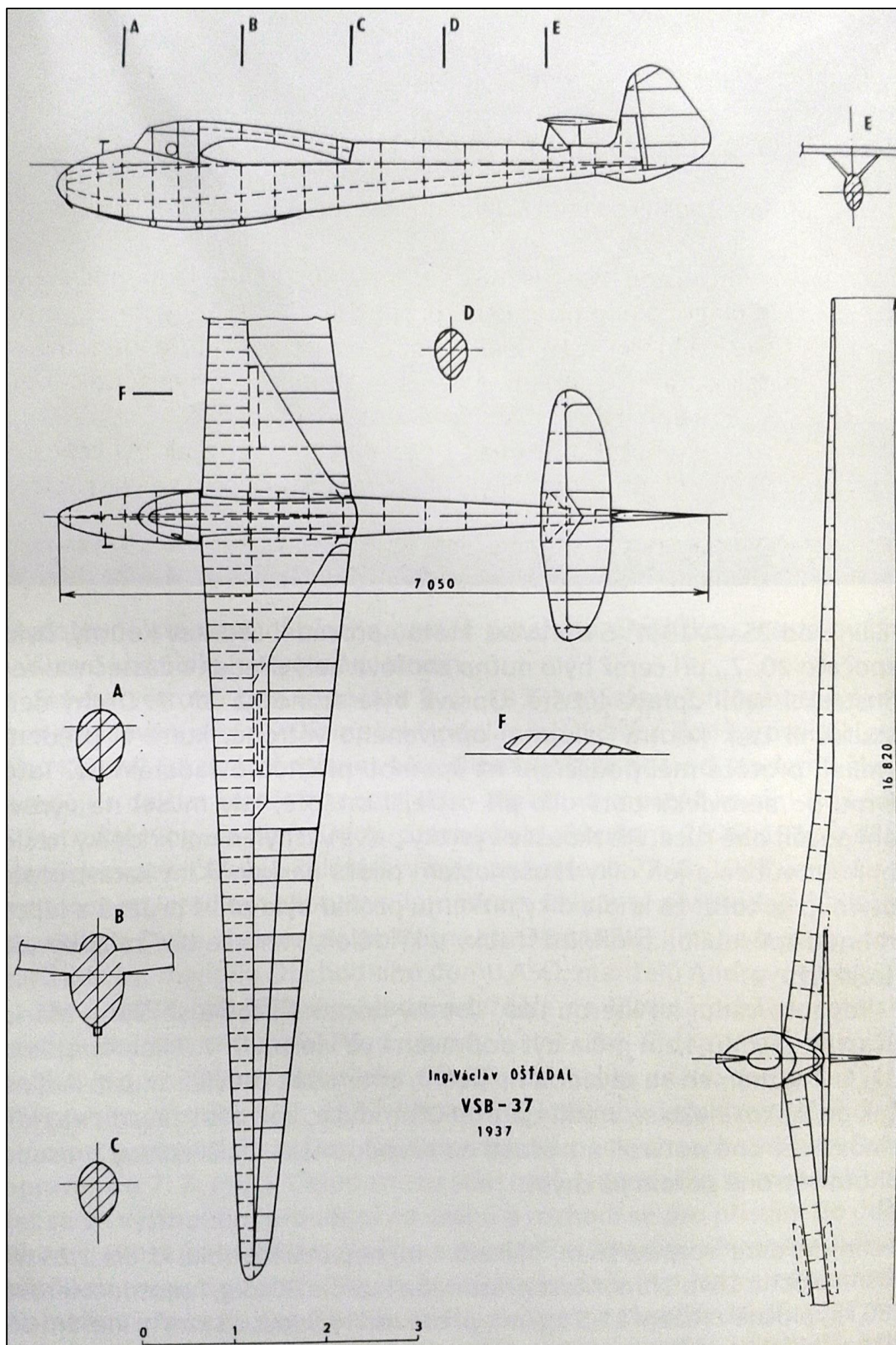
Počátek kluzáků v Československu lze řadit zejména do doby meziválečné, kdy se jednalo o velmi plodné období pro tento druh letadel. Předhánění konstruktérů, které z letadel se udrží ve vzduchu nejdéle, a zároveň uletí nejdelší vzdálenost, nabíralo na obrátkách. Soutěživost přinášela jisté nebezpečí, ale hlavně se nesla v duchu pokroku, zaměřením na počáteční konstrukce křídla a jeho vývoj [6].

Při pohledu na provedení křídla se převážně jednalo o polosamonosný hornoplošník. Křídlo bylo většinou více dílné s tenkým klenutým nebo vypouklým profilem. Pro potah se využívalo plátno vyztužené systémem ocelových lan. Uvedené konstrukce využil i Ing. Rudolf Dohnálek při stavbě kluzáku nesoucí jméno D – 1 EXP, který je vyobrazen na obrázku 3.1 [6].

V období 40.ých let 19. st. se postupně začaly používat předepsané typy profilů křídla, buď po celém rozpětí stejné, nebo v kořeni a na konci křídla rozdílné (aerodynamické kroucení křídla). Konstruktéři upustili od používání ocelových lan, které nahradili dřevěnými konstrukcemi. Ty tvořily nosník pro podélné vyztužení a žebra pro příčné vyztužení. Náběžnou hranu až po nosník pokrývala překližka, na zbytku plochy křídla bylo plátno. U některých kluzáků se použily konstrukce křídla lomené do tvaru M. Pro zlepšení aerodynamických vlastností byly vytvořeny usměrňovací plátky na spodní straně křídla. Křídla se připojovaly k centroplánu. Při stavbě kluzáku VSB – 37 se uvedenými trendy inspiroval Ing. Václav Ošřádal. Jmenovaný typ modelu je vyobrazen na obrázku 3.2 [6].



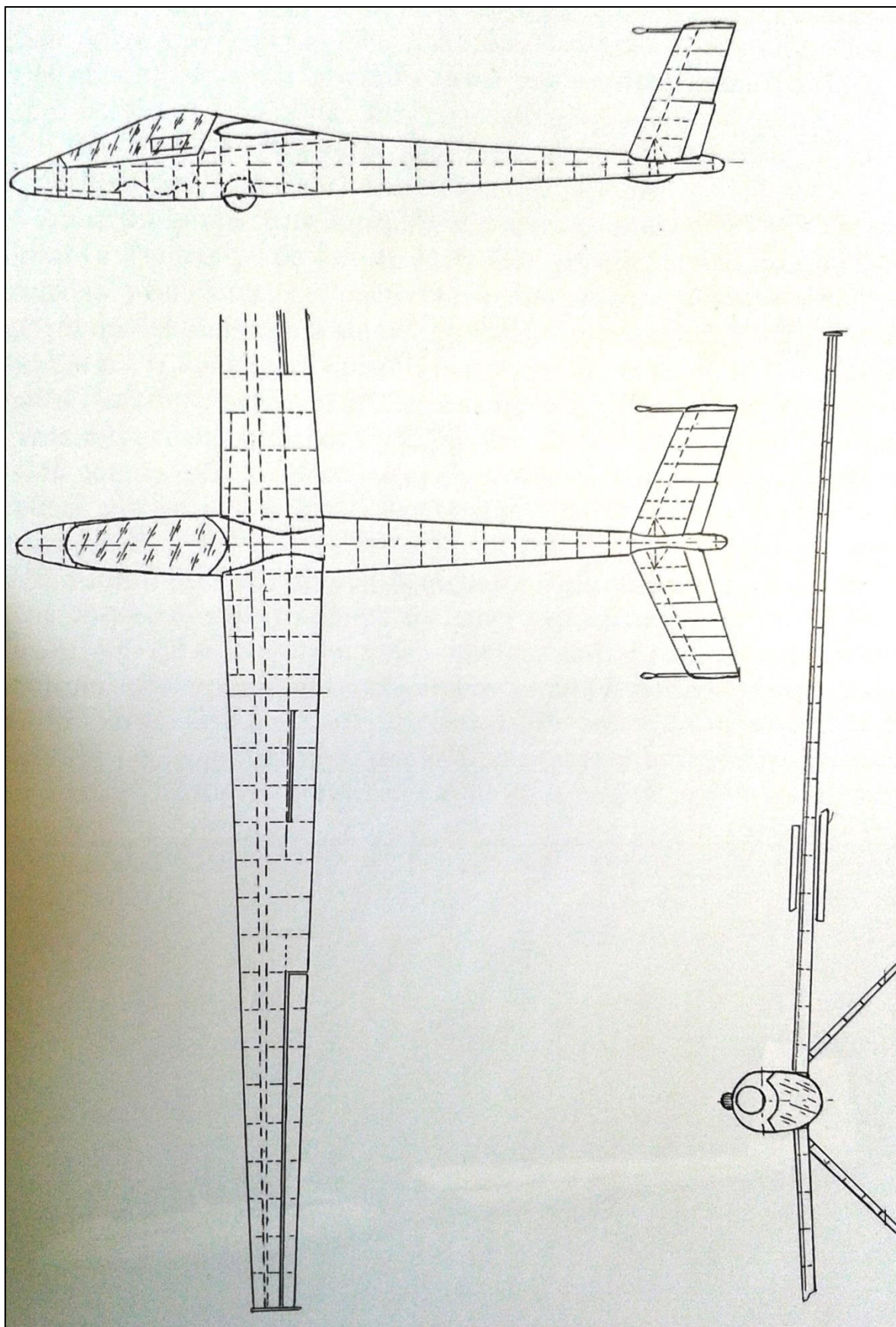
Obrázek 3.1 – Muška kluzáku D - 1 EXP. [6]



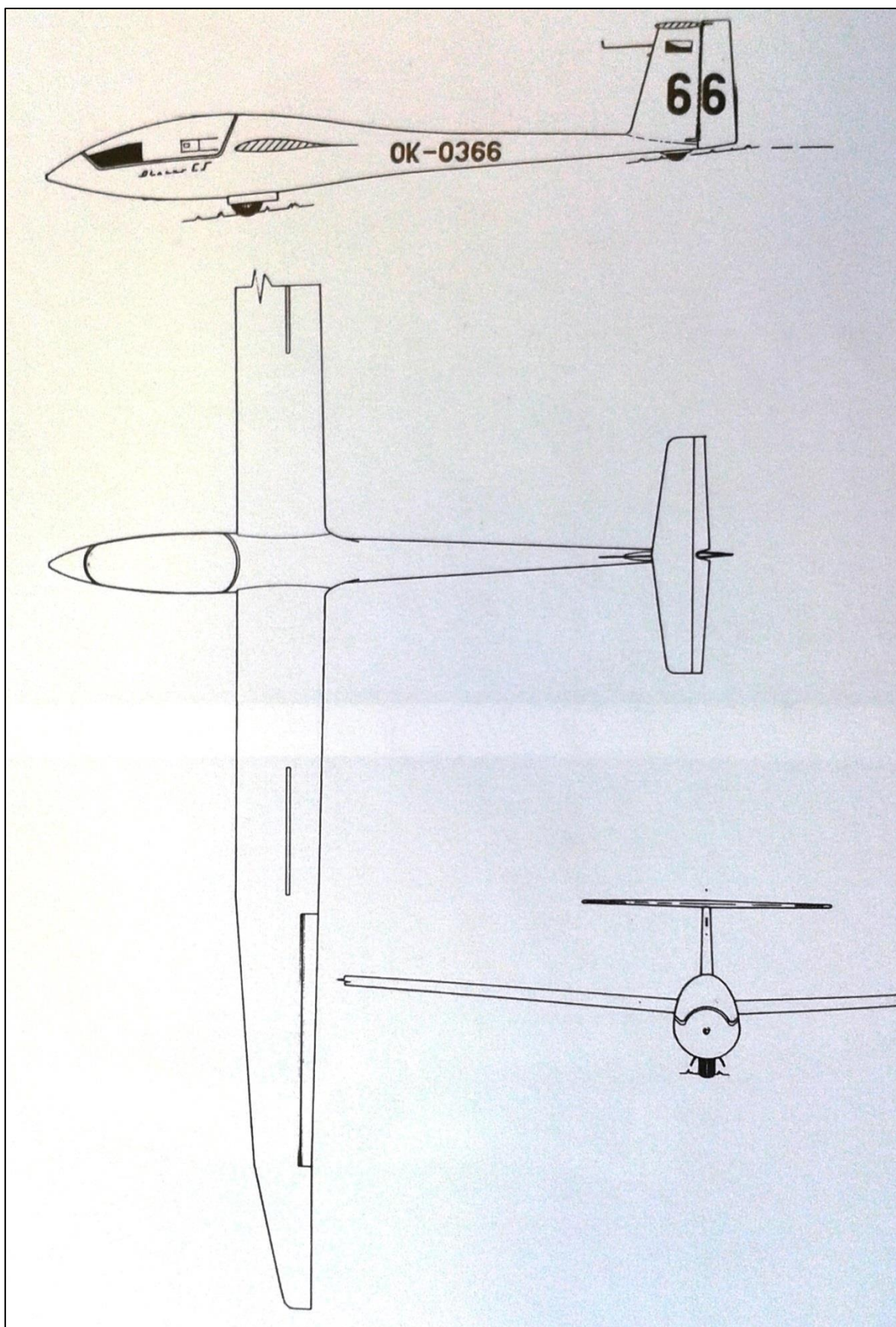
Obrázek 3.2 – Muška kluzáku VSB - 37 [6]

Po r. 1945 se znovu naplno rozeběhla stavba a vývoj větroňů. Konstrukce připomínala tu na konci meziválečného období. Pozdějším vývojem se začalo využívat geometrického kroucení křídla. Na začátku 60.tých let 19. st. bylo velkým pokrokem používání laminárních profilů křídla. Šlo o dřevěnou konstrukci s prvky tkaniny slepené lepidlem. Nosníkové překližky a žebra tvořily skříňový nosník. Vzniklá dutina v přední části křídla byla vyplněná pěnovým polystyrenem. Potah tvořily jednotlivé vrstvy tkaniny na sebe položené a slepené lepidlem. Konce křídel přecházely ve winglet. Částí těchto inovací se inspiroval Ing. Rostislav Pospíšil při konstrukci větroně SB – 66 Orlice vyobrazeném na obrázku 3.3 [7].

V současné době jsou nejvíce využívány tzv. „vysokovýkonné“ větroně, používající celolaminátové křídlo vybavené brzdícími a vztakovými klapkami. Koncové oblouky jsou opatřeny winglety. Mezi „vysokovýkonné“ větroně patří i Schempp – Hirth Discus vyobrazený na obrázku 3.4 [7].



Obrázek 3.3 – Muška větroně VSB - 66 Orlice [7]



Obrázek 3.4 – Muška větroně Schemp - Hirth Discus [7]

4 MKP MODEL

MKP model se skládá z několika částí. Prvním je geometrický model, který v sobě zahrnuje kompletní geometrii křídla, druhý pak strukturální model. Zde byla vytvořena kompletní síť na celém modelu, definovaly se vlastnosti materiálu a provedlo se vrstvení jednotlivých částí modelu. V poslední řadě se vložily okrajové podmínky modelu.

4.1 GEOMETRICKÝ MODEL

Geometrie byla převzata z programu Unigraphics NX 6 a pro další úpravy importovaná do CATIE V5R21. Počáteční geometrický model obsahoval horní a dolní plochy pravého křídla a nástavce, označení rozložení pásnic po rozpětí křídla a plochy krakorce pro obě z křídel.

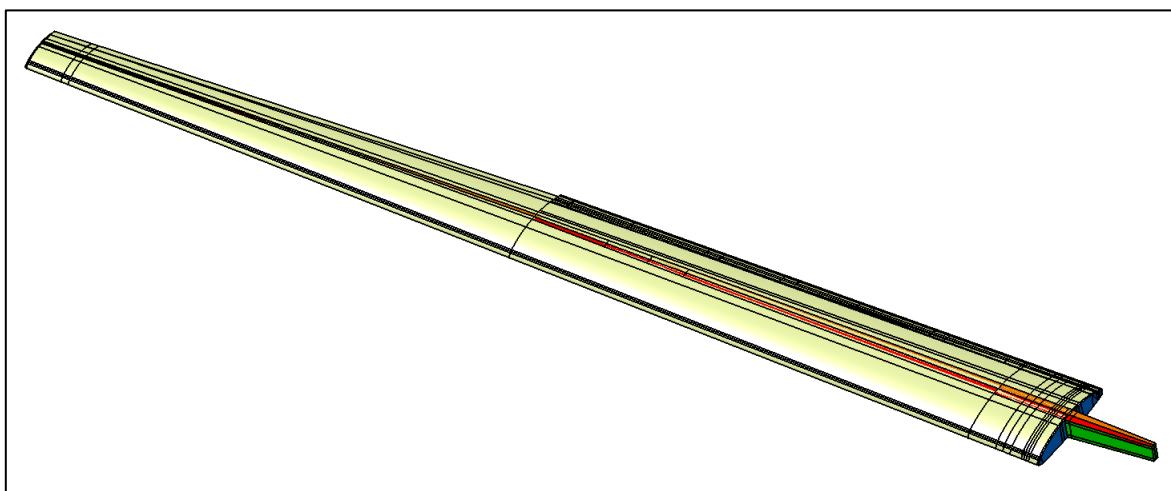
Jednotlivé plochy se vlivem importování skládaly z většího počtu menších ploch, a proto bylo nutné tyto plochy zkompletovat a rozdělit dle vrstvení jednotlivých částí. Veškeré podklady k vrstvení jsou uvedeny v příloze 1, 2, 4 a 5. Následně byly vytvořeny horní a dolní pásnice, které se skládají z daného počtu tažených rovingů. Dle uvedeného vztahu (1) se vypočítaly hodnoty průřezů potřebné k modelování rozložení rovingů po rozpětí křídla.

$$S = \frac{\text{počet provazců} \cdot \text{počet dílčích rovingů} \cdot 0,461234}{0,62} \quad [mm^2] \quad (1)$$

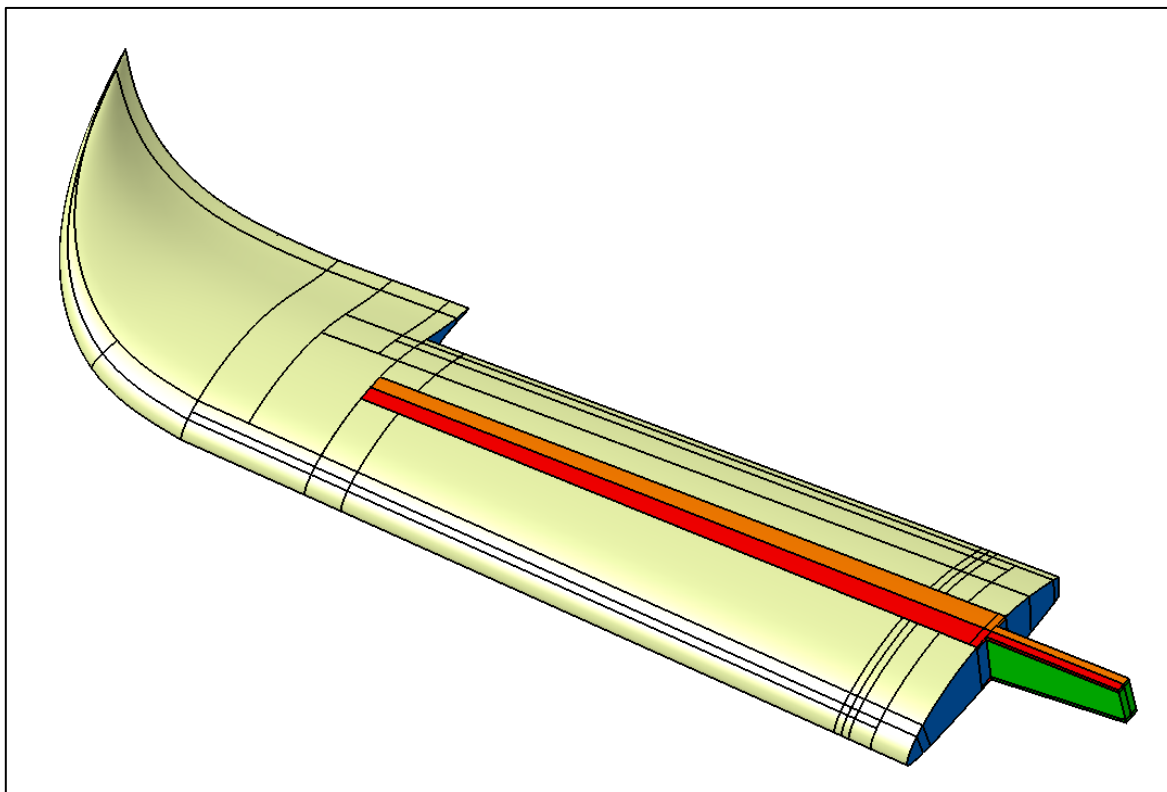
Grafické znázornění, počet provazců a počet dílčích rovingů jsou uvedeny v příloze 3. Použité hodnoty ve vztahu byly převzaty z experimentálního měření. Výpočty rozložení rovingu pro pravé a levé křídlo jsou uvedeny v příloze 7 a 8. Pro kompletní model křídla bylo nutné ještě vymodelovat stojinu, zadní nosník, box krakorce nástavce a žebra. Všechny tyto části byly rozděleny na jednotlivé plochy dle vrstvení jednotlivých částí. Po zhotovení modelu pravého křídla se využilo funkce zrcadlení pro vytvoření levého křídla. V oblasti krakorce, kořenového žebra a pásnic do místa propojení, bylo nutné model upravit.

Při modelování pravého návstavce se postupovalo podle podkladů uvedených v příloze 6, až na některé výjimky stejně. K rozložení rovingů po rozpětí návstavce nebyly poskytnuty žádné údaje, z tohoto důvodu po konzultaci s vedoucím práce se rozložení volilo. Zvolený počet provazců a výpočet rozložení rovingů návstavce je uveden v příloze 9. Dále se po konzultaci volila velikost krakorce návstavce, který byl přizpůsoben šířce boxu v křídle a je roven šířce pásnice v daném místě. Kompletně vytvořený model návstavce se zrcadlil k vytvoření modelu levého návstavce.

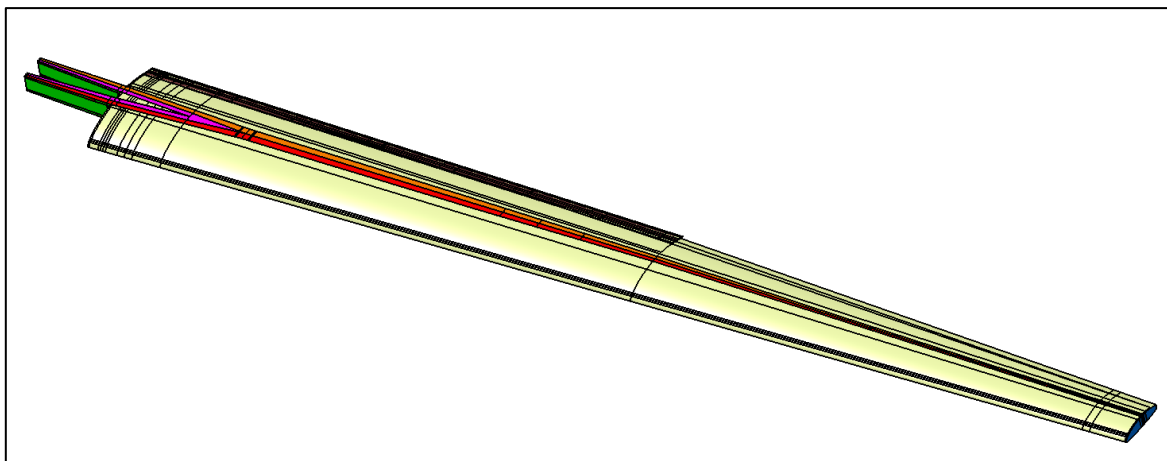
Model obsahoval 201 ploch a 833 křivek. Jednotlivé části křídel jsou vyobrazeny na následujících obrázcích 4.1 až 4.4. Poté byl vytvořený model kompletován do jednoho partu. Exportování pro další postupy se využilo ve formátu step. Pro lepší přehlednost probíhalo exportování samostatně po jednotlivých částech.



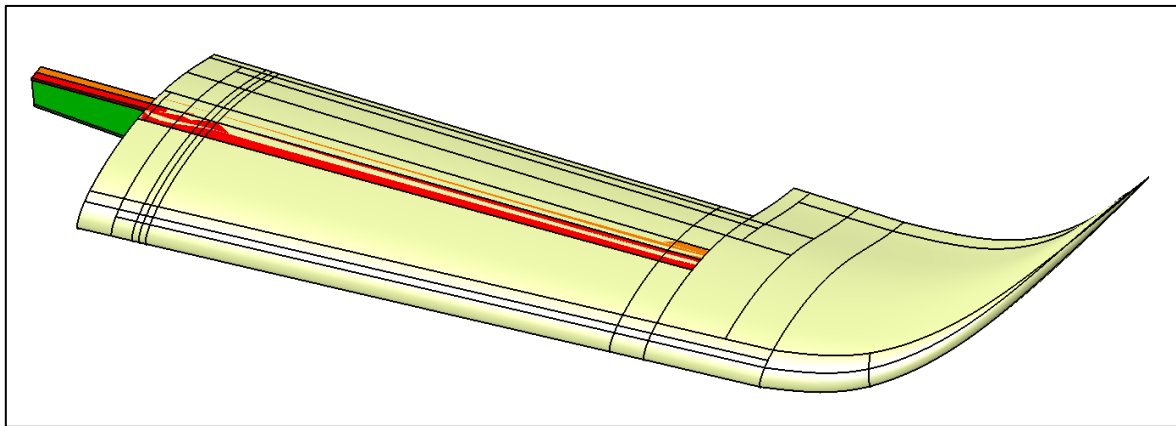
Obrázek 4.1 – Model pravého křídla



Obrázek 4.2 – Model pravého nástavce



Obrázek 4.3 – Model levého křídla

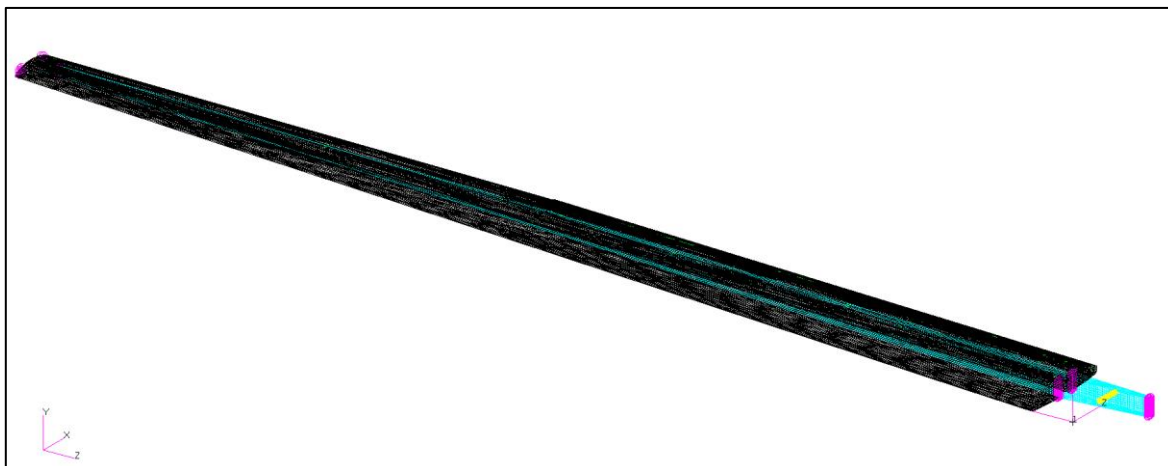


Obrázek 4.4 – Model levého nástavce

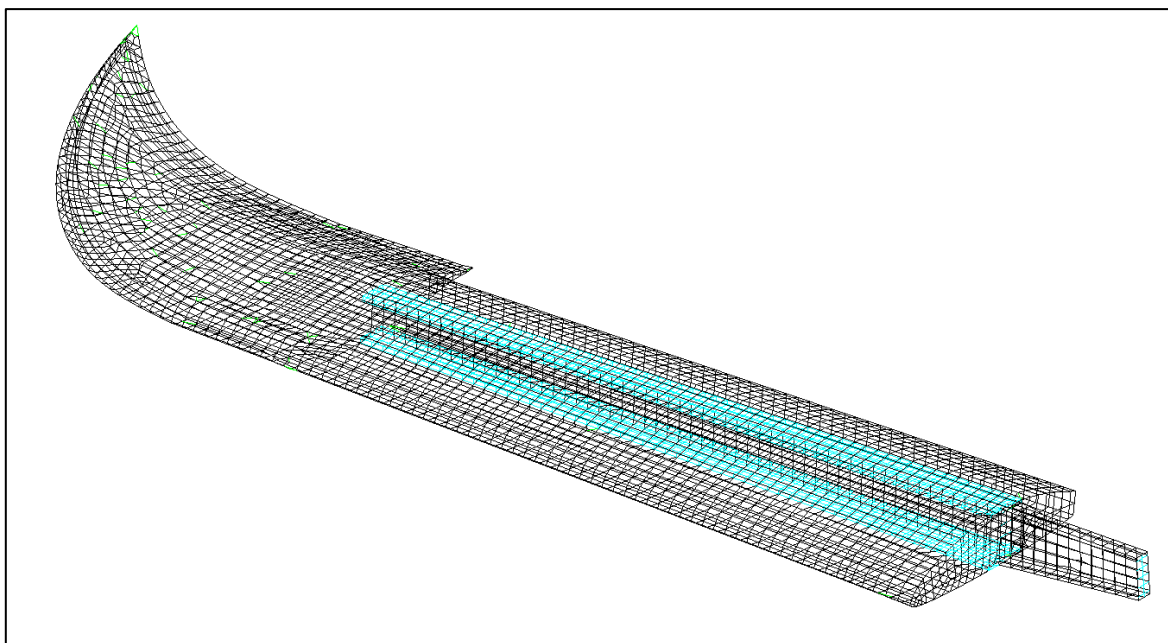
4.2 STRUKTUÁLNÍ MODEL

Strukturální model není klasického nosníkového typu jako je u aeroelastických výpočtů zvykem, ale jedná se o model skořepinový. Vytváření strukturálního modelu probíhalo v preprocesoru MSC.PATRAN 2013, kde byla kompletní geometrie převzata z programu CATIA V5R21. Model se po částech postupně importoval do připravených souborů rozdělených pro pravou a levou stranu křídla a nástavce. Při importu vznikly chyby v geometrii, které se musely opravit. Model byl upraven a zjednodušen pro použití MKP analýzy.

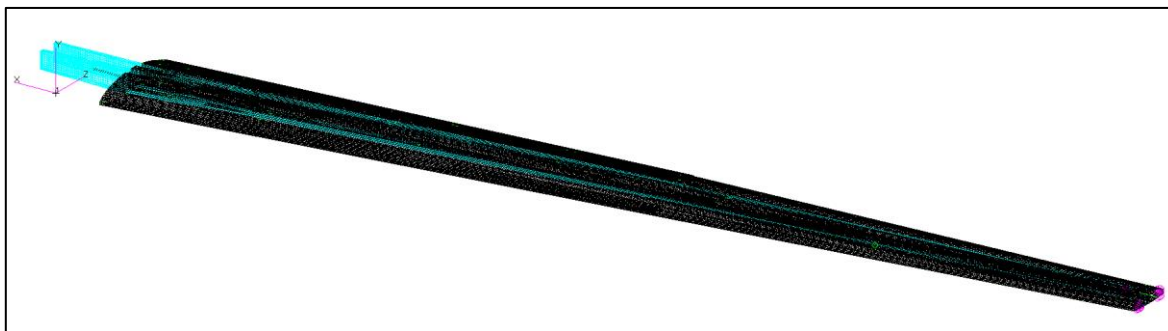
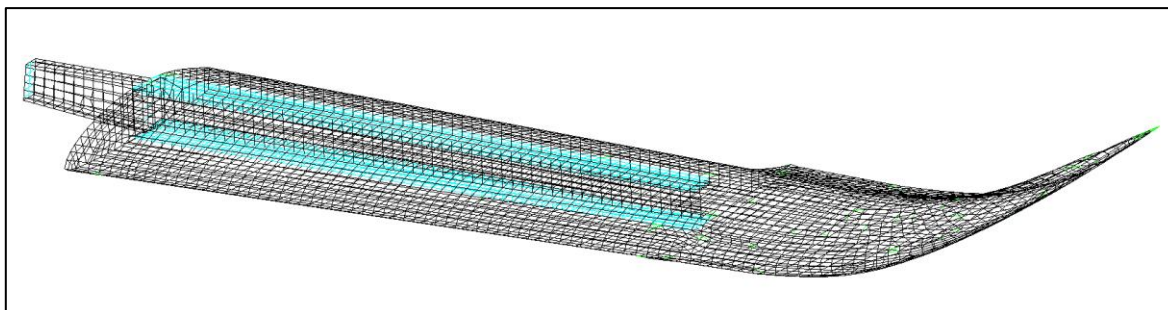
Vytvořené sítě jsou vyobrazeny na obrázcích 4.5 až 4.8, kdy celkový počet byl 439 126 bodů a 313 362 elementů. Primárně vytvářené elementy byly čtvercové QUAD 97 %, zbytek trojúhelníkové, MPC elementy nebo jednotlivé body. Kontrola se prováděla pomocí příkazu „VERIFY“, který znázorňoval chyby v napojení jednotlivých částí modelu.



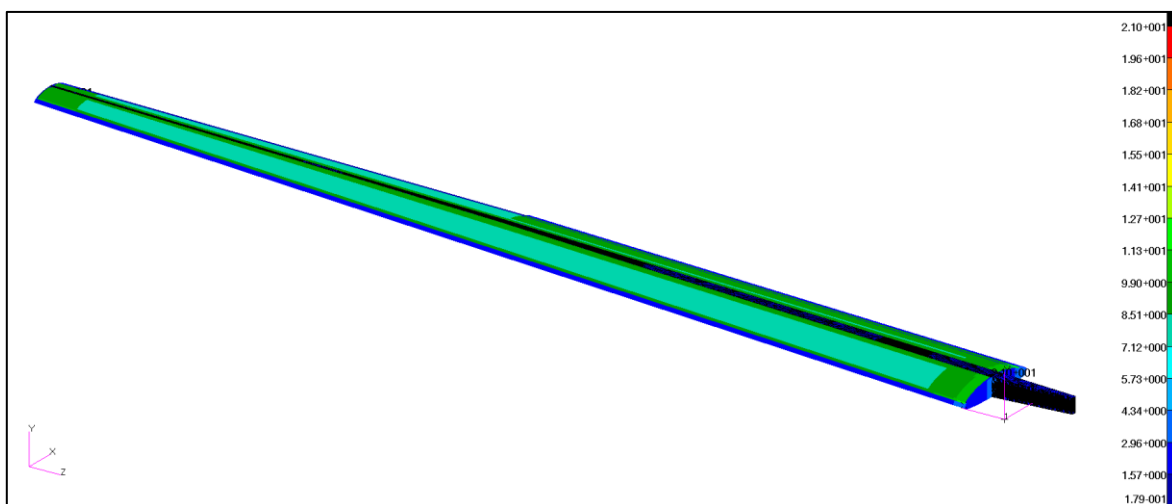
Obrázek 4.5 – Vytvořená síť pravého křídla



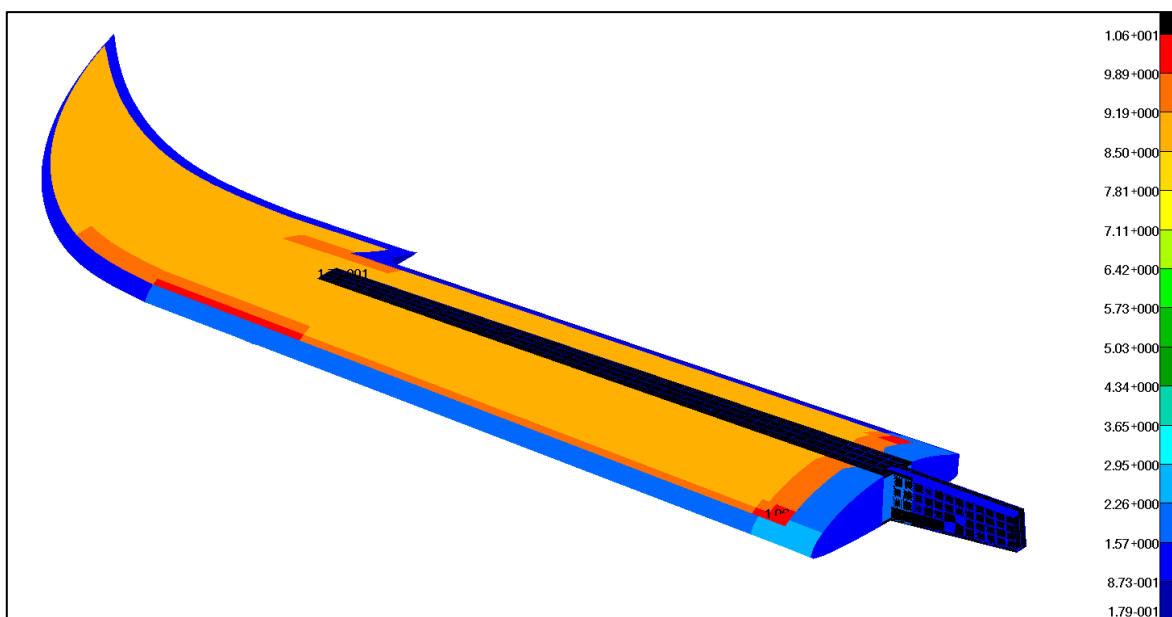
Obrázek 4.6 – Vytvořená síť pravého nástavce

**Obrázek 4.7 – Vytvořená síť levého křídla****Obrázek 4.8 – Vytvořená síť levého nástavce**

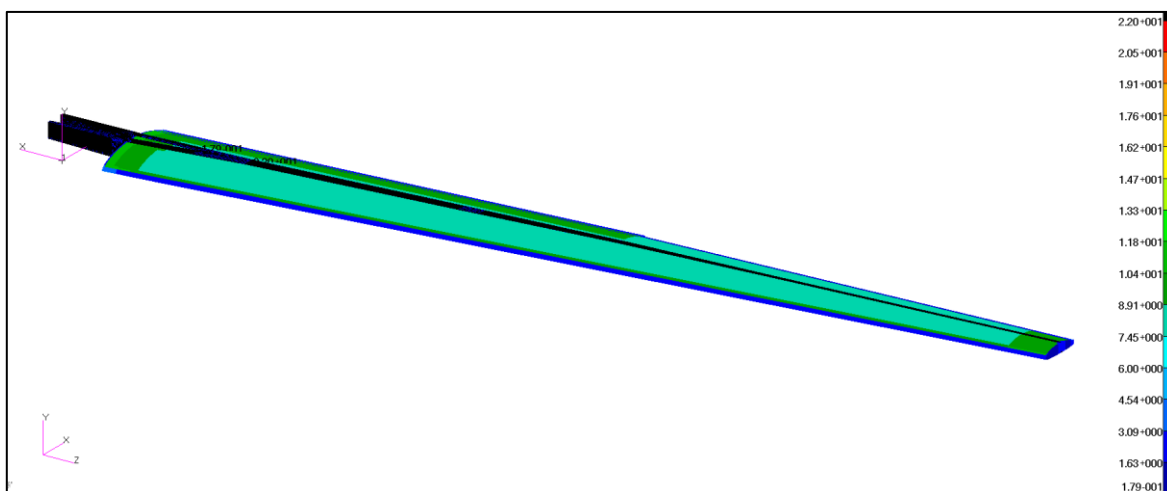
Jak již bylo zmíněno, ve strukturálním modelu byly definovány vlastnosti jednotlivých materiálů a tloušťky vrstvení. Hodnoty jsou uvedeny v příloze 10. Pomocí příkazu „Laminate Modeler“ se aplikovaly jednotlivé vrstvy na plochy modelu. Postupovalo se podle již zmíněných podkladů a postupů na jednotlivých částech modelu křídel a nástavců. Z důvodu nekompletních údajů o vrstvení bylo na některých místech po konzultaci s vedoucím práce vrstvení odhadováno. Výsledné tloušťky vrstvení jsou vyobrazeny na obrázcích 4.9 až 4.12.



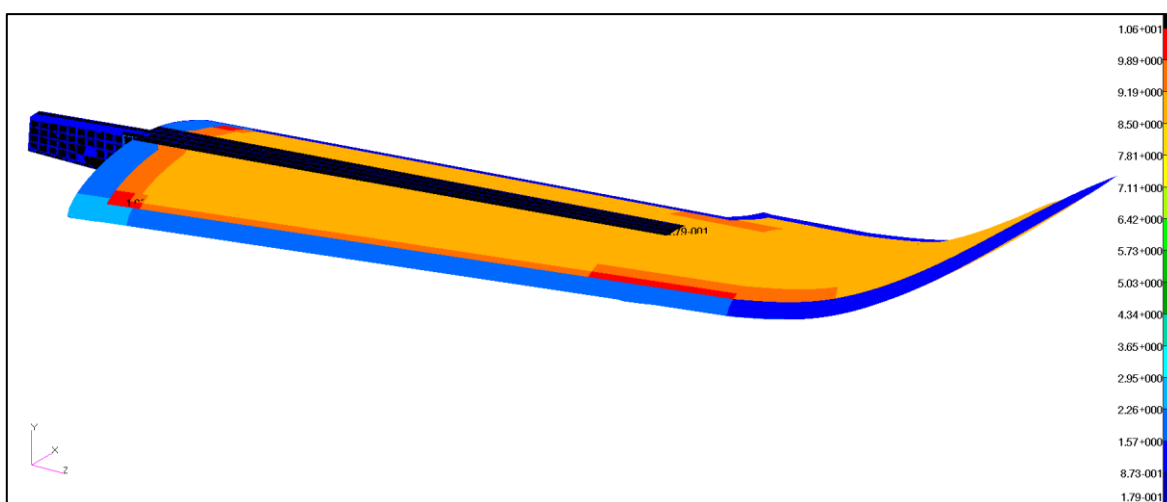
Obrázek 4.9 – Tloušťka vrstvení pravého křídla



Obrázek 4.10 – Tloušťka vrstvení pravého nástavce



Obrázek 4.11 – Tloušťka vrstvení levého křídla

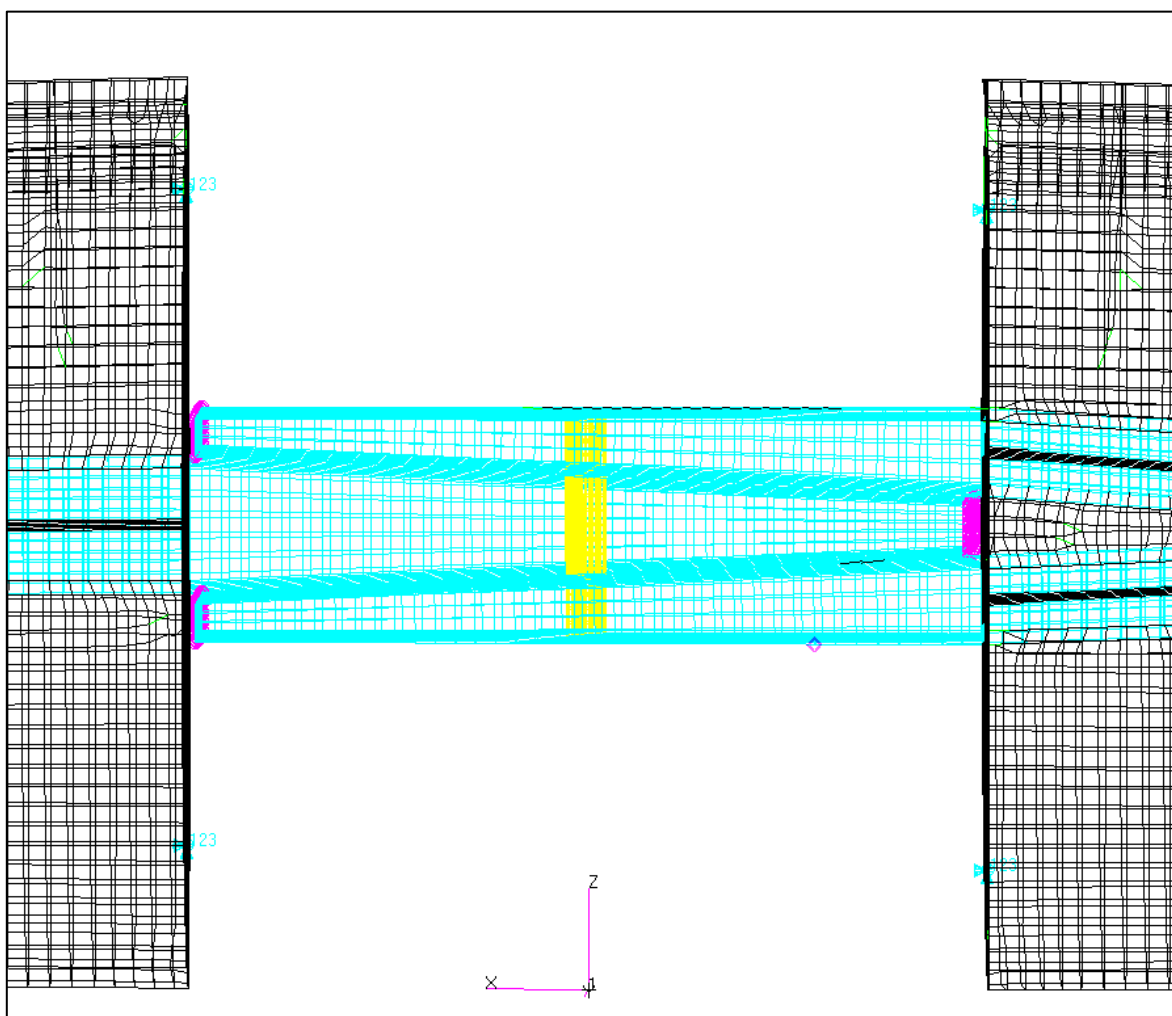


Obrázek 4.12 – Tloušťka vrstvení levého nástavce

Hotové části modelu se následně kompletovaly do jednoho souboru. Při importování se vynechaly plochy a body. Kontrola probíhala příkazem „Group elements with no properties“, kdy se jednalo o vyhledávání skupin, které nemají zadané vlastnosti.

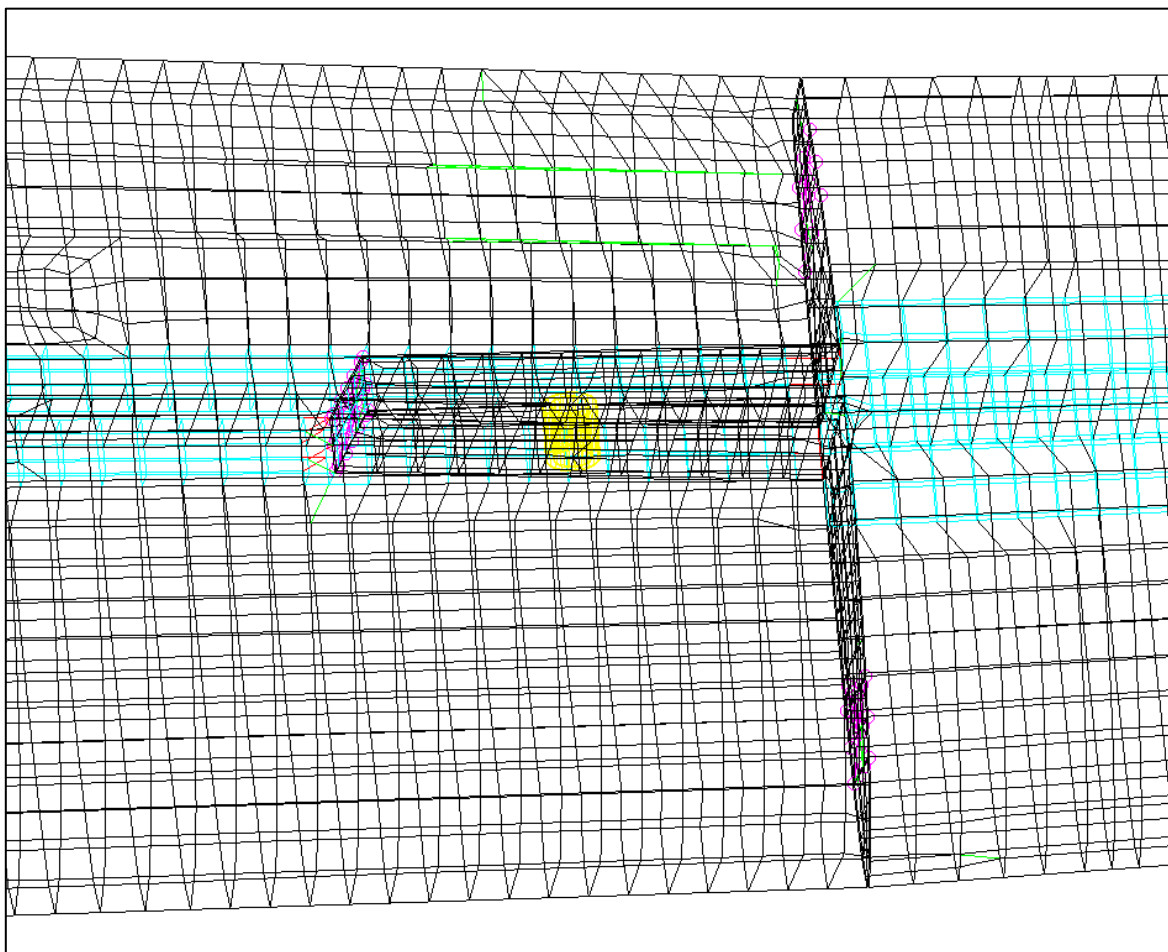
4.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

V okrajových podmínkách křídla se vymezil translační pohyb v bodech, ve kterých je realizováno spojení křídla s trupem. Jedná se o zalaminované vidlice vycházející z kořenového žebra, které zapadají do otvorů vytvořených v trupu. Spojení a zároveň zajištění polohy krakorců vůči sobě bylo provedeno ocelovým čepem $\varnothing 15 \times 2,5 \text{ mm}$. K úplnému zajištění slouží i zalaminované vidlice na konci nosníků, které se zasouvají do otvorů protilehlého kořenového žebra. Toto spojení bylo vytvořené pomocí MPC elementů typu RBE2. Okrajové podmínky kořene křídla jsou vyobrazeny na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13 – Okrajové podmínky kořene křídla

Napojení nástavce ke křídlu je realizováno třemi zalaminovanými vidlicemi a spojovacím čepem. Dvě vidlice vychází z kořenového žebra nástavce a zapadají do připravených děr v koncovém žebře křídla. Třetí je vedená z nosníku a zapadá do připravené díry v boxu krakorce. Všechny byly vytvořeny pomocí MPC elementů typu RBE2. Zajištění bylo provedeno pomocí ocelového čepu $\varnothing 10 \times 1,5 \text{ mm}$. Vše je vyobrazeno na obrázku 4.14.



Obrázek 4.14 – Okrajové podmínky kořene nástavce

4.4 MODÁLNÍ ANALÝZA

Reálné řešení problému vlastních frekvencí je velmi důležité pro řešení dalších analyzovaných sekvencí. Numerický výpočet toho problému je velmi obtížný a časově náročný. Proto, MSC.Nastran nabízí metody ve dvou různých kategoriích: redukční (trigonální) metodu a metodu iterativní (Lanczos) [9].

Rovnice modální analýzy je ve tvaru:

$$[K]x = \lambda[M]x \quad (2)$$

Rovnice vzpěrné stability je ve tvaru:

$$[K]x = \lambda[K_d]x \quad (3)$$

kde:

$[K]$	-	Matice tuhosti
$[K_d]$	-	Diferenciální tuhost
$[M]$	-	Matice hmotnosti
λ	-	Vlastní frekvence
x	-	Vektor vlastních kmitů

Tyto problémy mohou být vyřešeny pomocí redukční metody s přeměnou na kanonický tvar a snížení celé matice pro trigonální formu. Iterační metoda obvykle nemění matice K a M . Může použít jejich lineární kombinaci $[K]x = \lambda[M]x$, kde λ_s je hodnota posunu. MSC.Nastran pro vyřešení vlastních frekvencí používá iterativní (Lanczos) metodu. Ačkoli metody jsou matematicky vzájemně zaměnitelné, iterační metoda se doporučuje pro řešení velkých vzpěrů a řešení modální analýzy, například, které vznikají při analýze kompletních letadel. Metoda redukce je vhodná pro modální analýzu malých konstrukčních prvků [9].

Při metodě redukce se matice koeficientů nejprve převedou, při zachování vlastních frekvencí, do speciální formy (diagonální, trigonální, nebo horní Hessenberg), ze které může být vlastní frekvence snadno získána. V iterační metodě se najednou určitý počet kořenů extrahuje a aplikuje do původní dynamické matice. Jak již bylo zmíněno

MSC.Nastran používá iterativní (trigonální) metodu a metodu blokového posunutí (Lanczos) [9].

Předběžný postup transformace metod vyžaduje, aby hlavní podíl na celkově vynaloženém úsilí byl před první extrakcí vlastní frekvence. To znamená, že celková intenzita není závislá na počtu extrahovaných vlastních frekvencí a je lineárně úměrná počtu získaných vlastních frekvencí. Z toho vyplývá, že iterační metody jsou efektivní při páru vlastních frekvencí a méně efektivní, když je vysoký podíl vlastních frekvencí [9].

Obecné charakteristiky skutečných metod používaných v MSC.Nastran jsou porovnávány v tabulce 4.1. Trigonální metoda je pouze pro hodnocení vibrací konzervativních systémů, ale z důvodu omezení matice není určena pro vzpěrnou analýzu. Metodu Lanczos lze použít pro všechny druhy vibrací a vzpěrné analýzy pomocí řešiče MSC.Nastran. Hlavní výhodou je poskytnutí zálohování v případě selhání jedné z metod [9].

Tabulka 4.1 – Charakteristika metod používaných v MSC.Nastran

Charakteristika metod	Trigonální metoda	Lanczosnova metoda
Matice	(A, I) $A = \frac{K}{M}$ nebo $A = \frac{M}{K + \lambda M}$	$(M(K - \sigma M)^{-1}M, M)$ nebo $(K(K - \sigma K_d)^{-1}K, K)$
Počet výpočtů	$0 (n^3)$	$0 (nb_r^2 E_f)$

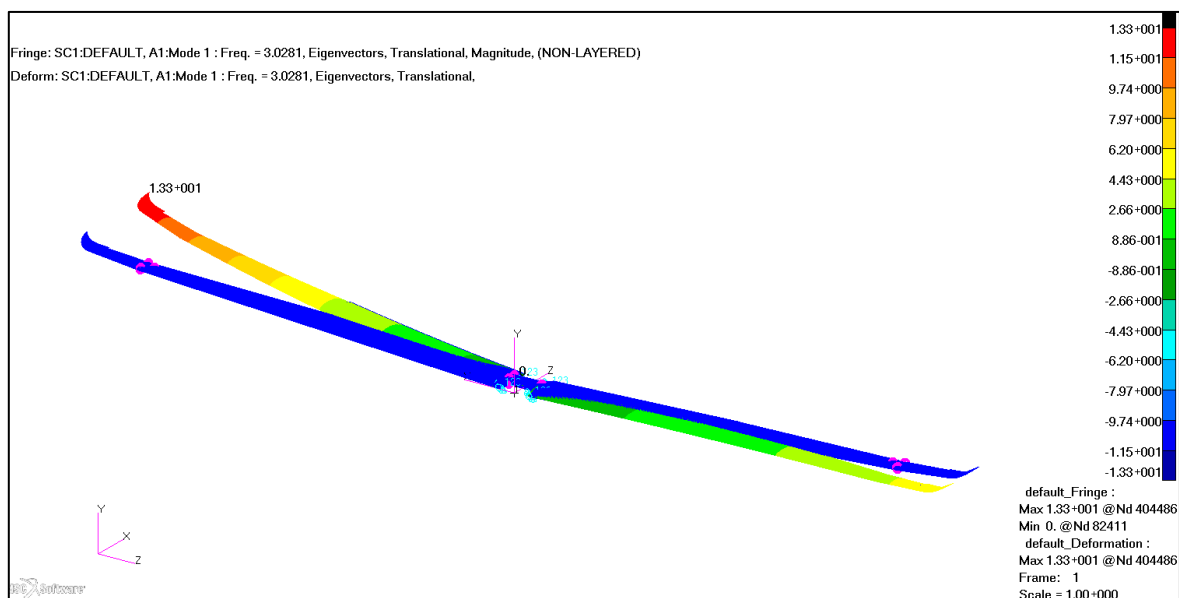
kde:

- n - Počet rovnic
- b_r - Parametr rozkladu
- E_f - Počet vlastních frekvencí

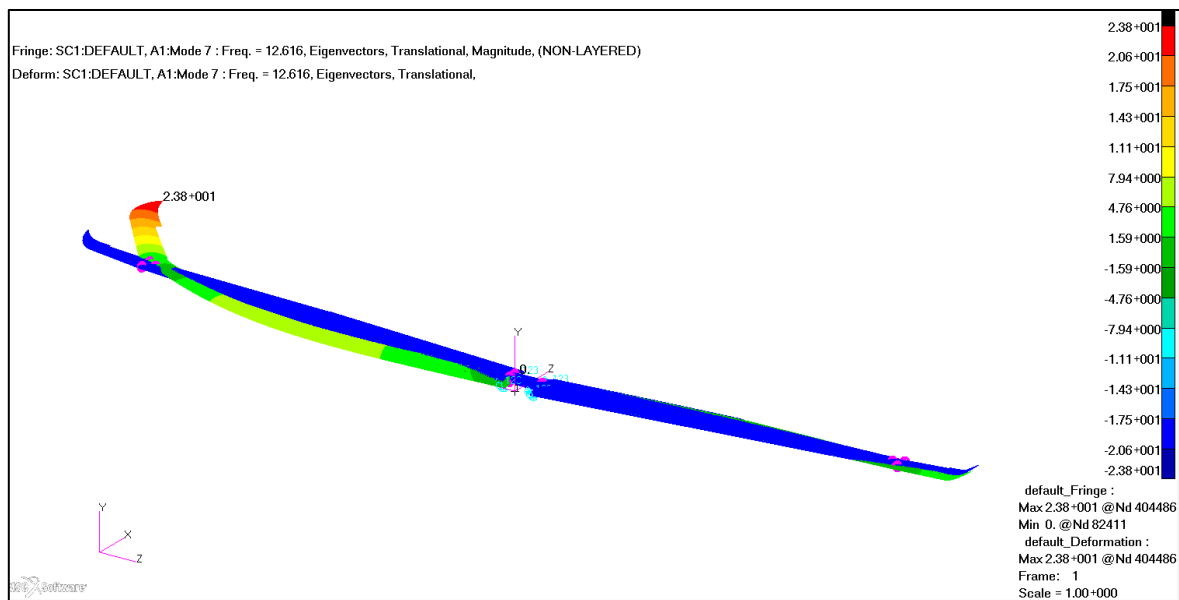
Na podrobném strukturálním MKP modelu křídla byla provedena modální analýza za účelem získání vlastních frekvencí a tvarů kmitání. Model zahrnoval jak tuhostní tak hmotovou podobnost se skutečnou konstrukcí. Výsledná hmotnost křídla byla 86,2 kg odečtená z programu MSC.PATRAN. K modální analýze byl aplikovaný řešič SOL103 „NORMAL MODES“. Pro získání výsledků z redukované pohybové rovnice byl použit Lanczosuv algoritmus. Hledané frekvence byly vyhodnoceny v rozsahu 0 – 100 Hz. Část výsledků modální analýzy jsou popsány v tabulce 4.2 a graficky znázorněny na obrázcích 4.15 až 4.21. Kompletní výsledky s grafickým vyobrazením jsou uvedeny v příloze 11. Při výpočtu nebyla zahrnuta mechanizace křídla a systém řízení.

Tabulka 4.2 – Část výsledků modální analýzy podrobného MKP modelu

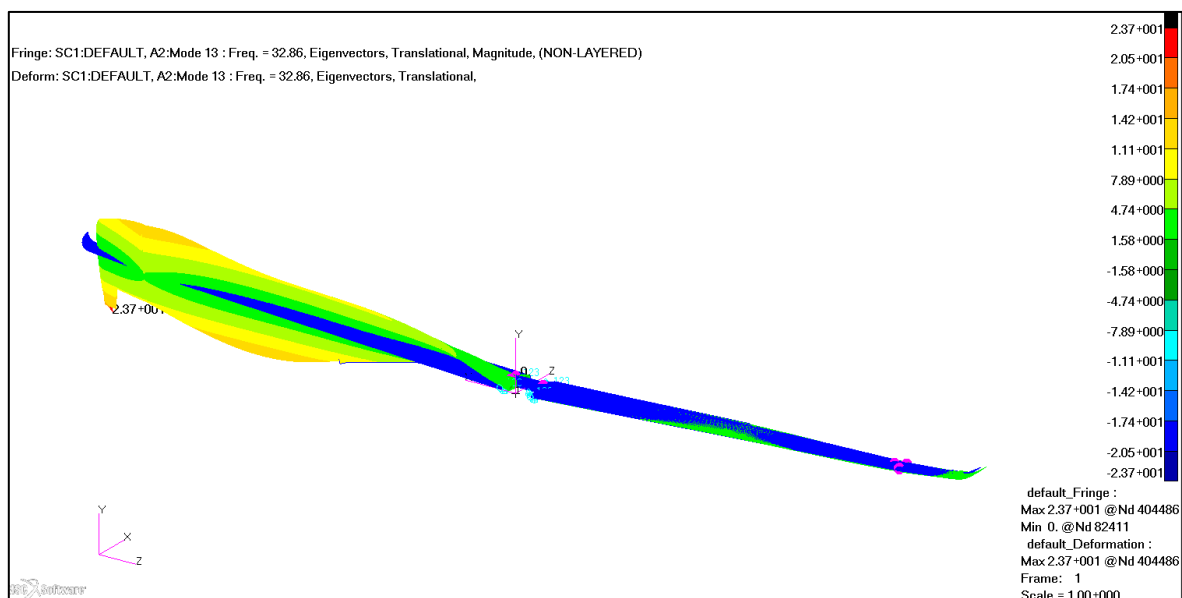
Mód	Popis tvaru	Vlastní frekvence
		[Hz]
1	Symetrický ohyb v podélném směru.	3,0281
7	Symetrický ohyb v podélném směru.	12,616
13	Čistý krut pravého křídla doprovázený vícenásobným ohybem s posunem levého křídla.	32,86
19	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru pravého křídla doprovázený krutem s posunem levého křídla.	52,611
25	Nesymetrický vícenásobný ohyb pravého křídla mění se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla přecházející v krut. U levého křídla byl nesymetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.	67,649
31	Nesymetrický vícenásobný ohyb mění se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.	82,635
38	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru mění se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený místními izolovanými vibracemi na odtokové hraně a krutem.	99,947



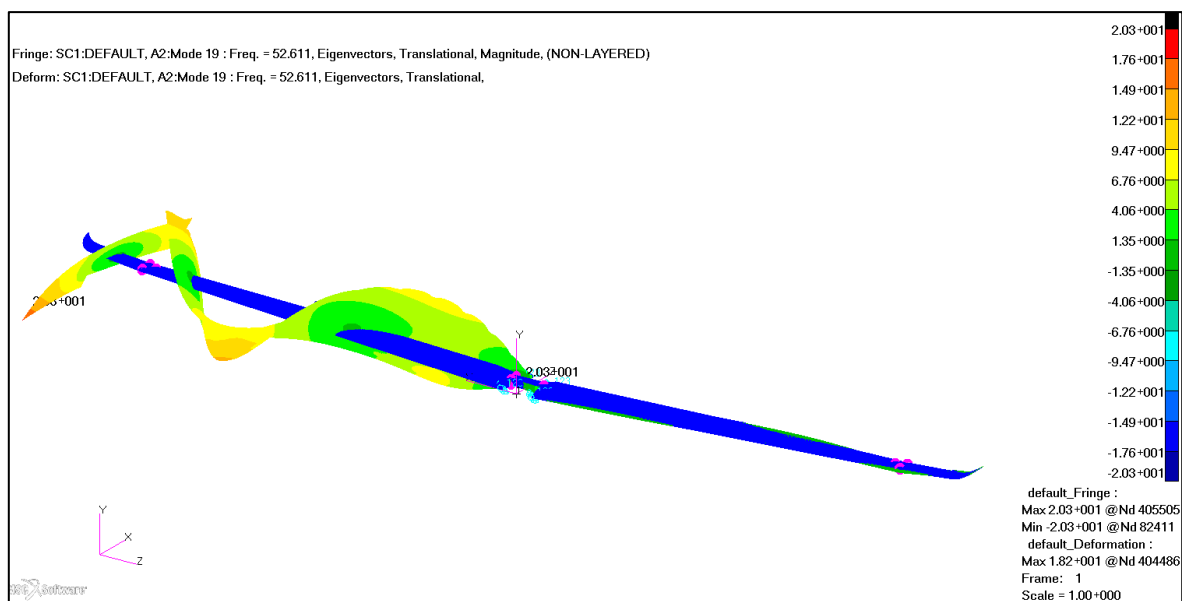
Obrázek 4.15 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 3,0281 Hz



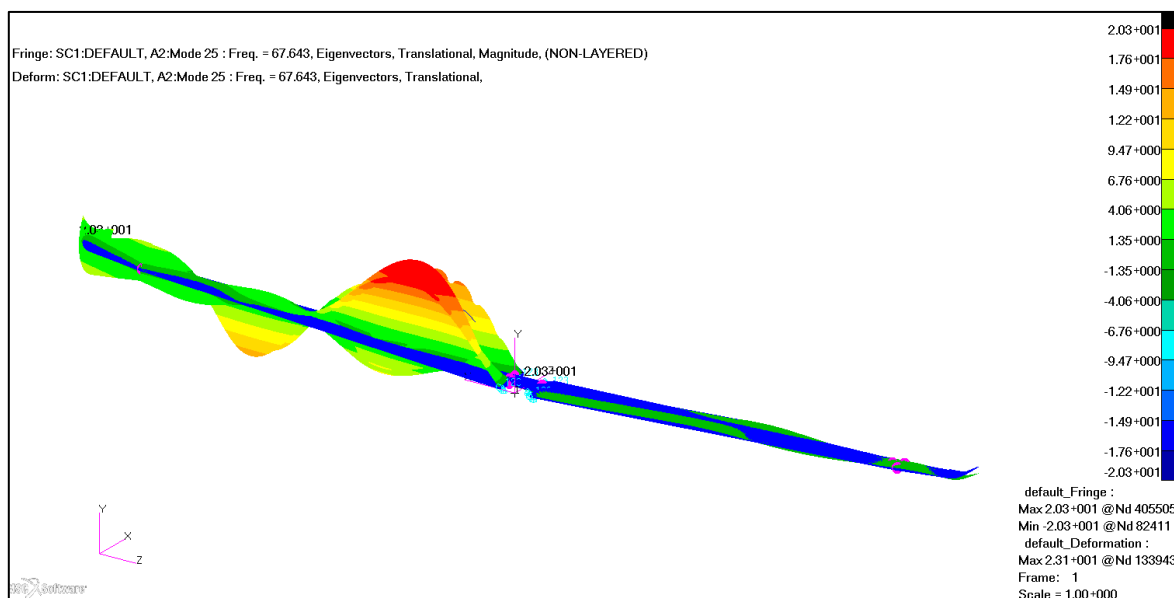
Obrázek 4.16 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 12,616 Hz



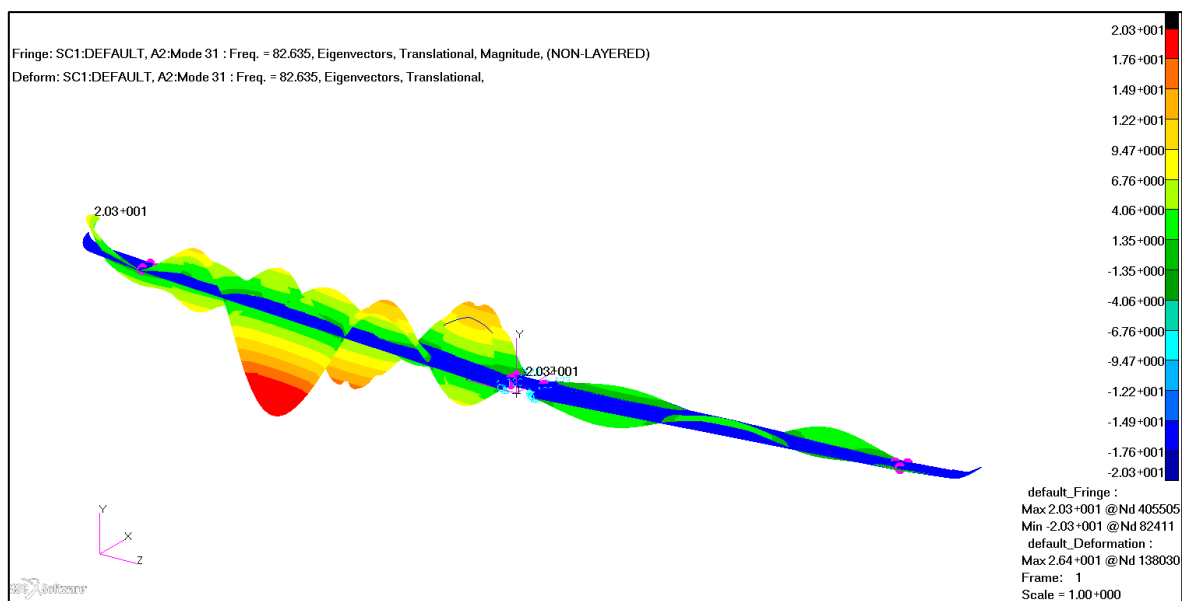
Obrázek 4.17 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 32,86 Hz



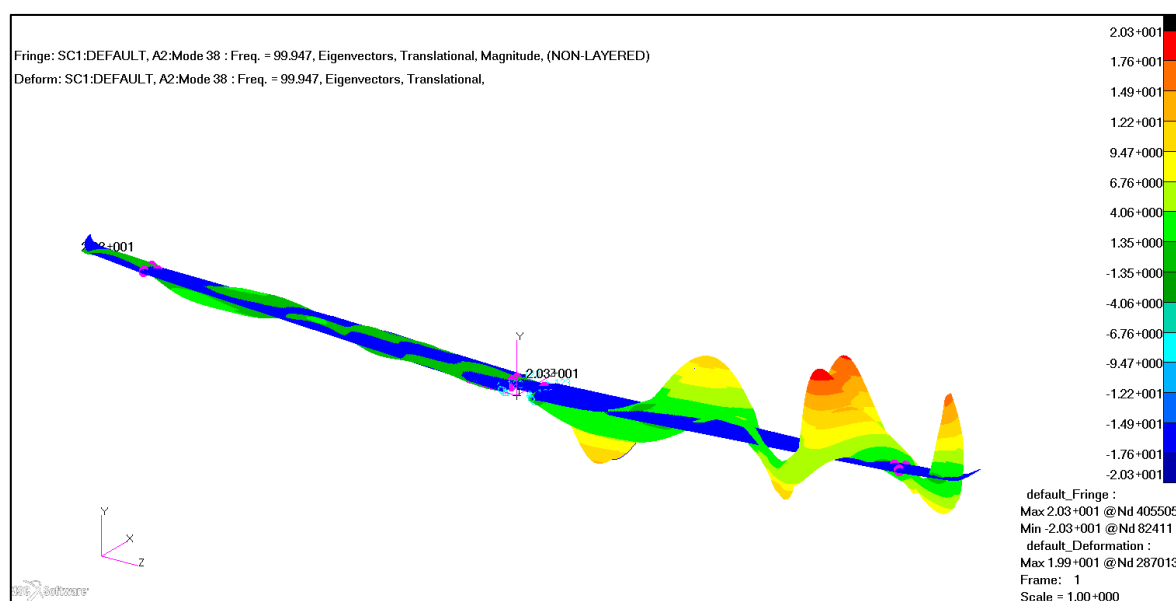
Obrázek 4.18 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 52,611 Hz



Obrázek 4.19 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 67,643 Hz



Obrázek 4.20 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 82,635 Hz



Obrázek 4.21 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 99,947 Hz

5 MKP NOSNÍKOVÝ MODEL

Pro aeroelastické výpočty, jak již bylo zmíněno, se převážně využívá nosníkového MKP modelu. Byla provedena tzv. redukce, kdy se vycházelo ze skutečných hodnot křídla, které byly obsaženy v podrobném MKP modelu. Křídlo bylo rozděleno na několik řezů, pro které bylo potřebné pomocí výpočtu uvedeného v následující kapitole, zajistit ekvivalentní tuhostní a hmotovou podobnost se skutečnou konstrukcí. Následně byla provedena modální analýza nosníkového MKP modelu pro získání vlastních frekvencí a tvarů kmitání. Jednalo se o první výpočtovou konfiguraci a její výsledky byly porovnány s výsledky podrobného MKP modelu. Bylo provedeno zhodnocení pro správné naladění druhé výpočtové konfigurace. Následně byly zhodnoceny kompletní výsledky všech výpočtů.

5.1 REDUKCE

Při redukci podrobného MKP modelu na nosníkový MKP model se vycházelo z hodnot modelu v programu CATIA V5R21. Pravé křídlo bylo rozdělené na deset rovnoměrných řezů. U levého křídla stačil jediný řez v oblasti rozdělení krakorce pro $z = 871,5 \text{ mm}$, protože zbylé řezy byly totožné s pravým křídlem. V ose symetrie křídel byly rozměry jak pravého, tak levého krakorce sečteny a dále počítáno s jedním neděleným průřezem. Kompletní hodnoty jsou popsány v příloze 12. U výpočtů se také používaly hodnoty jednotlivých vlastností a tloušťek materiálů uvedené v příloze 10.

Nejprve bylo nutné vypočítat podle vztahu (4) redukovanou tloušťku ohýbaných částí křídla. Výpočet se prováděl pro jednotlivé vrstvení na jednotlivých částech modelu pro všechny řezy. Pro části, kde se ve vrstvení nacházel herex, byl při výpočtu zanedbán z důvodu malého ovlivnění celkového výsledku [11].

$$t_{red_i} = \sum_{j=1}^n t_j \cdot \frac{E_j}{E_{ref}} \quad (4)$$

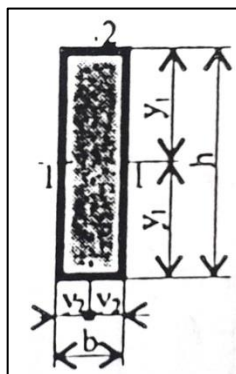
kde:

- t_{red_i} - redukovaná tloušťka pro daný počet vrstev
- t_j - tloušťka jednotlivé vrstvy
- E_j - modul pružnosti v tahu pro jednotlivé vrstvy
- E_{ref} - referenční modul pružnosti v tahu

Daný počet vrstev byl použitý dle vrstvení jednotlivých částí uvedených v příloze 1, 2, 4, 5 a 6. Moduly pružností v tahu a tloušťky jednotlivých vrstev jsou popsány v příloze 10. Při úvaze výpočtu ohybu v jednotlivých řezech křídla bylo zjištěno, že modul pružnosti v tahu musí být brán ve směru kolmém na vrstvení, který se rovná modulu pružnosti v tahu v příčném směru. Modul pružnosti v tahu v podélném směru byl použitý jako referenční [11].

Redukovaná tloušťka v daných řezech se vypočítala pro potah, stojinu a zadní nosník. Materiál pásnic byl izotropní s rozměry danými dle podrobného MKP modelu.

Poté byly vypočítány kvadratické momenty průřezů, kdy všechny části byly obdélníkového tvaru. Na obrázku 5.1 je vyobrazený obdélníkový průřez a následně vztahy (5) a (6), pro výpočet kvadratických momentů průřezů. Jedná se o výpočet ve směrech **1** a **2**, respektive pro osy **X** a **Y**. Bylo nutné brát v úvahu správné natočení obdélníkového průřezu. Zadní nosník modelu byl pootočený o úhel α a zde pro výpočet kvadratického momentu průřezu se použil vztah (7) [10, 11].



Obrázek 5.1 – Obdélníkový průřez

$$J_1 = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad [mm^4] \quad (5)$$

$$J_2 = \frac{h \cdot b^3}{12} \quad [mm^4] \quad (6)$$

kde:

- $J_{1(X)}$ - kvadratický moment průřezu osy 1 (osy X)
- $J_{2(Y)}$ - kvadratický moment průřezu osy 2 (osy Y)
- b - šířka obdélníkového průřezu
- h - výška obdélníkového průřezu

$$J' = J \cdot \cos^2 \alpha \quad [mm^4] \quad (7)$$

kde:

- J' - kvadratický moment průřezu natočený o úhel α
- J - kvadratický moment průřezu
- α - úhel natočení

Vypočítané kvadratické momenty průřezů v daném řezu byly přepočítány pomocí Steinerovy věty (8) k těžišti stojiny.

$$J_T = J + A \cdot x_T^2 \quad [mm^4] \quad (8)$$

kde:

- J_T - přepočítaný kvadratický moment průřezu
- J - kvadratický moment průřezu
- A - plocha
- x_T - vzdálenost

V příloze 12 jsou popsány mezivýpočty pro zjištění celkového modulu pružnosti v tahu E na nosníkovém MKP modelu. Výsledné hodnoty kvadratických momentů průřezů J_X a J_Y byly sečteny z dílčích hodnot jednotlivých částí konstrukce dle vztahu (9). Následně se hodnoty dle vztahu (10) vynásobily příslušným modulem pružnosti v tahu pro výpočet ohybových tuhostí a sečteny.

$$\sum J = J_{HP} + J_{DP} + J_S + J_{ZN} \quad [mm^4] \quad (9)$$

kde:

- J - kvadratický moment průřezu
- J_{HP} - kvadratický moment průřezu horní pásnice
- J_{DP} - kvadratický moment průřezu dolní pásnice
- J_S - kvadratický moment průřezu stojiny
- J_{ZN} - kvadratický moment průřezu zadního nosníku

$$J \cdot E = \sum J_i \cdot E_i \quad [MPa \cdot mm^4] \quad (10)$$

kde:

- J - kvadratický moment průřezu
- E - modul pružnosti v tahu
- J_i - kvadratický moment průřezu v daném řezu
- E_i - modul pružnosti v tahu v daném řezu

Pro jednotlivé části modelu byly vypočteny plochy průřezů, které se použily do vztahu (11) pro výpočet plošných tuhostí.

$$A \cdot E = \sum A_i \cdot E_i \quad [MPa \cdot mm^2] \quad (11)$$

kde:

- A - plocha průřezu
- E - modul pružnosti v tahu
- A_i - plocha průřezu v daném řezu
- E_i - modul pružnosti v tahu v daném řezu

Stanovení celkového modulu pružnosti v tahu pro první konfiguraci vzešlo z průměru dílčích hodnot modulu pružnosti v tahu. Jedny hodnoty byly získány z ohybových tuhostí, kdy celková ohybová tuhost v daném řezu byla podělena součtem kvadratických momentů průřezů. Kompletně pro všechny řezy pravého křídla byly doplněny o dvojici hodnot z řezu levého křídla. Druhé hodnoty se získaly z plošných tuhostí, kdy celková plošná tuhost v daném řezu byla podělena součtem ploch průřezů. Výpočet byl také proveden

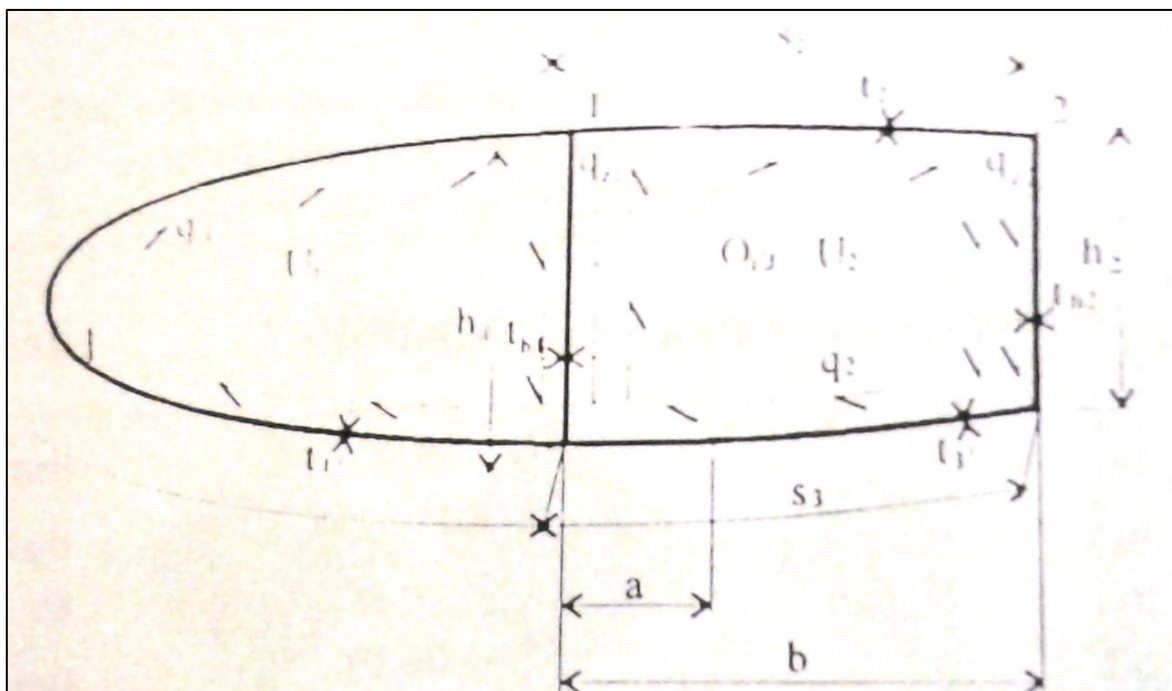
pro všechny řezy pravého křídla doplněné o hodnotu z řezu levého křídla. Celkový modul pružnosti v tahu vyšel $E = 77\,880\text{ MPa}$.

V daných řezech byly následně zpětným dopočtem určeny hodnoty kvadratických momentů průřezů J_x, J_y a plochy průřezu A popsané v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 – Hodnoty kvadratických momentů průřezů a plochy průřezů pro modul pružnosti v tahu $E = 77\,880\text{ MPa}$

Řez	Poloha	Pravé křídlo			Levé křídlo		
i	z	J_x	J_y	A	J_x	J_y	A
[–]	[m]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ²]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ²]
1	0	1,96E+07	3,38E+06	6985,03	1,96E+07	3,38E+06	6985,03
2	0,8715	1,42E+07	4,99E+06	4435,06	1,72E+07	7,87E+06	5283,12
3	1,743	1,04E+07	3,77E+06	3428,24	1,04E+07	3,77E+06	3428,24
4	2,6145	7,20E+06	2,71E+06	2539,27	7,20E+06	2,71E+06	2539,27
5	3,486	4,05E+06	1,75E+06	1536,51	4,05E+06	1,75E+06	1536,51
6	4,3575	2,06E+06	1,78E+05	886,13	2,06E+06	1,78E+05	886,13
7	5,229	1,08E+06	7,93E+04	591,80	1,08E+06	7,93E+04	591,80
8	6,1005	7,25E+05	5,46E+04	524,02	7,25E+05	5,46E+04	524,02
9	6,972	6,33E+05	4,02E+04	552,69	6,33E+05	4,02E+04	552,69
10	7,8435	4,97E+05	1,32E+05	657,02	4,97E+05	1,32E+05	657,02

Následně byl proveden výpočet polohy elastické osy redukovaného nosníkové MKP modelu. Na obrázku 5.2 je vyobrazený řez konstrukcí křídla se zakótovanými hodnotami, které jsou pro dané řezy uvedeny v příloze 13. Poloha ohybově elastické osy je dána poměrem ohybových tuhostí nosníků. Výpočet byl proveden dle vztahu (12). Výsledky polohy elastické osy nosníkového MKP modelu jsou uvedeny v tabulce 5.2 [10].



Obrázek 5.2 – Řez konstrukcí se zakótovanými hodnotami pro výpočet polohy elastické osy

$$a = b \cdot \frac{E_2 \cdot J_2}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2} \quad [mm] \quad (12)$$

kde:

- E_1 - modul pružnosti v tahu předního nosníku
- E_2 - modul pružnosti v tahu zadního nosníku
- J_1 - kvadratický moment průřezu předního nosníku
- J_2 - kvadratický moment průřezu zadního nosníku

Tabulka 5.2 – Výsledná poloha elastické osy nosníkového MKP modelu

Řez	Poloha	Poloha elastické osy
i	z	a
$[-]$	$[m]$	$[mm]$
1	0	0
2	0,8715	1,13
3	1,743	1,18
4	2,6145	1,41
5	3,486	1,87
6	4,3575	0,28
7	5,229	0,34
8	6,1005	0,28
9	6,972	0,17
10	7,8435	0
11	8,715	0

Dále bylo potřebné vypočítat momenty tuhosti J_K nosníkového MKP modelu. Mezivýpočty jsou uvedeny v příloze 14. Nejdříve byl podle vztahu (13) spočítán modul pružnosti ve smyku G při hodnotě poissonova čísla $\mu = 0,3$. Výsledná hodnota modulu pružnosti ve smyku vyšla $G = 29\,954\text{ MPa}$. Následoval výpočet momentu tuhosti dutin podrobného MKP modelu. Jednalo se o krut tenkostěnného uzavřeného profilu popsáno vztahem (14). V něm vystupovaly hodnoty U , což je plocha dutiny (přední a zadní) v daném řezu, křivkový integrál po ploše délky dutiny ds (v příloze 11), podělený redukovanou tloušťkou t_{red} . Výpočet redukované tloušťky byl proveden dle již zmíněného vztahu (4) s ohledem na jednotlivá vrstvení (přílohách 1, 2, 4 a 5) pro potah křídla. Jak již bylo zmíněno, herex nebyl ve výpočtech uvažován. Pro kompletní výpočet momentů tuhostí šlo o nutnost stanovit hodnoty i pro jednotlivé části konstrukce. Zde se využilo vztahu (15), ve kterém vystupují hodnoty obdélníkových rozměrů průřezů (obrázek 5.3) a koeficient k , který byl určený z poměru délek stran. Hodnoty koeficientu jsou popsány v tabulce 5.3, kdy hodnoty poměru délek stran vycházející v daném intervalu, byly aproximovány [10].

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad [MPa] \quad (13)$$

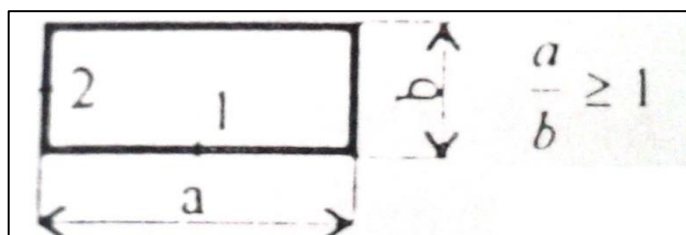
kde:

- G - modul pružnosti ve smyku
 E - modul pružnosti v tahu
 μ - poissonovo číslo

$$J_K = \frac{4 \cdot U}{\oint \frac{ds}{t_{red}}} \quad [mm^4] \quad (14)$$

kde:

- J_K - moment tuhosti
 U - plocha dutiny
 ds - délka dutiny
 t_{red} - redukovaná tloušťka potahu



Obrázek 5.3 – Rozměry průřezů při výpočtu momentu tuhosti

$$J_K = k \cdot b \cdot h^3 \quad [mm^4] \quad (15)$$

kde:

- J_K - moment tuhosti
 k - koeficient k
 b - šířka obdélníkového průřezu
 h - délka obdélníkového průřezu

Tabulka 5.3 – Hodnoty koeficientu k

a/b	1,0	1,2	1,5	1,75	2,0	2,5	3,0
k	0,141	0,166	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263
a/b	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	∞	
k	0,281	0,291	0,299	0,370	0,312	0,333	

Výsledné hodnoty momentů tuhosti J_k byly sečteny z dílčích hodnot jednotlivých částí konstrukce dle vztahu (16). Následně se hodnoty vynásobily příslušným modulem pružnosti ve smyku pro výpočet smykových tuhostí (příloha 10) a sečteny dle vztahu (17). V daných řezech byly následně zpětným dopočtem určeny hodnoty momentů tuhosti J_k popsané v tabulce 5.4 [10].

$$\sum J_K = J_{K_{PD}} + J_{K_{ZD}} + J_{K_{HP}} + J_{K_{DP}} + J_{K_S} + J_{K_{ZN}} \quad [mm^4] \quad (16)$$

kde:

- J_K - moment tuhosti
 $J_{K_{PD}}$ - moment tuhosti přední dutiny

- $J_{K_{ZD}}$ - moment tuhosti zadní dutiny
 $J_{K_{HP}}$ - moment tuhosti horní pásnice
 $J_{K_{DP}}$ - moment tuhosti dolní pásnice
 J_{K_S} - moment tuhosti stojiny
 $J_{K_{ZN}}$ - moment tuhosti zadního nosníku

$$J_K \cdot G = \sum J_{K_i} \cdot G_i \quad [MPa \cdot mm^4] \quad (17)$$

kde:

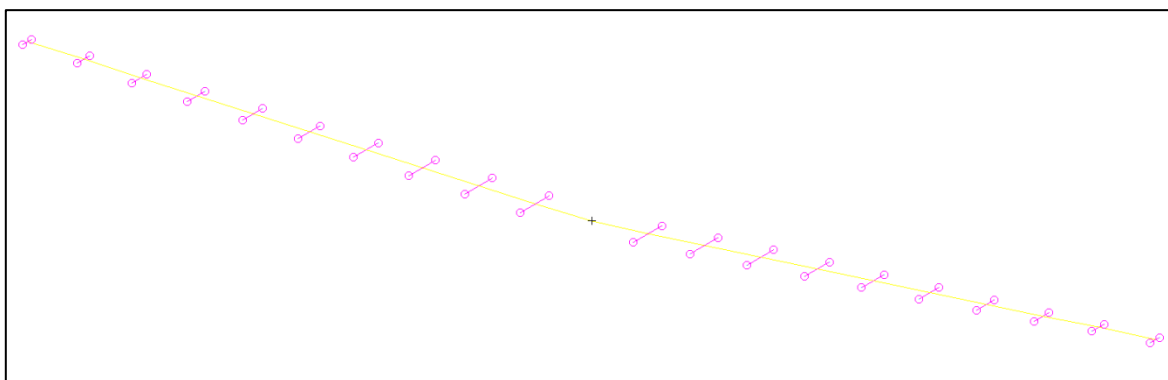
- J_K - moment tuhosti
 G - modul pružnosti ve smyku
 J_{K_i} - moment tuhosti v daném řezu
 G_i - modul pružnosti ve smyku v daném řezu

Tabulka 5.4 – Hodnoty momentů tuhosti pro modul pružnosti ve smyku $G = 29\,954$ MPa

Řez	Poloha	Pravé křídlo	Levé křídlo
i	z	J_x	J_x
$[-]$	$[m]$	$[mm^4]$	$[mm^4]$
1	0	7,28E+05	7,28E+05
2	0,8715	4,40E+05	4,82E+05
3	1,743	2,40E+05	2,40E+05
4	2,6145	1,19E+05	1,19E+05
5	3,486	4,20E+04	4,20E+04
6	4,3575	1,59E+04	1,59E+04
7	5,229	9,62E+03	9,62E+03
8	6,1005	7,95E+03	7,95E+03
9	6,972	1,07E+04	1,07E+04
10	7,8435	5,22E+03	5,22E+03

5.2 STRUKTUÁLNÍ NOSNÍKOVÝ MODEL

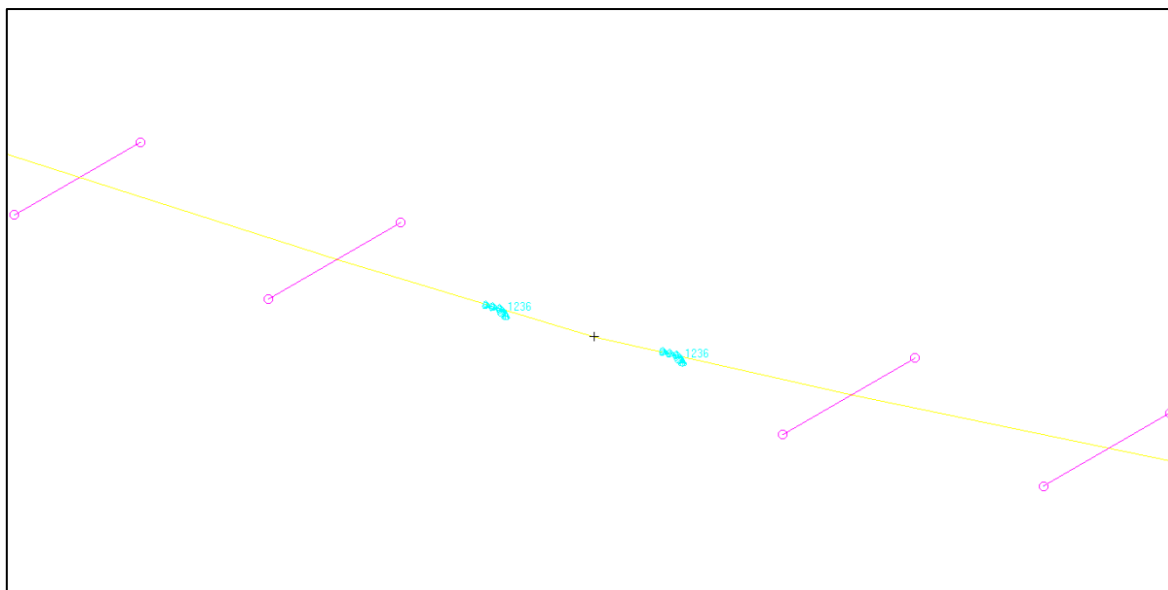
Vytváření strukturálního modelu probíhalo v preprocesoru MSC.PATRAN 2013, kde se vycházelo z rozměrů podrobného MKP modelu. Model byl tvořen pomocí nosníkových elementů Bar, kterým se zadaly vlastnosti vypočítané při redukci v předchozí kapitole. Pro lepší vizualizaci modální analýzy se v řezech vytvořily nosníkové elementy představující žebra. Propojení bylo realizováno pomocí MPC prvků typu RBE2. Vyobrazený model nosníkového MKP modelu je na obrázku 5.4.



Obrázek 5.4 – Nosníkový MKP model

5.3 OKRAJOVÉ PODMÍNKY

V okrajových podmínkách křídla se vymezil translační pohyb a rotační pohyb kolem osy Z v bodech, v místě kořenových žebel. Jedná se o místa spojení křídla s trupem. Okrajové podmínky nosníkového MKP modelu jsou vyobrazeny na obrázku 5.5.



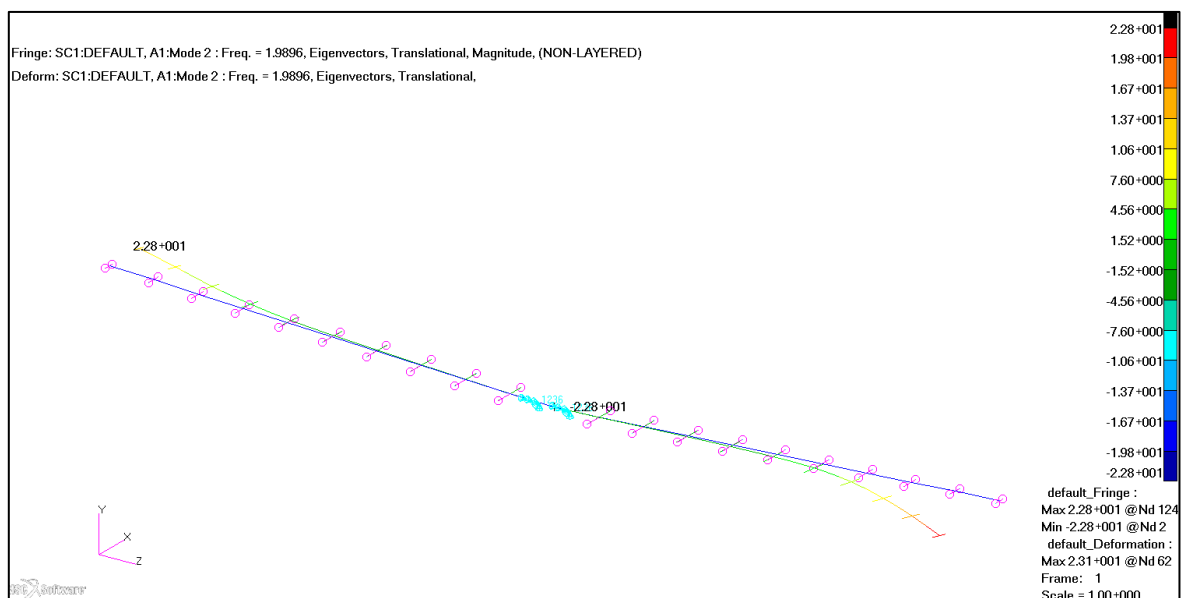
Obrázek 5.5 – Okrajové podmínky nosníkového MKP modelu

5.4 MODÁLNÍ ANALÝZA

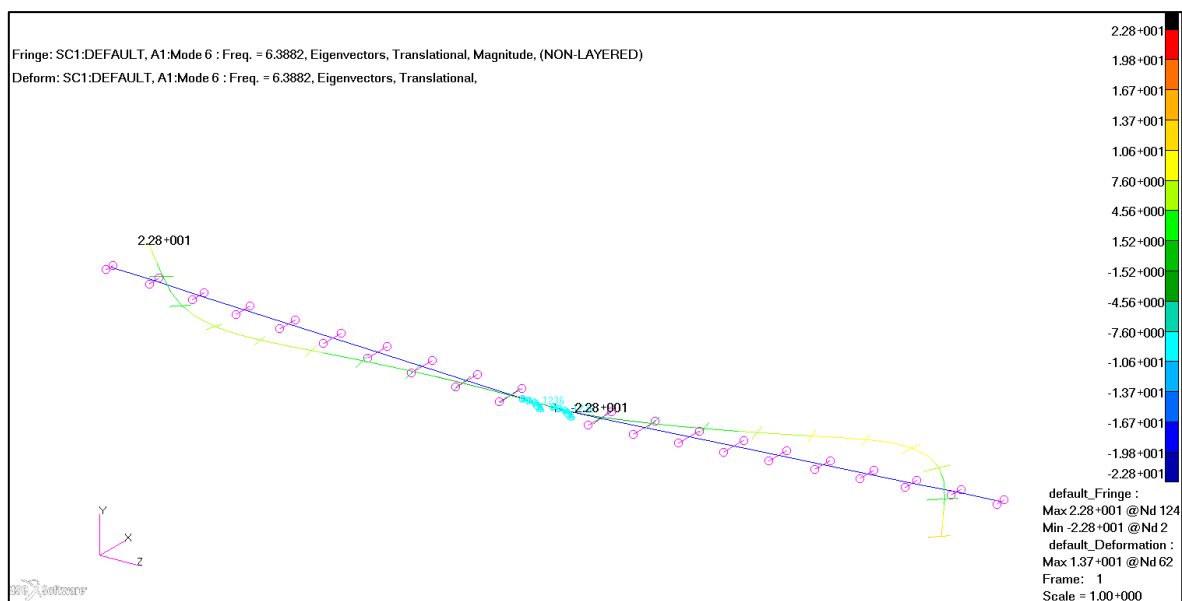
Na nosníkovém strukturálním MKP modelu křídla byla provedena modální analýza za účelem získání vlastních frekvencí a tvarů kmitání. Model zahrnoval jak tuhostní tak hmotovou podobnost se skutečnou konstrukcí. Výsledná hmotnost křídla byla 86,2 kg odečtená z programu MSC.PATRAN. K modální analýze byl aplikovaný řešič SOL103 „NORMAL MODES“. Pro získání výsledků z redukované pohybové rovnice byl použit Lanczosuv algoritmus. Hledané frekvence byly vyhodnoceny v rozsahu 0 – 100 Hz. Část výsledků modální analýzy jsou popsány v tabulce 5.5 a graficky vyobrazeny na obrázcích 5.6 až 5.9. Kompletní výsledky s grafickým vyobrazením jsou uvedeny v příloze 15. Při výpočtu nebyla zahrnuta mechanizace křídla a systém řízení.

Tabulka 5.5 – Část výsledků modální analýzy nosníkového MKP modelu

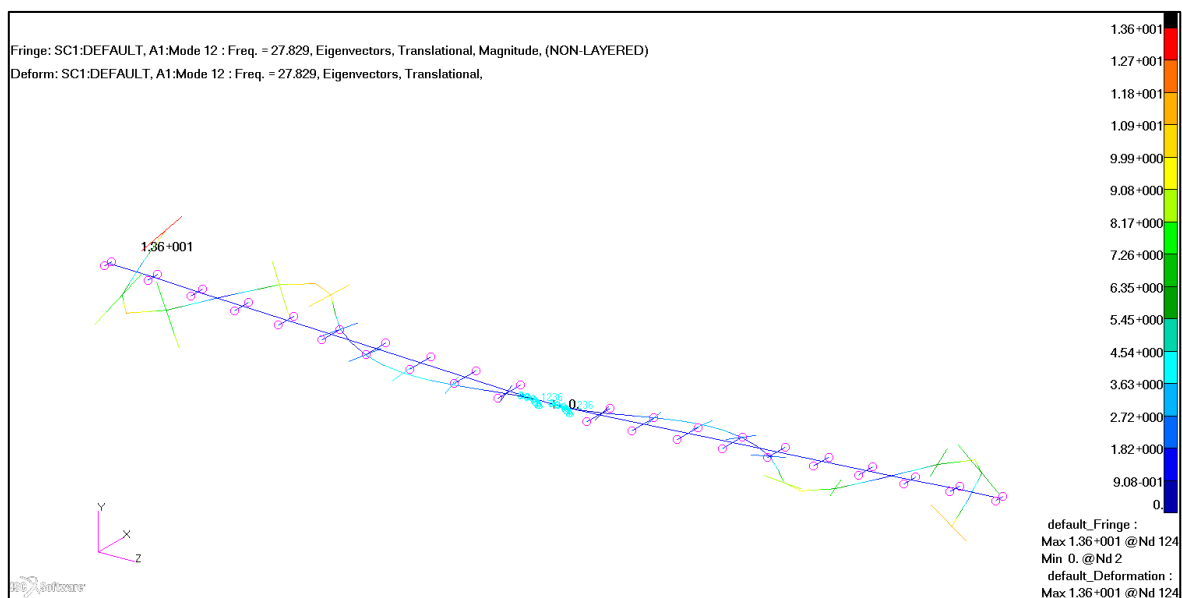
Mód	Popis tvaru	Vlastní frekvence
		[Hz]
2	Symetrický ohyb v podélném směru.	1,9896
6	Symetrický ohyb v podélném směru.	6,3882
12	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru pravého křídla doprovázený krutem.	27,829
22	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.	94,94



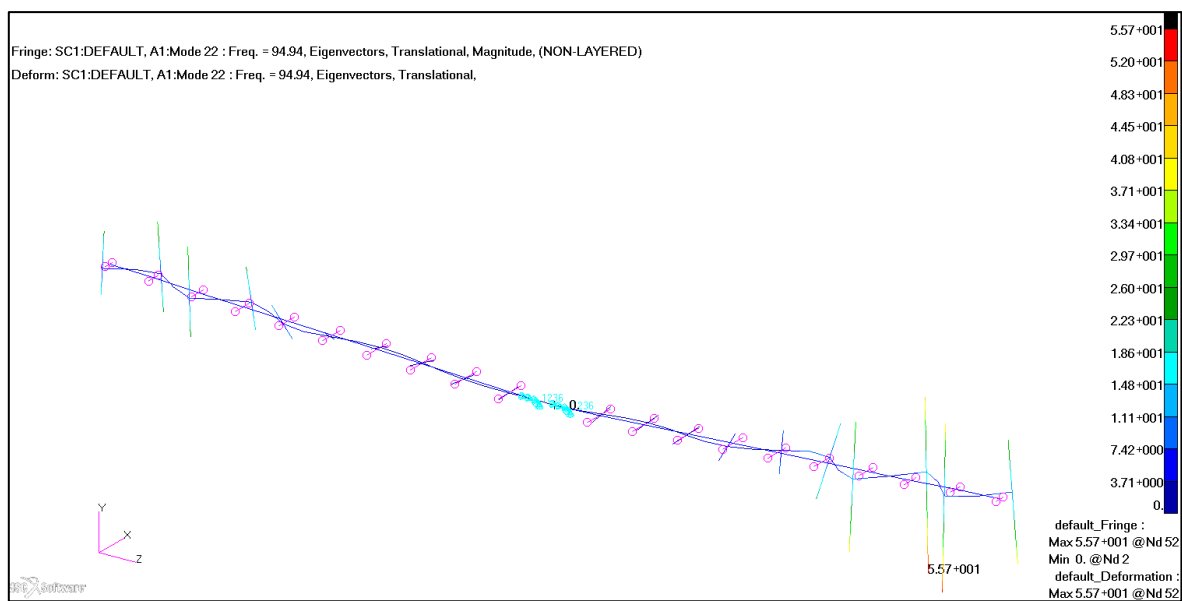
Obrázek 5.6 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 1,9896 Hz



Obrázek 5.7 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 6,3882 Hz



Obrázek 5.8 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 27,829 Hz



Obrázek 5.9 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 94,94 Hz

5.5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ PRVNÍ KONFIGURACE

V tabulce 5.6 je uvedeno porovnání modální analýzy podrobného MKP modelu a nosníkového MKP modelu. U obou metod byla dodržena tuhostní a hmotová podobnost se skutečnou konstrukcí křídla. Zhodnocení rozdílu nepodobnosti modelů vedlo k úvaze pro naladění druhé konfigurace modální analýzy nosníkového MKP modelu.

Tabulka 5.6 – Porovnání výsledků modálních analýz

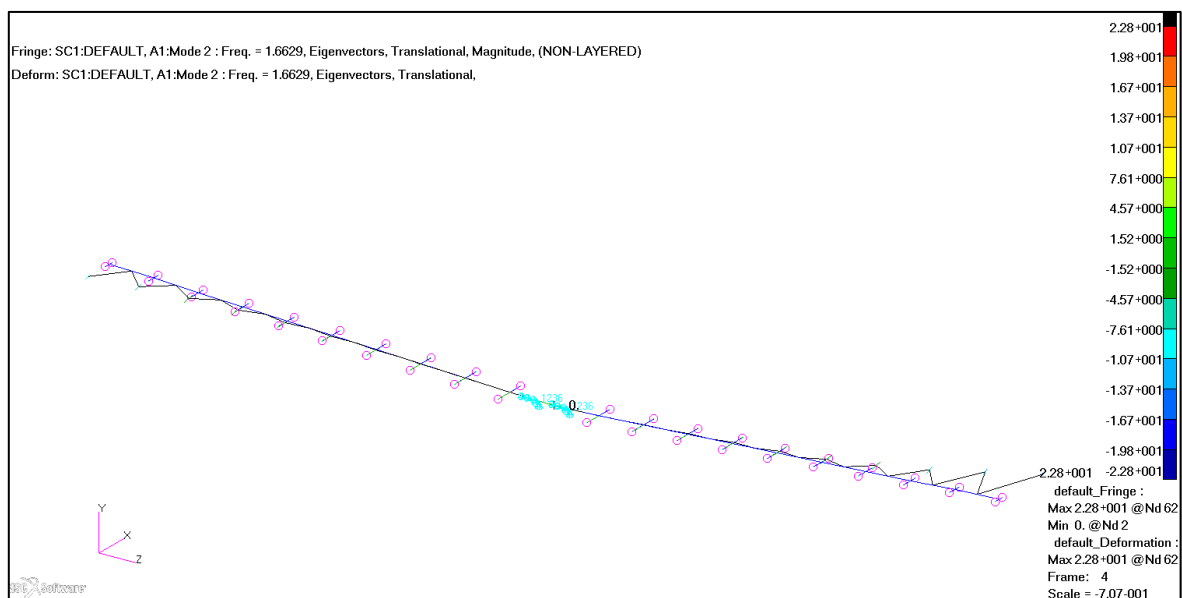
Podrobný MKP model		Nosníkový MKP model první konfigurace		Rozdíl
Mód	Vlastní frekvence	Mód	Vlastní frekvence	
	[Hz]		[Hz]	[%]
1	3,0281	2	1,9896	52,2
7	12,616	6	6,3882	97,5
19	52,611	12	27,829	89
38	99,947	22	94,94	5,3

6 LADĚNÍ NOSNÍKOVÉHO MKP MODELU

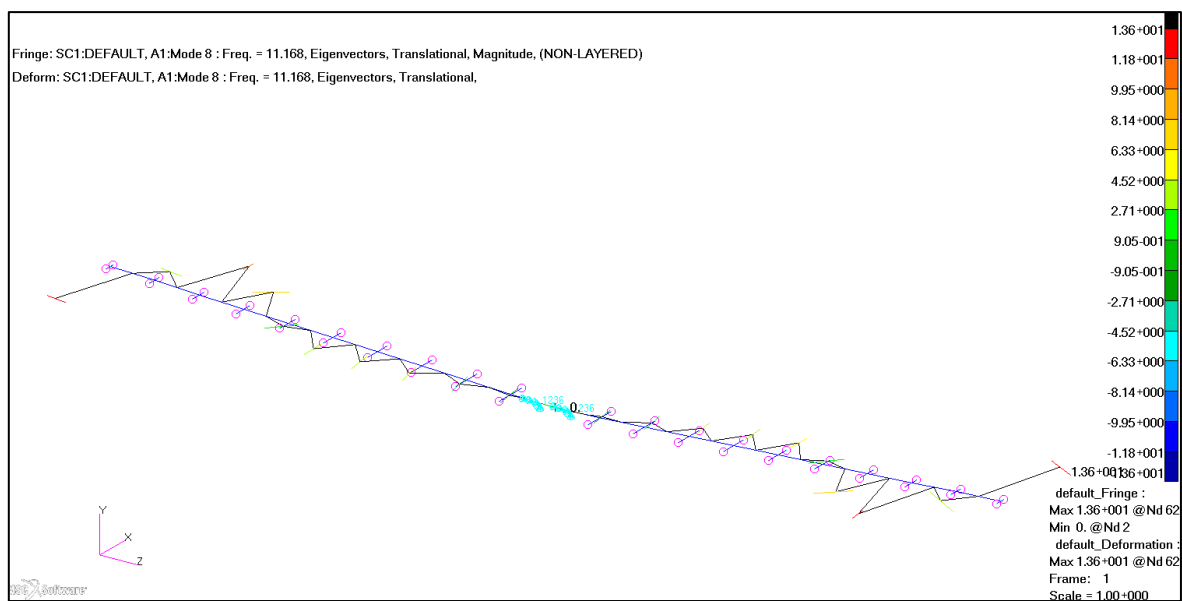
Nosníkový model pro druhou konfiguraci byl zejména změněn v hodnotě modulu pružnosti v tahu na $E = 45\,000\text{ MPa}$. Následně byla provedla modální analýza dle již zmiňovaných podmínek. Část výsledků modální analýzy nosníkového MKP modelu druhé konfigurace jsou popsány v tabulce 6.1 a grafické vyobrazení na obrázcích 6.1 až 6.4. Kompletní výsledky s grafickým vyobrazením jsou uvedeny v příloze 16.

Tabulka 6.1 – Část výsledků modální analýzy nosníkového MKP modelu pro modul pružnosti v tahu $E = 45\,000\text{ MPa}$

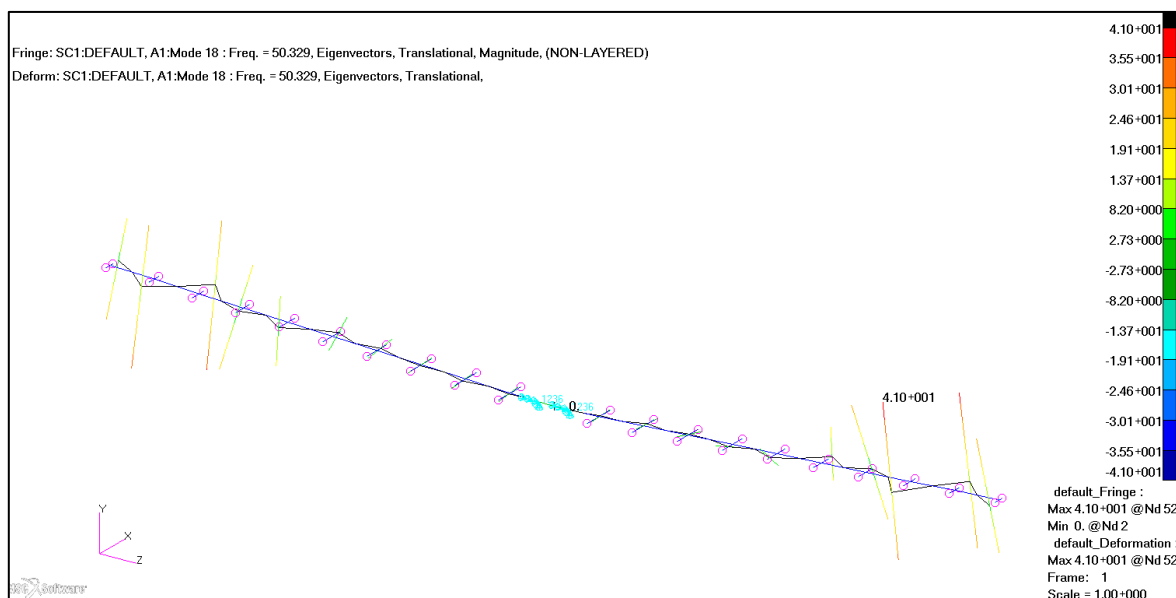
Mód	Popis tvaru	Vlastní frekvence
		[Hz]
2	Symetrický ohyb v podélném směru.	1,6629
8	Symetrický ohyb v podélném směru.	11,168
18	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru pravého křídla doprovázený krutem.	50,329
26	Symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.	95,658



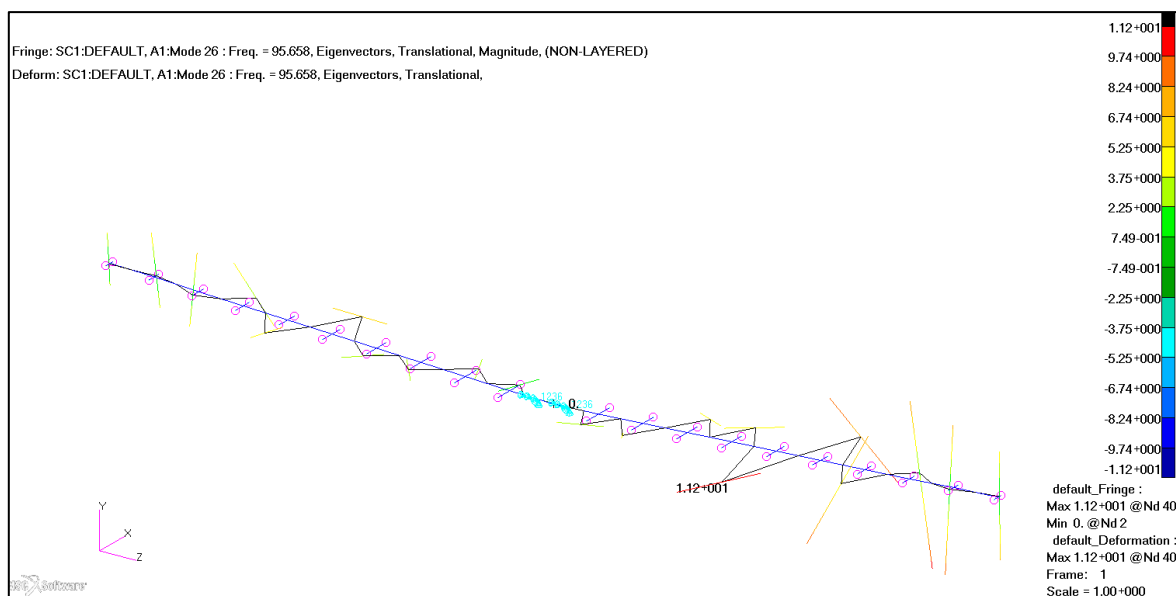
Obrázek 6.1 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 1,6629 Hz



Obrázek 6.2 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 11,168 Hz



Obrázek 6.3 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 50,329 Hz



Obrázek 6.4 – Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence a tvaru kmitání pro 95,658 Hz

6.1 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ DRUHÉ KONFIGURACE

Porovnání modální analýzy podrobného a nosníkového MKP modelu je popsáno v tabulce 6.2. U obou metod byla dodržena tuhostní a hmotová podobnost se skutečnou konstrukcí křídla.

Tabulka 6.2 – Porovnání výsledků modálních analýz

Podrobný MKP model		Nosníkový MKP model první konfigurace		Rozdíl	Nosníkový MKP model druhé konfigurace		Rozdíl
Mód	Vlastní frekvence [Hz]	Mód	Vlastní frekvence [Hz]		Mód	Vlastní frekvence [Hz]	
1	3,0281	2	1,9896	52,2	2	1,6629	82,1
7	12,616	6	6,3882	97,5	8	11,168	13
19	52,611	12	27,829	89	18	50,329	4,5
38	99,947	22	94,94	5,3	26	95,658	4,5

7 ZÁVĚR

Zadáním diplomové práce bylo zpracování modální analýzy na křídle větroně Glasflügel 304 CZ-17 za účelem zjištění vlastních frekvencí a tvarů kmitání. Práce byla rozdělena do několika částí. Nejdříve byly prováděny modální analýzy na tuhostně a hmotově podobném kompletním modelu křídla, poté na redukovaných nosníkových modelech. Vlivem nedostatku podkladů nebo zanedbáním vrstvení některých míst modelů vyšly vlastní frekvence a tvary kmitání rozdílné oproti skutečnosti. Často se vyskytoval ohyb v podélném směru způsobený nedostatečnou tuhostí žeber. Tyto chyby se dále kopírovaly při přepočtu (redukci) na nosníkový MKP model. Přepočet se prováděl pomocí ohybových, plošných a smykových tuhostí, ze kterých se vypočítaly hodnoty ploch průřezů A , kvadratických momentů J_X a J_Y , momenty tuhostí J_K , moduly pružnosti v ohybu E a ve smyku G , v poslední řadě hustota ρ . V daných řezech nosníkového MKP modelu byly zadávány příslušné vypočítané hodnoty pro zajištění tuhostní a hmotové podobnosti. Modální analýza první konfigurace nosníkového MKP modelu se lišila o 50 % oproti podrobnému MKP modelu. V druhé konfiguraci byla změněna hodnota modulu pružnosti v tahu E a výsledné hodnoty modální analýzy se výrazněji přiblížily. Rozdíl byl 8 %. Pro modální analýzu nebyla z důvodu neposkytnutí údajů zahrnuta mechanizace a systém řízení křídla.

8 SEZNAM LITERATURY

- [1] NIU,C.Y.M., Composite Airframe Structure, Hong Kong Conmilit Press Ltd., Brno, 2005, 664 stran
- [2] MIDDLETON, D. H., Composite Material in Aircraft Structure, Longman Singapore PublisherLtd., 1990, 379 stran
- [3] MSC.Software Corporation: MSC/Nastran 2013 Linear Static Analysis, MSC.Software Corporation, Santa Ana, 2013
- [4] R&G Faserverbundwerkstoffe. [Online] <http://www.r-g.de/>.
- [5] HpH Sailplanes [Online] <http://www.hph.cz/>.
- [6] VEJVODA, L.: Bezmotorová letadla v Československu 1918 – 1939, Svět křídel, 174. publikace, Cheb, 2009, 303 stran
- [7] VEJVODA, L., Plachý, J.: Větroně v Československu a České republice od r. 1945, Svět křídel, Cheb, 2009, 273 stran
- [8] ŽOLDÁK, M.: Diplomová práce- Modální analýza a flutterové vlastnosti křídla, ČVUT FS, 2009
- [9] MSC.Software Corporation: MSC/Nastran 2001 Numerical Methods Users Guide, MSC.Software Corporation, Santa Ana, 2001
- [10] ČTVERÁK, J, MERTL, V, PÍŠTĚK. A.: Soubor podkladů pro pevnostní výpočty leteckých konstrukcí, Letecký ústav VUT-FSI, Brno, 1997
- [11] JURAČKA, J.: Kompozitní konstrukce v letectví, Letecký ústav VUT v Brně, 2007

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	[°]	Úhel natočení
λ	[Hz]	Vlastní frekvence
μ	[–]	Poissonovo číslo
A	[mm ²]	Plocha
A_i	[mm ²]	Plocha v daném řezu
b	[mm]	Šířka obdélníkového průřezu
b_r	[–]	Parametr rozkladu
ds	[mm]	Délka dutiny
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
E_1	[MPa]	Modul pružnosti v tahu předního nosníku
E_2	[MPa]	Modul pružnosti v tahu zadního nosníku
E_f	[–]	Počet vlastních frekvencí
E_i	[MPa]	Modul pružnosti v tahu v daném řezu
E_j	[MPa]	Modul pružnosti v tahu pro jednotlivé vrstvy
E_{ref}	[MPa]	Referenční modul pružnosti v tahu
G	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku
G_i	[MPa]	Modul pružnosti ve smyku v daném řezu
h	[mm]	Výška obdélníkového průřezu
i	[–]	Řez
k	[–]	Koeficient
J'	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu natočený o úhel α
J	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu
J_1	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu předního nosníku
J_2	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu osy zadního nosníku
$J_{1(X)}$	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu osy 1 (osy X)
$J_{2(Y)}$	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu osy 2 (osy Y)
J_{DP}	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu dolní pásnice
J_{HP}	[mm ⁴]	Kvadratický moment průřezu horní pásnice

J_i	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu v daném řezu
J_K	$[mm^4]$	Moment tuhosti
$J_{K_{DP}}$	$[mm^4]$	Moment tuhosti dolní pásnice
$J_{K_{HP}}$	$[mm^4]$	Moment tuhosti horní pásnice
J_{K_i}	$[mm^4]$	Moment tuhosti v daném řezu
$J_{K_{PD}}$	$[mm^4]$	Moment tuhosti přední dutiny
J_{K_S}	$[mm^4]$	Moment tuhosti stojiny
$J_{K_{ZD}}$	$[mm^4]$	Moment tuhosti zadní dutiny
$J_{K_{ZN}}$	$[mm^4]$	Moment tuhosti zadního nosníku
J_S	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu stojiny
J_T	$[mm^4]$	Přepočítaný kvadratický moment průřezu
J_{ZN}	$[mm^4]$	Kvadratický moment průřezu zadního nosníku
$[K]$	$[-]$	Matice tuhosti
$[K_d]$	$[-]$	Diferenciální tuhost
$[M]$	$[-]$	Matice hmotnosti
n	$[-]$	Počet rovnic
S	$[mm^2]$	Plocha průřezů rovingů
t_j	$[mm]$	Tloušťka jednotlivé vrstvy
t_{red}	$[mm]$	Redukovaná tloušťka potahu
t_{red_i}	$[mm]$	Redukovaná tloušťka pro daný počet vrstev
U	$[mm^2]$	Plocha dutiny
x	$[-]$	Vektor vlastních kmitů
x_T	$[mm]$	Vzdálenost
z	$[m]$	Rozpětí křídla

10 SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1: Vrstvení horní skořepiny křídla

PŘÍLOHA 2: Vrstvení dolní skořepiny křídla

PŘÍLOHA 3: Tažení rovingů

PŘÍLOHA 4: Vrstvení pravého krakorce

PŘÍLOHA 5: Vrstvení levého krakorce

PŘÍLOHA 6: Vrstvení nadstavce

PŘÍLOHA 7: Výpočet tažení rovingu pro pravé křídlo

PŘÍLOHA 8: Výpočet tažení rovingu pro levé křídlo

PŘÍLOHA 9: Výpočet tažení rovingu pro nadstavec

PŘÍLOHA 10: Použité materiály a jejich vlastnosti

PŘÍLOHA 11: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro podrobný MKP model křídla

PŘÍLOHA 11: Kompletní hodnoty rozměrů odečtené z podrobného MKP modelu

PŘÍLOHA 12: Mezivýpočty modulu pružnosti v tahu

PŘÍLOHA 13: Výpočet polohy elastické osy

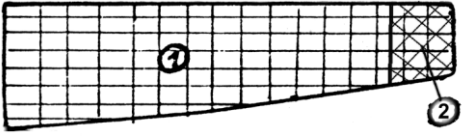
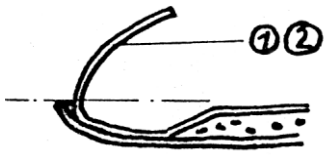
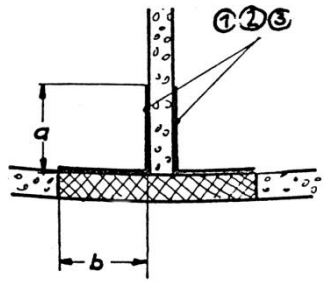
PŘÍLOHA 14: Mezivýpočty modulu pružnosti ve smyku

PŘÍLOHA 15: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro nosníkový MKP model křídla

PŘÍLOHA 16: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro nosníkový MKP model křídla druhé konfigurace

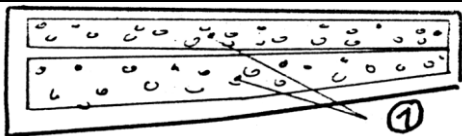
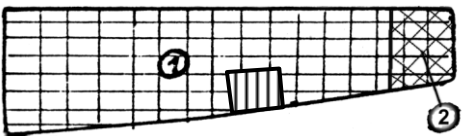
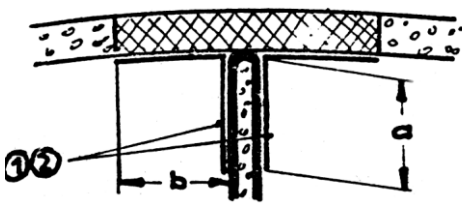
PŘÍLOHA 1: Vrstvení horní skořepiny křídla

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
1	1 1x 92145 ✕ 2 1x 92145 ✕ 3 1x 92145 ✕ odstupňovat šířku 300, 250 a 200 mm od žebra (od kraje o 50 mm širší)
2	1 1 páska 92150 ✕ šíře 50 mm 2 1 pruh 92110 ✕ šíře 200 mm u kořene, 80 mm na konci 3 1x páska 92150 ✕ šíře 50 mm u křidélek 4 1x pás 92125 ✕ přes závěsy vztlakových klapek, šíře 160 mm, 60 mm od odtokové hrany 5 4x páska 92125 ✕ odstupňovaná od kraje 120 až 70 mm
3	1 po 2 páskách 92150 ✕ šíře 100 mm přes závěsy vztlakových klapek 2 1x pás 92125 ✕ šíře 180 mm, 40 mm od odtokové hrany 3 2x páska 92125 ✕ šíře 300, 250 mm od konce
4	1 pěna Conticell 60, tloušťky 8 mm, 30 mm od náběžné hrany

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar	
5	Položit rovingy podle plánu tažení rovingů.	
6	1 1x 92110  vnitřní tkanina 2 1x pás 92125  šíře 300 mm	
7	Přelepení náběžné hrany 1 2x pás 92125  šíře 90 mm 2 1x pás 92110  šíře 90 mm	
8	Usadit kořenové žebro. Usadit koncové žebro.	
9	Zakoutování stojiny 1 od kořene žebra do Y=7,2 m; po 1x vrstvě 92140  2 od kořene žebra do Y=5,2 m; po 1x vrstvě 92140  3 od kořene žebra do Y=3,2 m; po 1x vrstvě 92140 	 do Y=4m : a= b= 30 mm od Y=4m po Y=7,2m : a= b= 25 mm

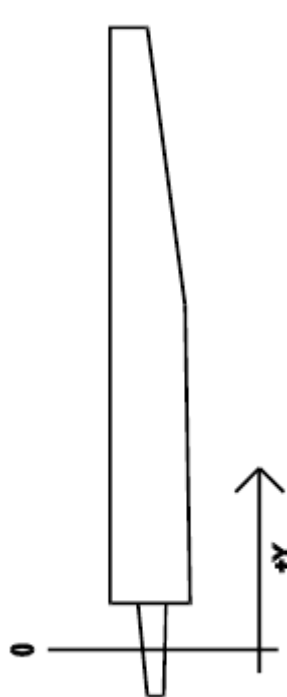
PŘÍLOHA 2: Vrstvení dolní skořepiny křídla

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar	
1	1 1x 92145 ✕ 2 1x 92145 ✕ 3 1x 92145 ✕ odstupňovat šířku 300, 250 a 200 mm od žebra (od kraje o 50 mm širší)	
2	1 1 páska 92150 ✕ šíře 50 mm 2 1 pruh 92110 ✕ šíře 200 mm u kořene, 80 mm na konci 3 1x páska 92150 ✕ šíře 100 mm u křidélek, 50 mm u křidélek 4 4x páska 92125 ✕ odstupňovaná od kraje 120 až 70 mm	
3	1 po 2 páskách 92150 ✕ šíře 100 mm přes závěsy vztakových klapek 3 1x pásek 92145 ✕ kolem náhonu křidélek 250 x 300 mm	
4	1 po 2 páskách 92150 ✕ šíře 100 mm přes závěsy vztakových klapek 2 1x pás 92125 ✕ šíře 200 mm 3 2x páska 92125 ✕ šíře 300, 250 mm od konce	

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar	
5	1 pěna Conticell 60, tloušťky 8 mm, 10 mm od lemu kořenového žebra	
6	Položit rovingy podle plánu tažení rovingů.	
7	1 1x 92110  vnitřní tkanina 2 1x pás 92125  šře 300 mm 3 1x pásek 92145  kolem náhonu křídélek 250 x 300 mm	
9	Usadit kořenové žebro. Usadit ložiskový kozlík pro brzdící klapky.	
10	Zakoutování stojiny 1 od kořene žebra do Y=7,2 m; po 1x vrstvě 92140  2 od kořene žebra do Y=5,2 m; po 1x vrstvě 92140  3 od kořene žebra do Y=3,2 m; po 1x vrstvě 92140 	 do Y=4m : a= b= 30 mm od Y=4m po Y=7,2m : a= b= 25 mm

PŘÍLOHA 3: Tažení rovingů

Provazec č.	YZAČ [m]	YKON [m]	Délka [m]
1 ÷ 12	-0,3	7,2÷7,35	7,5÷7,655
14	-0,3	5,6	5,9
16	-0,3	5,2	5,5
18	-0,3	4,8	5,1
20	-0,3	4,56	4,86
22	-0,3	4,33	4,63
24	-0,3	4,1	4,4
26	-0,3	3,9	4,2
28	-0,3	3,71	4,01
30	-0,3	3,52	3,82
32	-0,3	3,37	3,67
34	-0,3	3,22	3,52
36	-0,3	3,08	3,38
38	-0,3	2,94	3,24
40	zkracováno po 15 mm 0,18 <	2,8	3,085
42		2,66	2,93
44		2,52	2,775
46		2,38	2,62
48		2,26	2,485
50		2,14	2,35
52		2,02	2,215
54		1,9	2,08
56		1,8	1,965
58		1,7	1,85
60		1,6	1,735
62		1,5	1,62
64		1,4	1,505
66		1,34	1,43



Každý provazec se skládá z 25 dílčích rovingů Vetrotex EC 9-756-K43 (68)

Plochá tryska prosycovače (šířka 20 mm) nastavena na 73 % hmotnostního obsahu vláken.

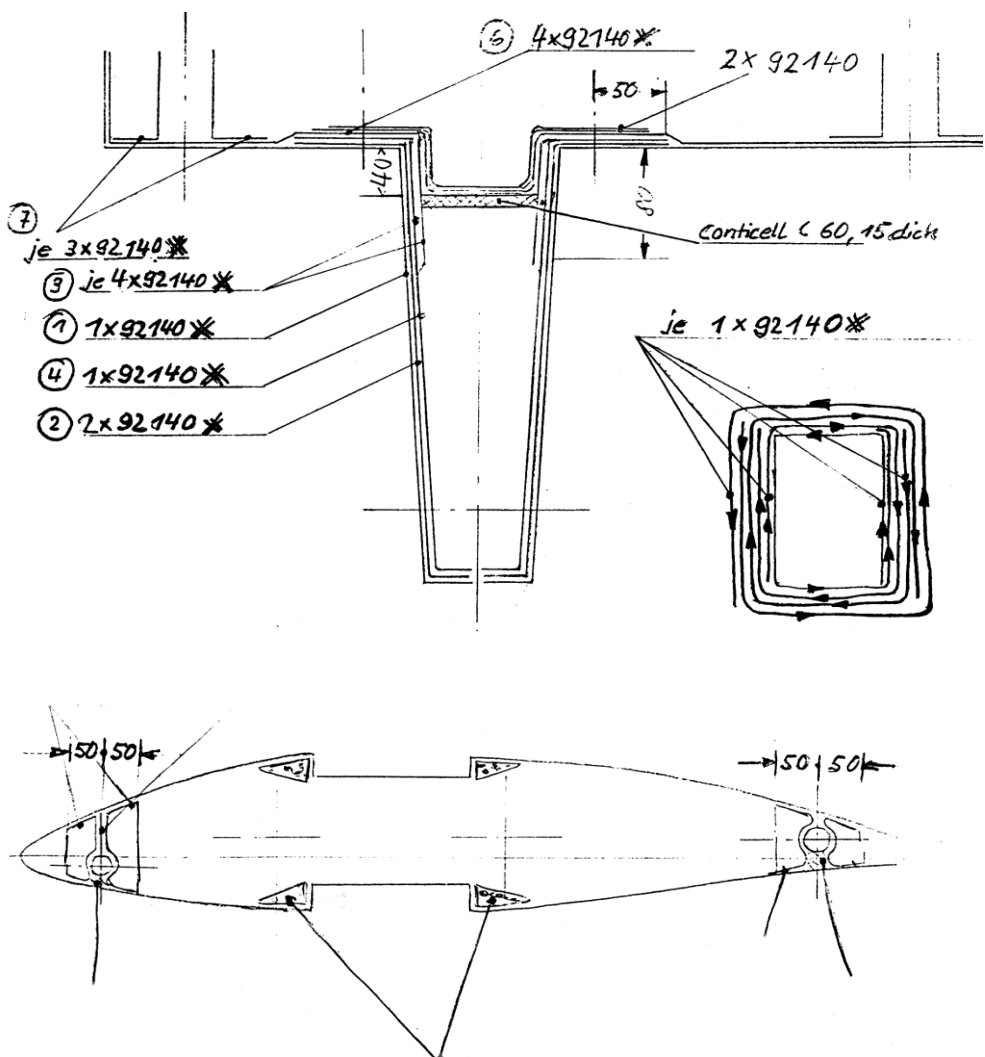
Hmotnost prosyceného provazce délky 4 m musí být od 103 do 107 g.

V tabulce jsou uvedeny provazce sudých čísel. Provazce s lichými čísly mají délku průměru délek dvou sousedních sudých provazců (výjimkou je provazec č. 13 délky 6,1 m).

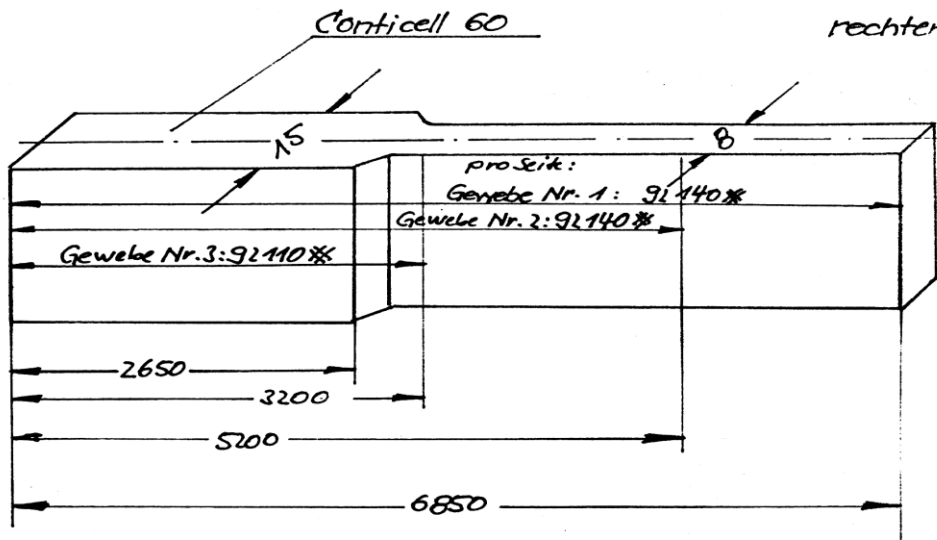
Všechny provazce jsou zakončeny šikmým stříhem pod úhlem cca 30°.

68	1,28	1,355	délka vztažena k plné šíři provazce (tj. sešikmený konec přechází).
70	1,22	1,28	
72	1,16	1,205	
74	1,1	1,13	
76	1,04	1,055	
78	0,98	0,98	
104<-----	zkracováno po 43mm na 0,42 m	zkracováno po 58mm na 0,24 m	

PŘÍLOHA 4: Vrstvení pravého krakorce

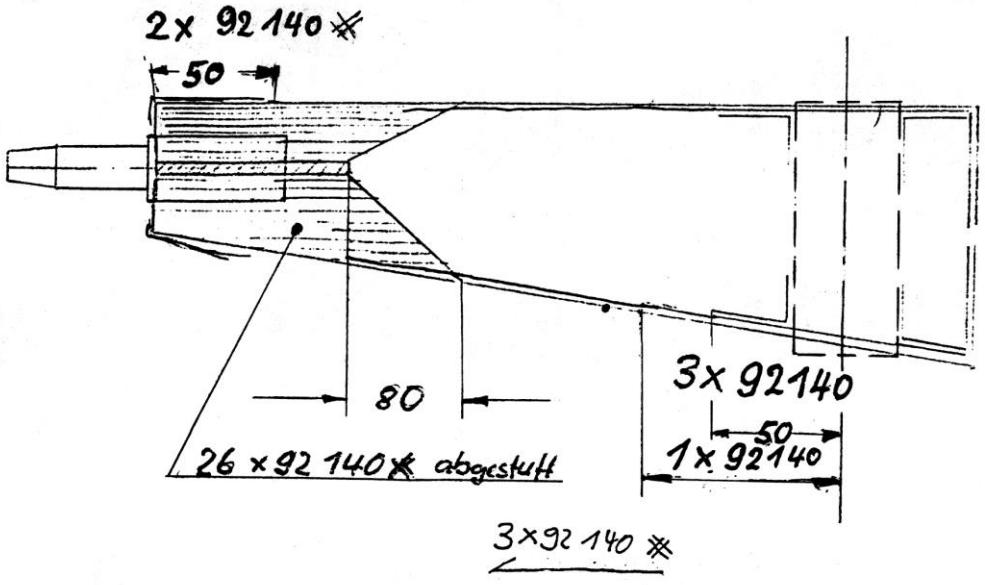
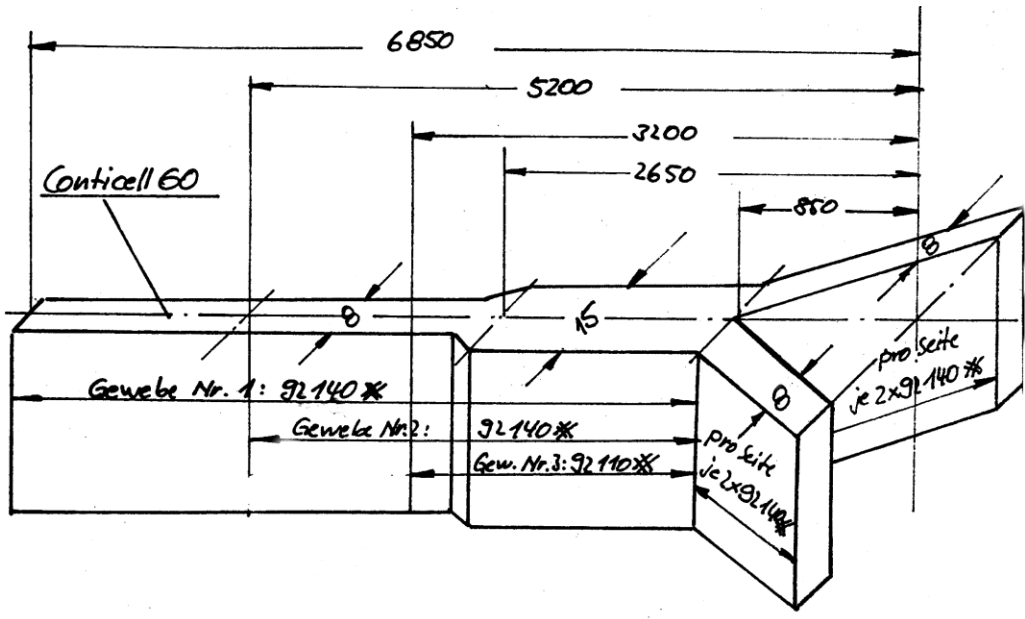
Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
1	Plán tkanin  ⑦ je 3x92140* ③ je 4x92140* ① 1x92140* ④ 1x92140* ② 2x92140* ⑤ 4x92140* 2x 92140 Conticell C 60, 15 dick je 1x92140* 50 50 50 50

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
2	Tažení rovingů 1 přední trupový závěs 2 zadní trupový závěs 3 závěsové oka 4 hlavní čep

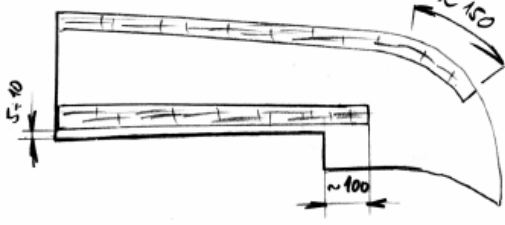
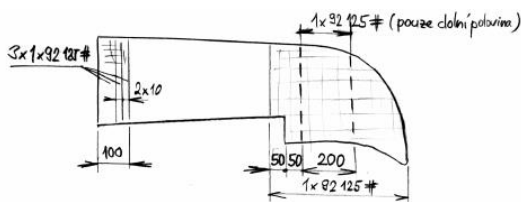
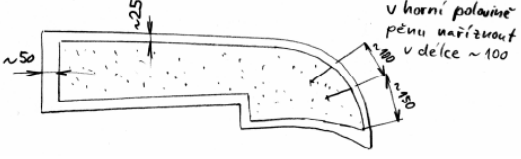
Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
3	Stojina  Technical drawing of a stepped block structure. The drawing shows a 3D perspective of a block with three steps. The top surface is labeled "Corticell 60". The right side is labeled "rechter". The block is divided into three sections labeled "Gewebe Nr. 1: 92140%", "Gewebe Nr. 2: 92140%", and "Gewebe Nr. 3: 92140%". Dimensions are given for the steps: 2650, 3200, and 5200. The total length is 6850. A small detail "pro Seik:" is also noted.

PŘÍLOHA 5: Vrstvení levého krakorce

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
1	Plán tkanin PŘEDEM ZHOTOVENÁ DESKA PO 3x 92140 x PĚNOVÉ KLÍNY PO 2x 92140 x ŽEBRO 5x 92140x 3x 92140 x 3x 92140 x Dolní strana - vyplnit rovingem
2	Tažení rovingů 5x4φ 1x4φ 4x4φ 2x4φ

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovár
3	Plán tkanin vidlice nosníku 
4	Stojina 

PŘÍLOHA 6: Vrstvení nadstavce

Krok	Pracovní postup, materiál, polotovar
1	<u>Stavba – laminování horních a dolních polovin</u> 1 2x 92145 ✕ po celé ploše 2 1x páska 92150 ✕ výztuha náběžné a odtokové hrany, šíře 50 mm 
2	1 3x pás 92125 ≡ výztuha kořenového žebra, odstupňováno po 10 mm 2 1x pás 92125 ≡ výztuha koncového okraje 3 1x páska 92125 ≡ šíře 200 mm, pouze u dolní poloviny 
3	1 pěna Conticell 60, tloušťky 8 mm 
4	1 1x 92110 ≡ s folií po celé ploše
5	1 2x pásek 92125 ≡ laminovat slepovací lem, šíře 70 ÷ 75 mm

PŘÍLOHA 7: Výpočet tažení rovingu pro pravé křídlo

Řez	Poloha [m]	Počet provazců [-]	Kontrola	Plocha [mm ²]	Šířka rovingu [mm]	Hloubka rovingu [mm]
1	-0,3	38	38	706,73	38	18,598
2	-0,2925	39	39	725,328	38,7125	18,736
3	-0,285	40	40	743,926	39,425	18,869
4	-0,2775	41	41	762,524	40,1375	18,998
5	-0,27	42	42	781,122	40,85	19,122
6	-0,2625	43	43	799,72	41,5625	19,241
7	-0,255	44	44	818,318	42,275	19,357
8	-0,2475	45	45	836,917	42,9875	19,469
9	-0,24	46	46	855,515	43,7	19,577
10	-0,2325	47	47	874,113	44,4125	19,682
11	-0,225	48	48	892,711	45,125	19,783
12	-0,2175	49	49	911,309	45,8375	19,881
13	-0,21	50	50	929,907	46,55	19,977
14	-0,2025	51	51	948,505	47,2625	20,069
15	-0,195	52	52	967,104	47,975	20,158
16	-0,1875	53	53	985,702	48,6875	20,245
17	-0,18	54	54	1004,3	49,4	20,330
18	-0,1725	55	55	1022,9	50,1125	20,412
19	-0,165	56	56	1041,5	50,825	20,492
20	-0,1575	57	57	1060,09	51,5375	20,569
21	-0,15	58	58	1078,69	52,25	20,645
22	-0,1425	59	59	1097,29	52,9625	20,718
23	-0,135	60	60	1115,89	53,675	20,790
24	-0,1275	61	61	1134,49	54,3875	20,859
25	-0,12	62	62	1153,09	55,1	20,927
26	-0,1125	63	63	1171,68	55,8125	20,993
27	-0,105	64	64	1190,28	56,525	21,058
28	-0,0975	65	65	1208,88	57,2375	21,120
29	-0,09	66	66	1227,48	57,95	21,182
30	-0,0825	67	67	1246,08	58,6625	21,241
31	-0,075	68	68	1264,67	59,375	21,300
32	-0,0675	69	69	1283,27	60,0875	21,357
33	-0,06	70	70	1301,87	60,8	21,412
34	-0,0525	71	71	1320,47	61,5125	21,467
35	-0,045	72	72	1339,07	62,225	21,520

Řez	Poloha	Počet provazců	Kontrola	Plocha	Šířka rovingu	Hloubka rovingu
	[m]	[-]		[mm ²]	[mm]	[mm]
36	-0,0375	73	73	1357,66	62,9375	21,572
37	-0,03	74	74	1376,26	63,65	21,622
38	-0,0225	75	75	1394,86	64,3625	21,672
39	-0,015	76	76	1413,46	65,075	21,720
40	-0,0075	77	77	1432,06	65,7875	21,768
41	0	78	78	1450,66	66,5	21,814
42	0,0075	79	79	1469,25	67,2125	21,860
43	0,015	80	80	1487,85	67,925	21,904
44	0,0225	81	81	1506,45	68,6375	21,948
45	0,03	82	82	1525,05	69,35	21,991
46	0,0375	83	83	1543,65	70,0625	22,032
47	0,045	84	84	1562,24	70,775	22,073
48	0,0525	85	85	1580,84	71,4875	22,114
49	0,06	86	86	1599,44	72,2	22,153
50	0,0675	87	87	1618,04	72,9125	22,192
51	0,075	88	88	1636,64	73,625	22,229
52	0,0825	89	89	1655,23	74,3375	22,266
53	0,09	90	90	1673,83	75,05	22,303
54	0,0975	91	91	1692,43	75,7625	22,339
55	0,105	92	92	1711,03	76,475	22,374
56	0,1125	93	93	1729,63	77,1875	22,408
57	0,12	94	94	1748,23	77,9	22,442
58	0,1275	95	95	1766,82	78,6125	22,475
59	0,135	96	96	1785,42	79,325	22,508
60	0,1425	97	97	1804,02	80,0375	22,540
61	0,15	98	98	1822,62	80,75	22,571
62	0,1575	99	99	1841,22	81,4625	22,602
63	0,165	100	100	1859,81	82,175	22,632
64	0,1725	101	101	1878,41	82,8875	22,662
65	0,18	104	102	1934,21	83,6	23,136
66	0,3	104	118	1934,21	95	20,360
67	0,42	104	104	1934,21	93,758	20,630
68	0,4425	103	103	1915,61	93,5251	20,482
69	0,464	102	102	1897,01	93,3026	20,332
70	0,486	101	101	1878,41	93,0801	20,181
71	0,507	100	100	1859,81	92,8576	20,029
72	0,529	99	99	1841,22	92,635	19,876
73	0,550	98	98	1822,62	92,4125	19,723
74	0,572	97	97	1804,02	92,19	19,569

Řez	Poloha [m]	Počet provazců [-]	Kontrola	Plocha [mm ²]	Šířka rovingu [mm]	Hloubka rovingu [mm]
75	0,593	96	96	1785,42	91,9675	19,414
76	0,615	95	95	1766,82	91,7449	19,258
77	0,636	94	94	1748,23	91,5224	19,102
78	0,658	93	93	1729,63	91,2999	18,944
79	0,679	92	92	1711,03	91,0774	18,787
80	0,7005	91	91	1692,43	90,8548	18,628
81	0,722	90	90	1673,83	90,6323	18,468
82	0,7435	89	89	1655,23	90,4098	18,308
83	0,765	88	88	1636,64	90,1873	18,147
84	0,7865	87	87	1618,04	89,9647	17,985
85	0,808	86	86	1599,44	89,7422	17,823
86	0,8295	85	85	1580,84	89,5197	17,659
87	0,851	84	84	1562,24	89,2972	17,495
88	0,8725	83	83	1543,65	89,0746	17,330
89	0,894	82	82	1525,05	88,8521	17,164
90	0,9155	81	81	1506,45	88,6296	16,997
91	0,937	80	80	1487,85	88,4071	16,830
92	0,9585	79	79	1469,25	88,1845	16,661
93	0,98	78	78	1450,66	87,962	16,492
94	1,01	77	77	1432,06	87,6515	16,338
95	1,04	76	76	1413,46	87,341	16,183
96	1,07	75	75	1394,86	87,0305	16,027
97	1,1	74	74	1376,26	86,72	15,870
98	1,13	73	73	1357,66	86,4095	15,712
99	1,16	72	72	1339,07	86,099	15,553
100	1,19	71	71	1320,47	85,7885	15,392
101	1,22	70	70	1301,87	85,478	15,230
102	1,25	69	69	1283,27	85,1675	15,068
103	1,28	68	68	1264,67	84,857	14,904
104	1,31	67	67	1246,08	84,5465	14,738
105	1,34	66	66	1227,48	84,236	14,572
106	1,37	65	65	1208,88	83,9255	14,404
107	1,4	64	64	1190,28	83,615	14,235
108	1,45	63	63	1171,68	83,0975	14,100
109	1,5	62	62	1153,09	82,58	13,963
110	1,55	61	61	1134,49	82,0625	13,825
111	1,6	60	60	1115,89	81,545	13,684
112	1,65	59	59	1097,29	81,0275	13,542
113	1,7	58	58	1078,69	80,51	13,398

Řez	Poloha [m]	Počet provazců [-]	Kontrola	Plocha [mm ²]	Šířka rovingu [mm]	Hloubka rovingu [mm]
114	1,75	57	57	1060,09	79,9925	13,252
115	1,8	56	56	1041,5	79,475	13,105
116	1,85	55	55	1022,9	78,9575	12,955
117	1,9	54	54	1004,3	78,44	12,803
118	1,96	53	53	985,702	77,819	12,667
119	2,02	52	52	967,104	77,198	12,528
120	2,08	51	51	948,505	76,577	12,386
121	2,14	50	50	929,907	75,956	12,243
122	2,2	49	49	911,309	75,335	12,097
123	2,26	48	48	892,711	74,714	11,948
124	2,32	47	47	874,113	74,093	11,798
125	2,38	46	46	855,515	73,472	11,644
126	2,45	45	45	836,917	72,7475	11,504
127	2,52	44	44	818,318	72,023	11,362
128	2,59	43	43	799,72	71,2985	11,217
129	2,66	42	42	781,122	70,574	11,068
130	2,73	41	41	762,524	69,8495	10,917
131	2,8	40	40	743,926	69,125	10,762
132	2,87	39	39	725,328	68,4005	10,604
133	2,94	38	38	706,73	67,676	10,443
134	3,01	37	37	688,131	66,9515	10,278
135	3,08	36	36	669,533	66,227	10,110
136	3,15	35	35	650,935	65,5025	9,938
137	3,22	34	34	632,337	64,778	9,762
138	3,295	33	33	613,739	64,0018	9,589
139	3,37	32	32	595,141	63,2255	9,413
140	3,445	31	31	576,543	62,4493	9,232
141	3,52	30	30	557,944	61,673	9,047
142	3,615	29	29	539,346	60,6898	8,887
143	3,71	28	28	520,748	59,7065	8,722
144	3,805	27	27	502,15	58,7233	8,551
145	3,9	26	26	483,552	57,74	8,375
146	4	25	25	464,954	56,705	8,200
147	4,1	24	24	446,355	55,67	8,018
148	4,215	23	23	427,757	54,4798	7,852
149	4,33	22	22	409,159	53,2895	7,678
150	4,445	21	21	390,561	52,0993	7,496
151	4,56	20	20	371,963	50,909	7,306
152	4,68	19	19	353,365	49,667	7,115

Řez	Poloha	Počet provazců	Kontrola	Plocha	Šířka rovingu	Hloubka rovingu
	[m]	[-]		[mm ²]	[mm]	[mm]
153	4,8	18	18	334,767	48,425	6,913
154	5	17	17	316,168	46,355	6,821
155	5,2	16	16	297,57	44,285	6,719
156	5,4	15	15	278,972	42,215	6,608
157	5,6	14	14	260,374	40,145	6,486
158	6,4	13	13	241,776	31,865	7,588
159	7,2	12	12	223,178	23,585	9,463
160	7,21421	11	11	204,58	23,4379	8,729
161	7,22842	10	10	185,981	23,2909	7,985
162	7,24263	9	9	167,383	23,1438	7,232
163	7,25684	8	8	148,785	22,9967	6,470
164	7,27104	7	7	130,187	22,8497	5,698
165	7,28525	6	6	111,589	22,7026	4,915
166	7,29946	5	5	92,9907	22,5556	4,123
167	7,31367	4	4	74,3926	22,4085	3,320
168	7,32788	3	3	55,7944	22,2614	2,506
169	7,34209	2	2	37,1963	22,1144	1,682
170	7,35	1	1	18,5981	22,031	0,844

PŘÍLOHA 8: Výpočet tažení rovingu pro levé křídlo

Řez	Poloha	Počet provazců	Kontrola	Plocha	Šířka rovingu	Hloubka rovingu
	[m]	[-]		[mm ²]	[mm]	[mm]
1	-0,3	38	38	706,73	56	12,620
2	-0,2925	39	39	725,328	56,776	12,775
3	-0,285	40	40	743,926	57,551	12,926
4	-0,2775	41	41	762,524	58,3259	13,073
5	-0,27	42	42	781,122	59,1009	13,217
6	-0,2625	43	43	799,72	59,8759	13,356
7	-0,255	44	44	818,318	60,6509	13,492
8	-0,2475	45	45	836,917	61,4258	13,625
9	-0,24	46	46	855,515	62,2008	13,754
10	-0,2325	47	47	874,113	62,9758	13,880
11	-0,225	48	48	892,711	63,7508	14,003
12	-0,2175	49	49	911,309	64,5257	14,123
13	-0,21	50	50	929,907	65,3007	14,240
14	-0,2025	51	51	948,505	66,0757	14,355
15	-0,195	52	52	967,104	66,8507	14,467
16	-0,1875	53	53	985,702	67,6256	14,576
17	-0,18	54	54	1004,3	68,4006	14,683
18	-0,1725	55	55	1022,9	69,1756	14,787
19	-0,165	56	56	1041,5	69,9506	14,889
20	-0,1575	57	57	1060,09	70,7255	14,989
21	-0,15	58	58	1078,69	71,5005	15,087
22	-0,1425	59	59	1097,29	72,2755	15,182
23	-0,135	60	60	1115,89	73,0505	15,276
24	-0,1275	61	61	1134,49	73,8254	15,367
25	-0,12	62	62	1153,09	74,6004	15,457
26	-0,1125	63	63	1171,68	75,3754	15,545
27	-0,105	64	64	1190,28	76,1504	15,631
28	-0,0975	65	65	1208,88	76,9253	15,715
29	-0,09	66	66	1227,48	77,7003	15,798
30	-0,0825	67	67	1246,08	78,4753	15,879
31	-0,075	68	68	1264,67	79,2503	15,958
32	-0,0675	69	69	1283,27	80,0252	16,036
33	-0,06	70	70	1301,87	80,8002	16,112
34	-0,0525	71	71	1320,47	81,5752	16,187
35	-0,045	72	72	1339,07	82,3502	16,261

Řez	Poloha [m]	Počet provazců [-]	Kontrola	Plocha [mm ²]	Šířka rovingu [mm]	Hloubka rovingu [mm]
36	-0,0375	73	73	1357,66	83,1251	16,333
37	-0,03	74	74	1376,26	83,9001	16,404
38	-0,0225	75	75	1394,86	84,6751	16,473
39	-0,015	76	76	1413,46	85,4501	16,541
40	-0,0075	77	77	1432,06	86,225	16,608
41	0	78	78	1450,66	87	16,674
42	0,0075	79	79	1469,25	87,775	16,739
43	0,015	80	80	1487,85	88,55	16,802
44	0,0225	81	81	1506,45	89,3249	16,865
45	0,03	82	82	1525,05	90,0999	16,926
46	0,0375	83	83	1543,65	90,8749	16,986
47	0,045	84	84	1562,24	91,6499	17,046
48	0,0525	85	85	1580,84	92,4248	17,104
49	0,06	86	86	1599,44	93,1998	17,161
50	0,0675	87	87	1618,04	93,9748	17,218
51	0,075	88	88	1636,64	94,7498	17,273
52	0,0825	89	89	1655,23	95,5247	17,328
53	0,09	90	90	1673,83	96,2997	17,381
54	0,0975	91	91	1692,43	97,0747	17,434
55	0,105	92	92	1711,03	97,8497	17,486
56	0,1125	93	93	1729,63	98,6246	17,537
57	0,12	94	94	1748,23	99,3996	17,588
58	0,1275	95	95	1766,82	100,175	17,637
59	0,135	96	96	1785,42	100,95	17,686
60	0,1425	97	97	1804,02	101,725	17,734
61	0,15	98	98	1822,62	102,5	17,782
62	0,1575	99	99	1841,22	103,274	17,828
63	0,165	100	100	1859,81	104,049	17,874
64	0,1725	101	101	1878,41	104,824	17,920
65	0,18	104	102	1934,21	105,599	18,316
66	0,3	104	118	1934,21	118	16,392
67	0,42	104	104	1934,21	111,888	17,287
68	0,4425	103	103	1915,61	110,743	17,298
69	0,464	102	102	1897,01	109,648	17,301
70	0,486	101	101	1878,41	108,554	17,304
71	0,507	100	100	1859,81	107,459	17,307
72	0,529	99	99	1841,22	106,365	17,310
73	0,550	98	98	1822,62	105,27	17,314
74	0,572	97	97	1804,02	104,176	17,317

Řez	Poloha [m]	Počet provazců [-]	Kontrola	Plocha [mm ²]	Šířka rovingu [mm]	Hloubka rovingu [mm]
75	0,593	96	96	1785,42	103,081	17,321
76	0,615	95	95	1766,82	101,986	17,324
77	0,636	94	94	1748,23	100,892	17,328
78	0,658	93	93	1729,63	99,7973	17,331
79	0,679	92	92	1711,03	98,7028	17,335
80	0,7005	91	91	1692,43	97,6082	17,339
81	0,722	90	90	1673,83	96,5137	17,343
82	0,7435	89	89	1655,23	95,4192	17,347
83	0,765	88	88	1636,64	94,3246	17,351
84	0,7865	87	87	1618,04	93,2301	17,355
85	0,808	86	86	1599,44	92,1355	17,360
86	0,8295	85	85	1580,84	91,041	17,364
87	0,85	85	85	1580,84	90	17,565
88	0,8725	83	83	1543,65	89,0746	17,330

PŘÍLOHA 9: Výpočet tažení rovingu pro nadstavec

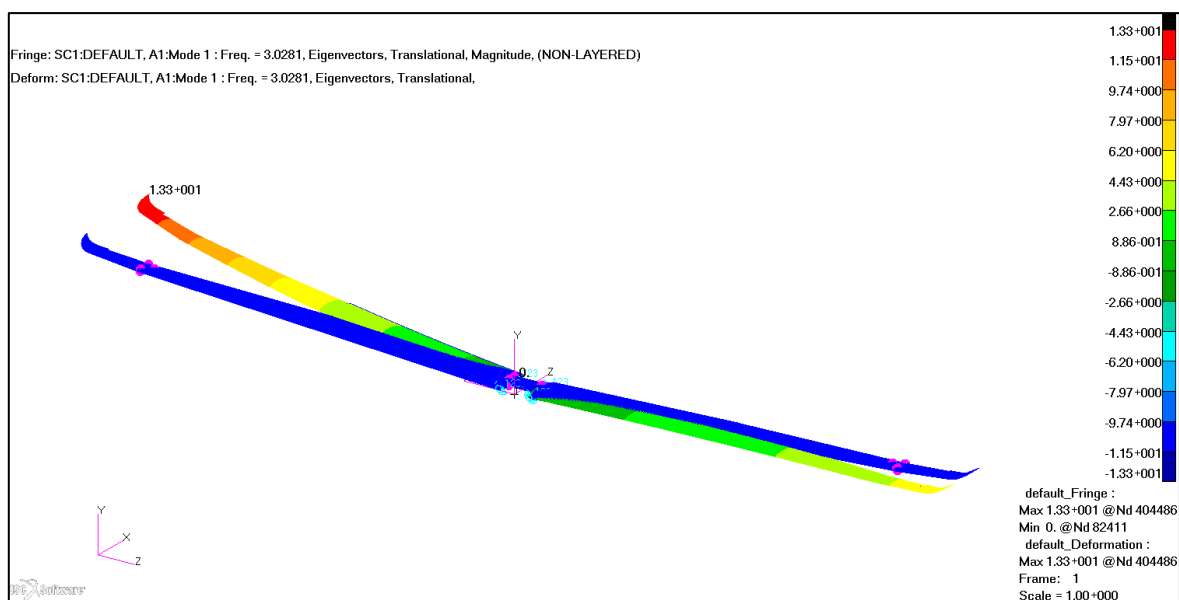
Řez	Počet provazců	Kontrola	Plocha	Šířka rovingu	Hloubka rovingu
	[-]		[mm ²]	[mm]	[mm]
1	12	12	223,178	60	3,720
2	12	12	223,178	40	5,579

PŘÍLOHA 10: Použité materiály a jejich vlastnosti

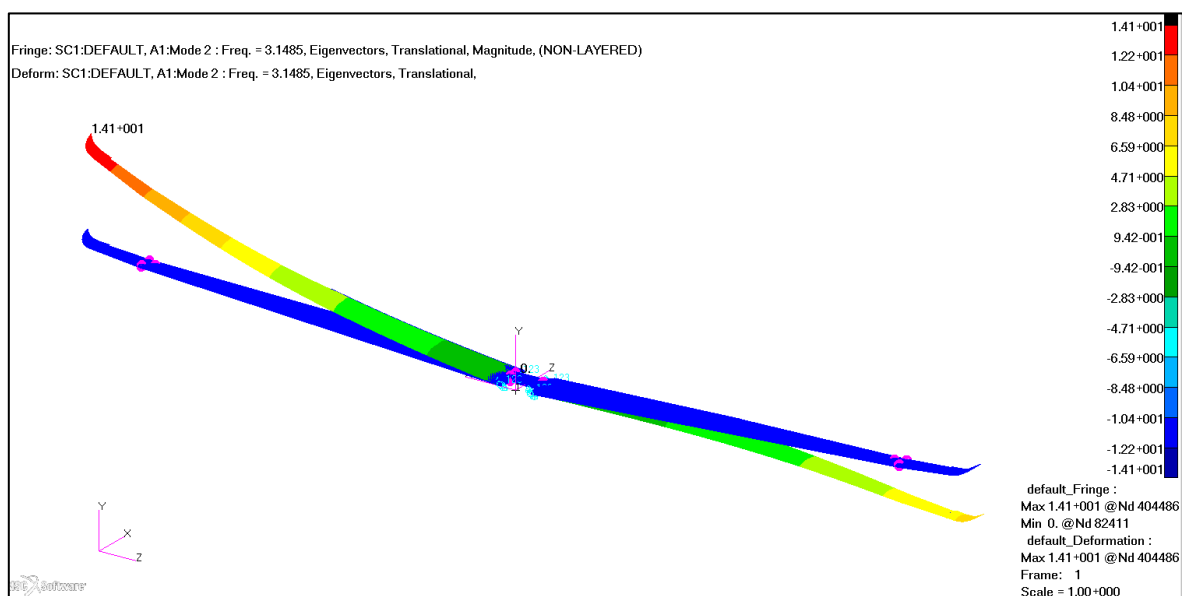
Označení	Název	Hustota [g/cm ³]	Tloušťka laminátu	Modul pružnosti 11	Modul pružnosti 22	Modul ve smyku 12	Modul ve smyku 23	Modul ve smyku 13	Poissonovo číslo
		[g/cm ³]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
92140	Kepr	1,65	0,429	19 000	18 000	3 800	1 818	1 818	0,02
92125	Kepr	1,65	0,308	19 000	18 000	3 800	1 818	1 818	0,02
92110	Kepr	1,65	0,179	19 000	18 000	3 800	1 818	1 818	0,02
92145	Kepr	1,65	0,242	19 000	18 000	3 800	1 818	1 818	0,02
92150	Prostý	1,65	0,379	20 000	20 000	3 800	1 818	1 818	0,02
CC60	Herex	0,05	15	60	60				0,1
CC60	Herex	0,05	8	60	60				0,1
Ocel	Ocel	7,8		210 000	210 000	80 769	80 769	80 769	0,3
Uhlík	Uhlík	1,5		100 000	100 000	38 461	38 461	38 461	0,3

PŘÍLOHA 11: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro podrobný MKP model křídla

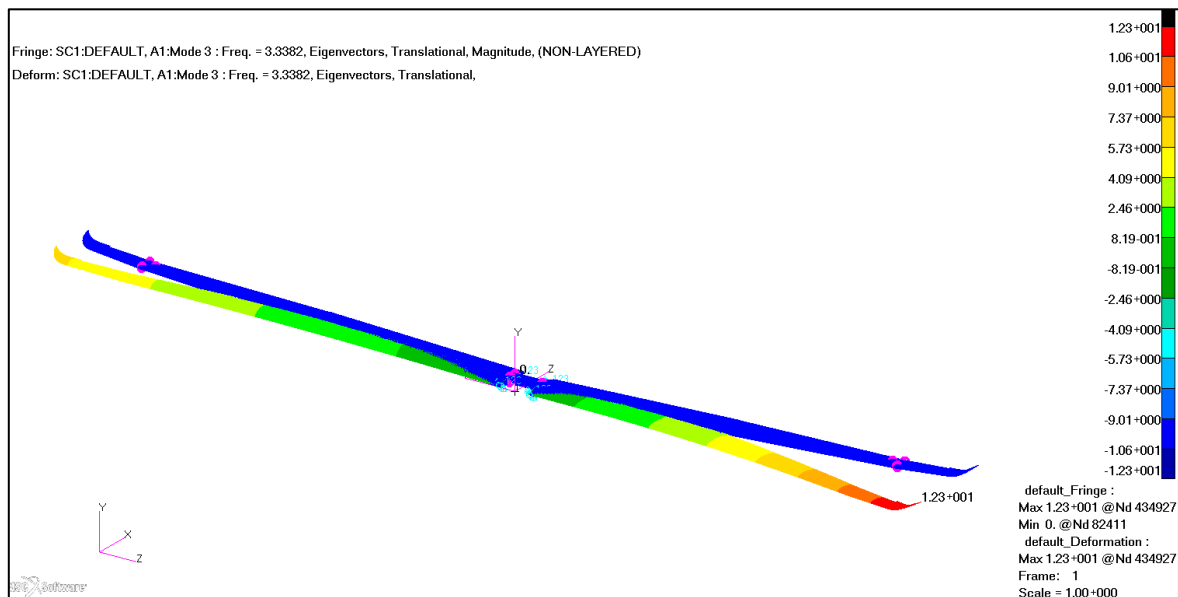
Mód 1: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 3,0281 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



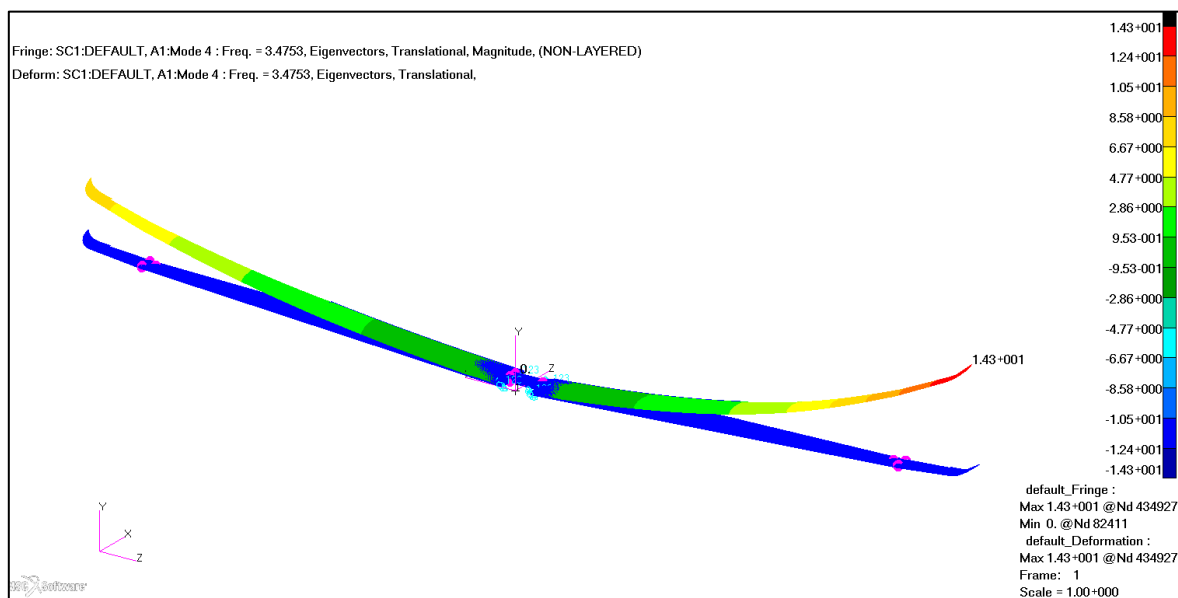
Mód 2: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 3,1485 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



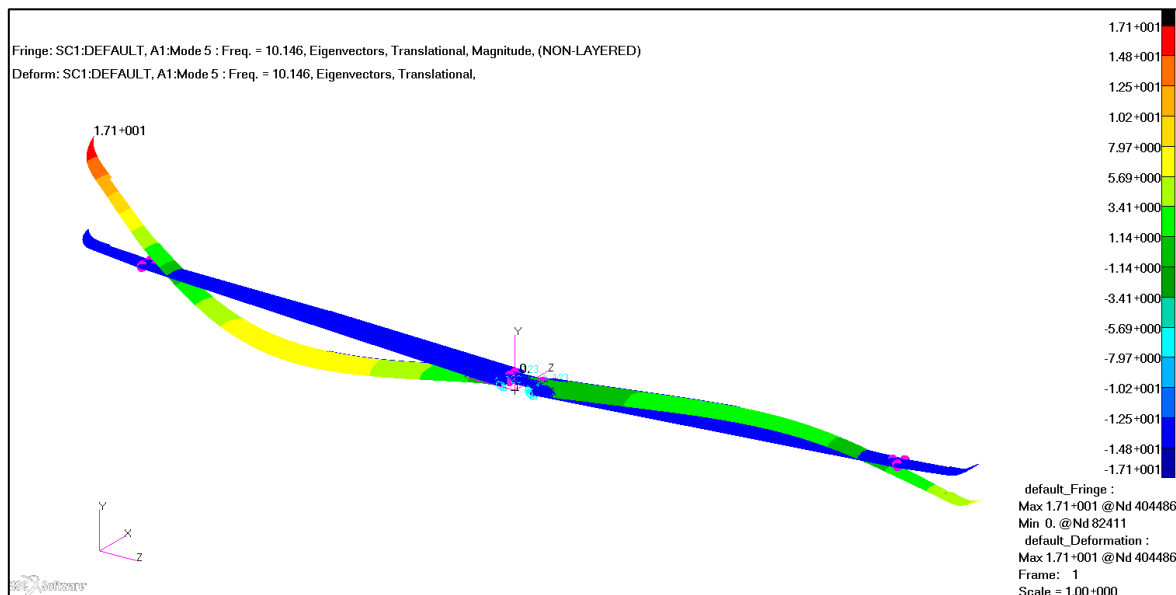
Mód 3: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 3,3382 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



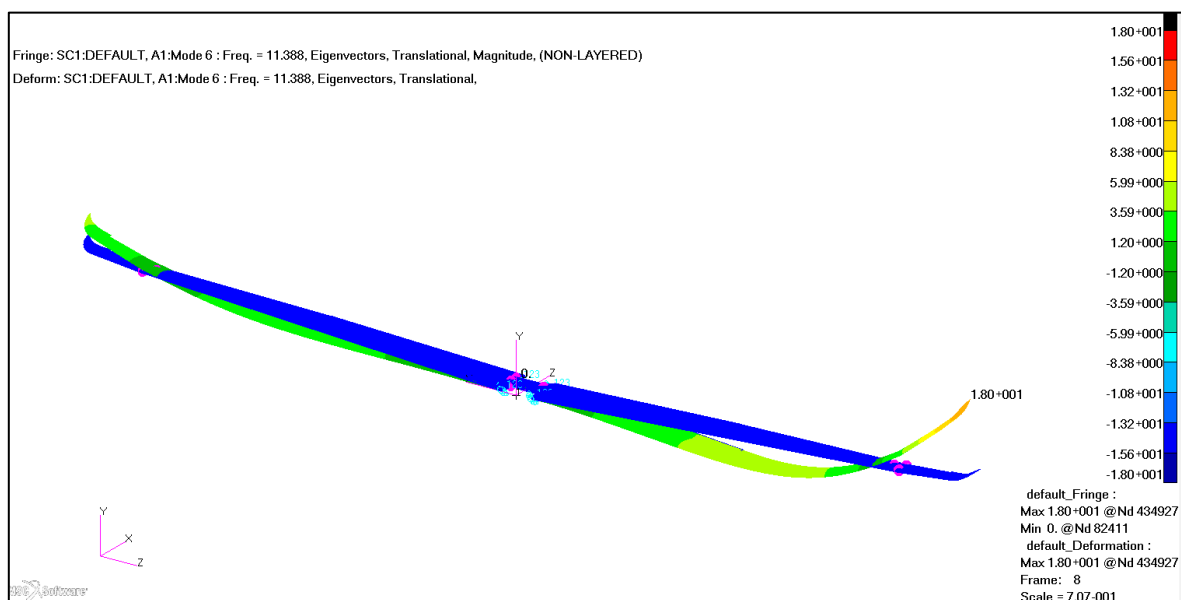
Mód 4: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 3,4753 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb.



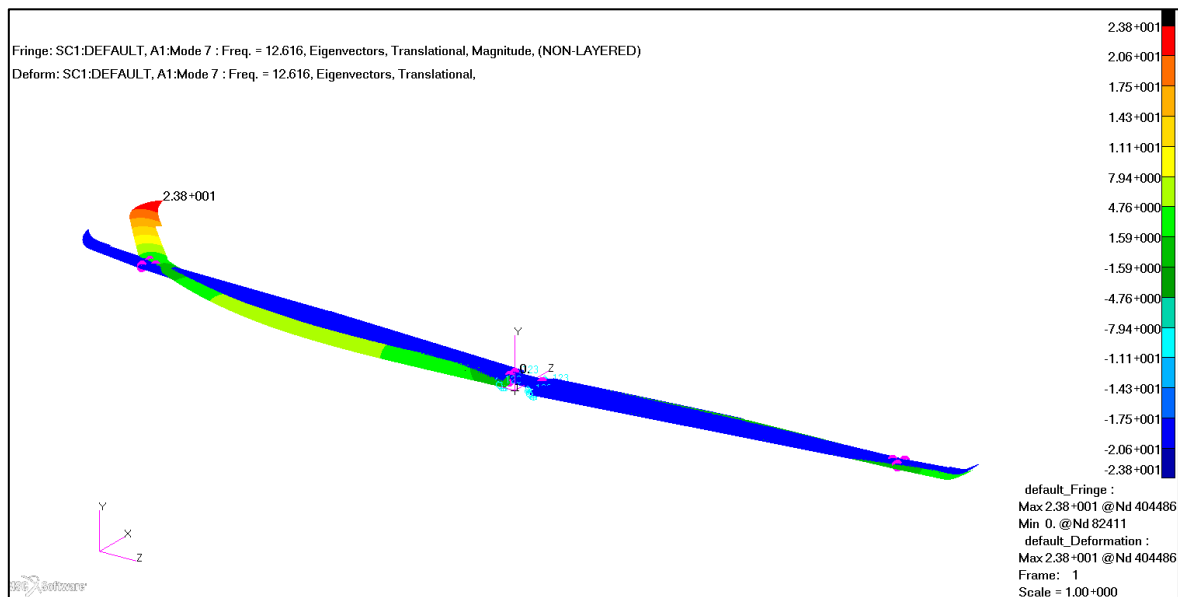
Mód 5: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 10,146 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



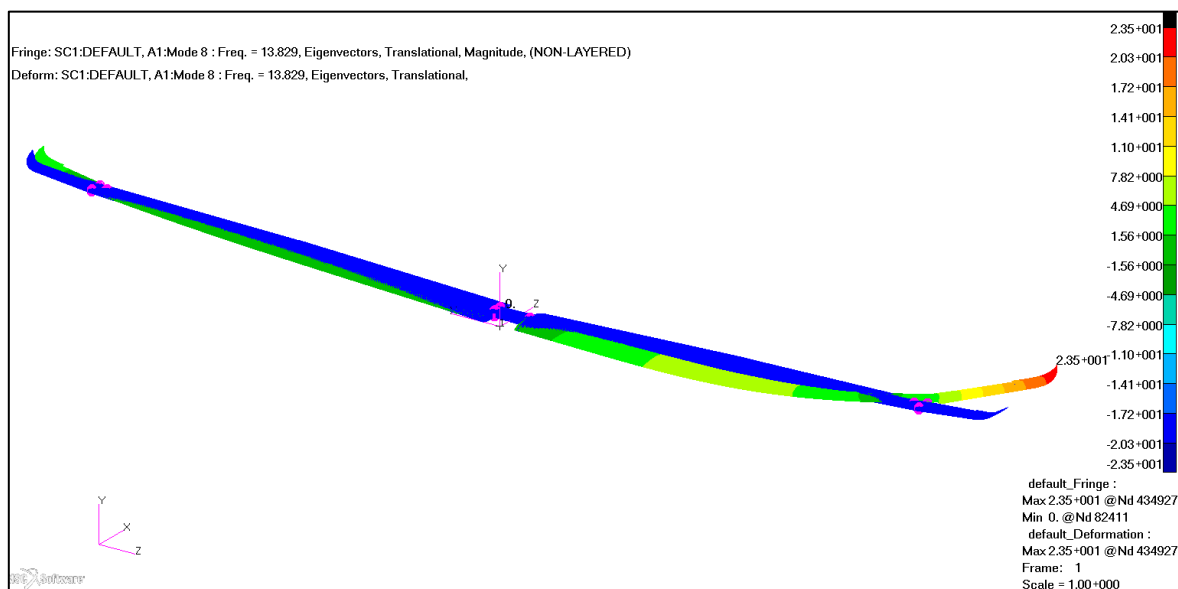
Mód 6: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 11,388 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb.



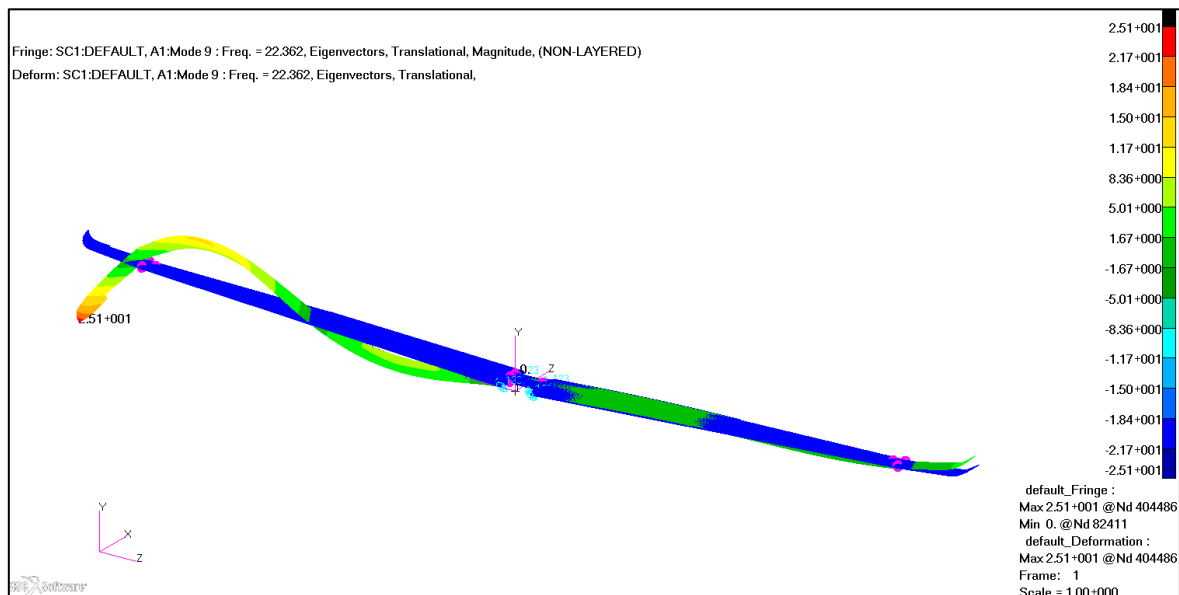
Mód 7: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 12,616 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



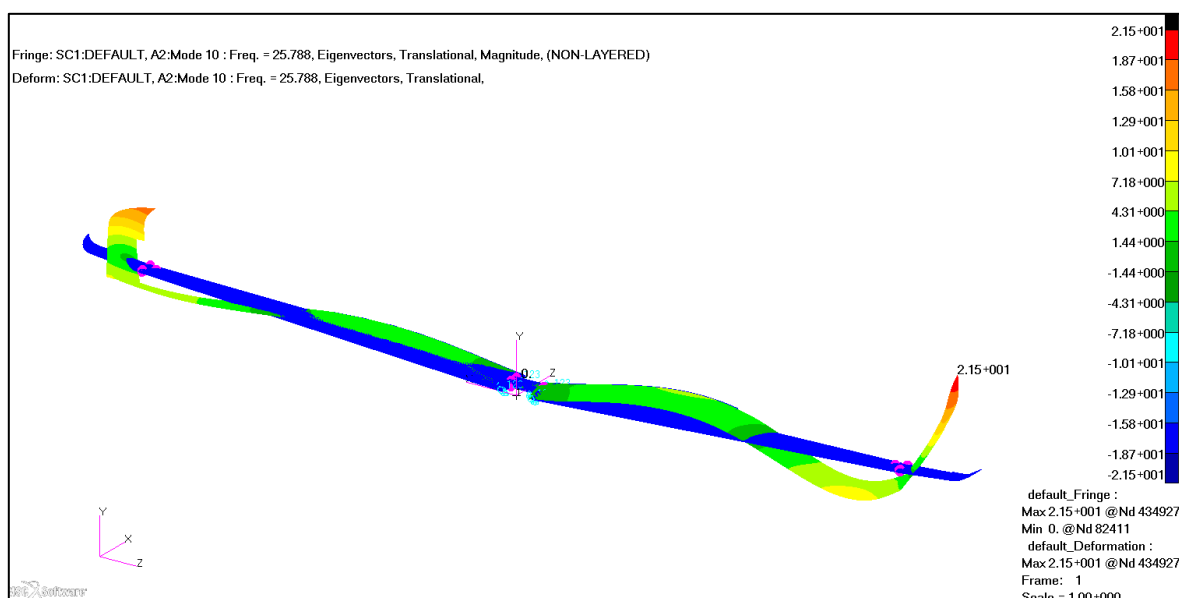
Mód 8: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 13,829 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



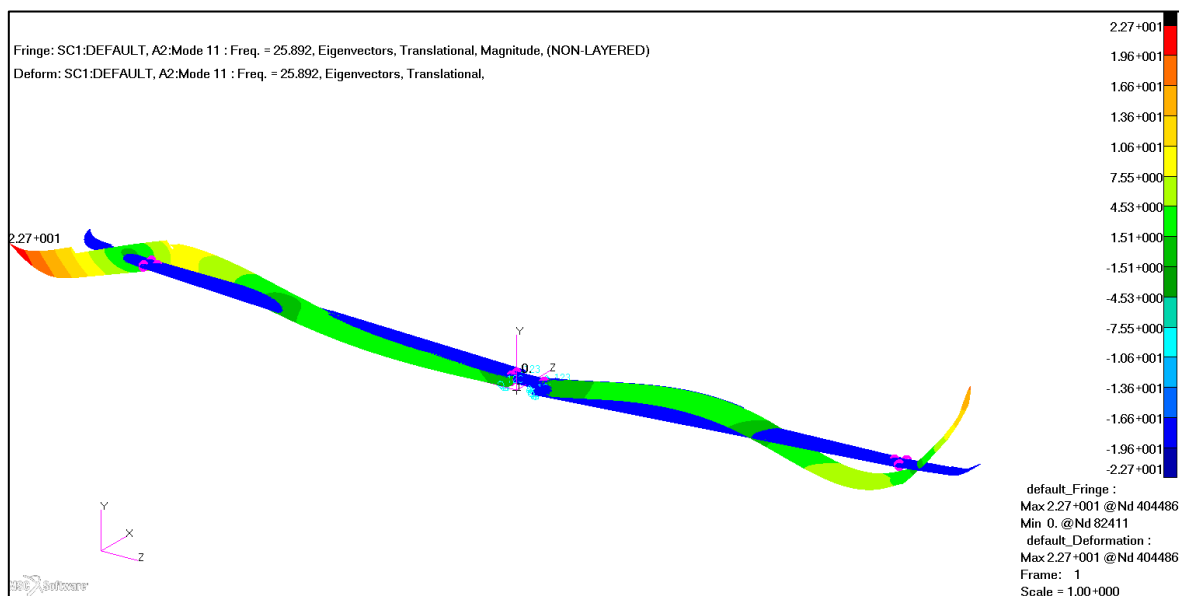
Mód 9: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 22,362 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



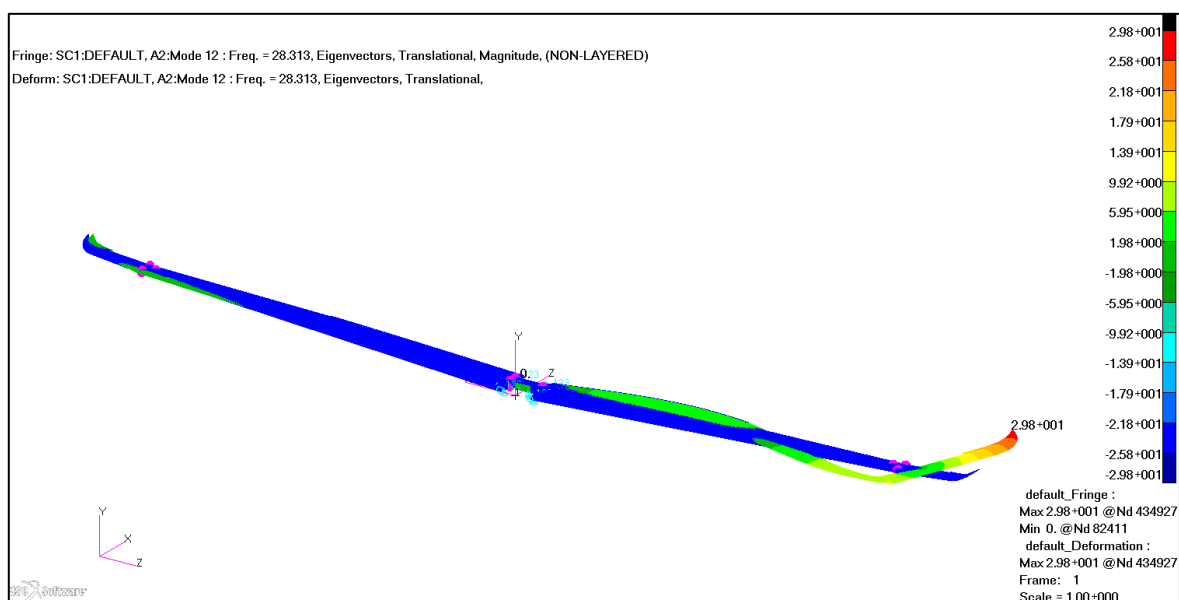
Mód 10: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 25,788 Hz, kdy tvar kmitání byl vícenásobný ohyb levého křídla a vícenásobný ohyb pravého křídla v podélném směru.



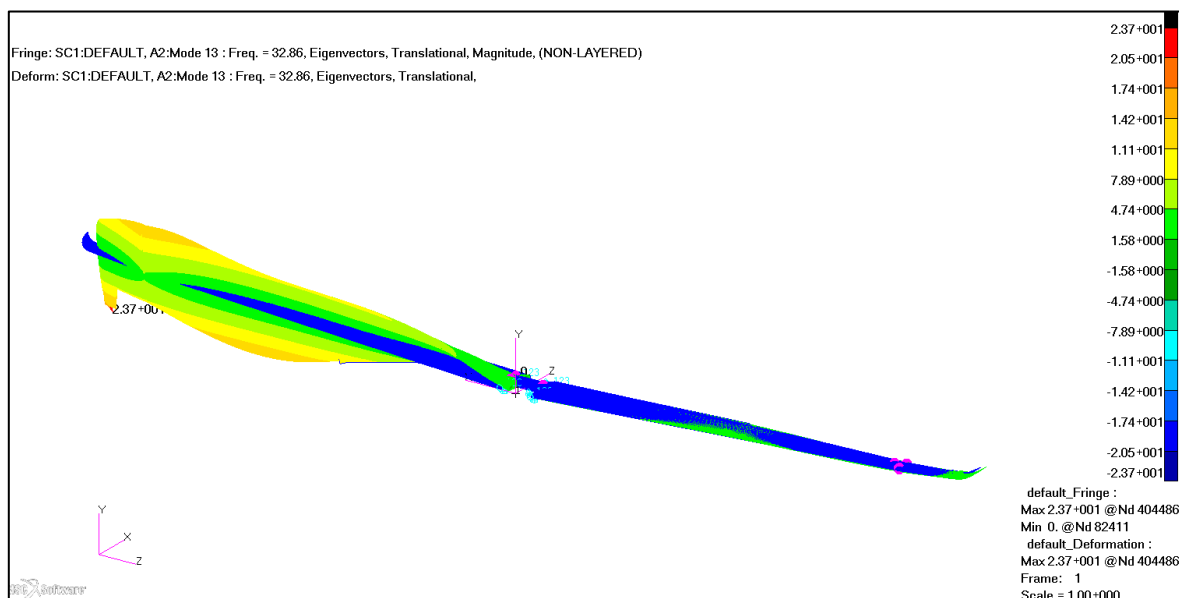
Mód 11: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 25,892 Hz, kdy tvar kmitání byl vícenásobný ohyb levého křídla a vícenásobný ohyb pravého křídla v podélném směru.



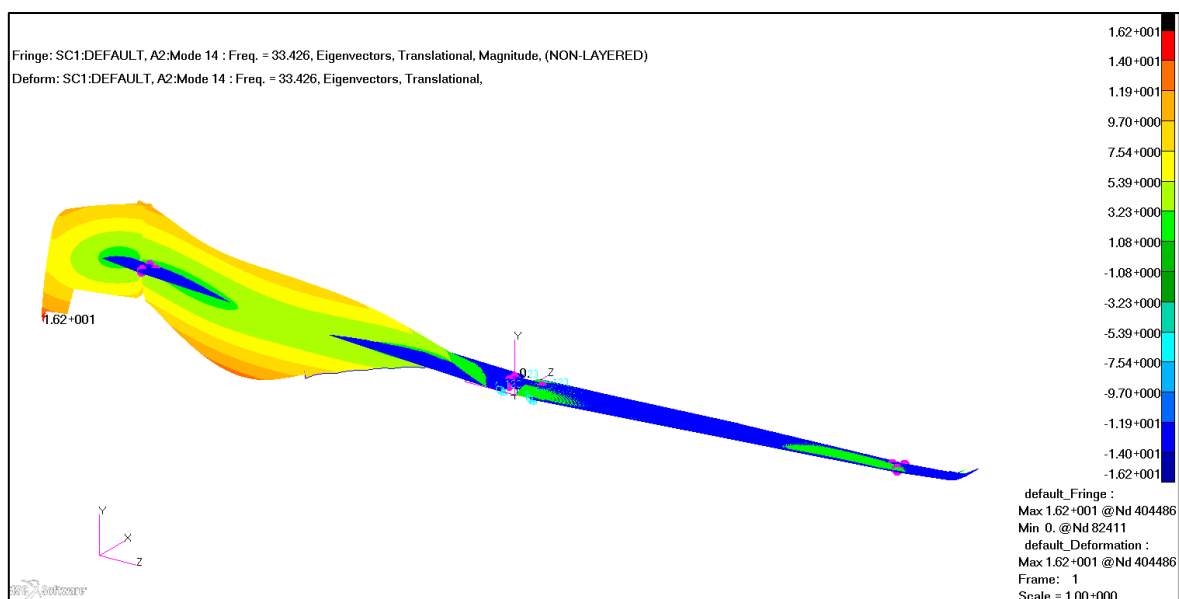
Mód 12: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 28,313 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru.



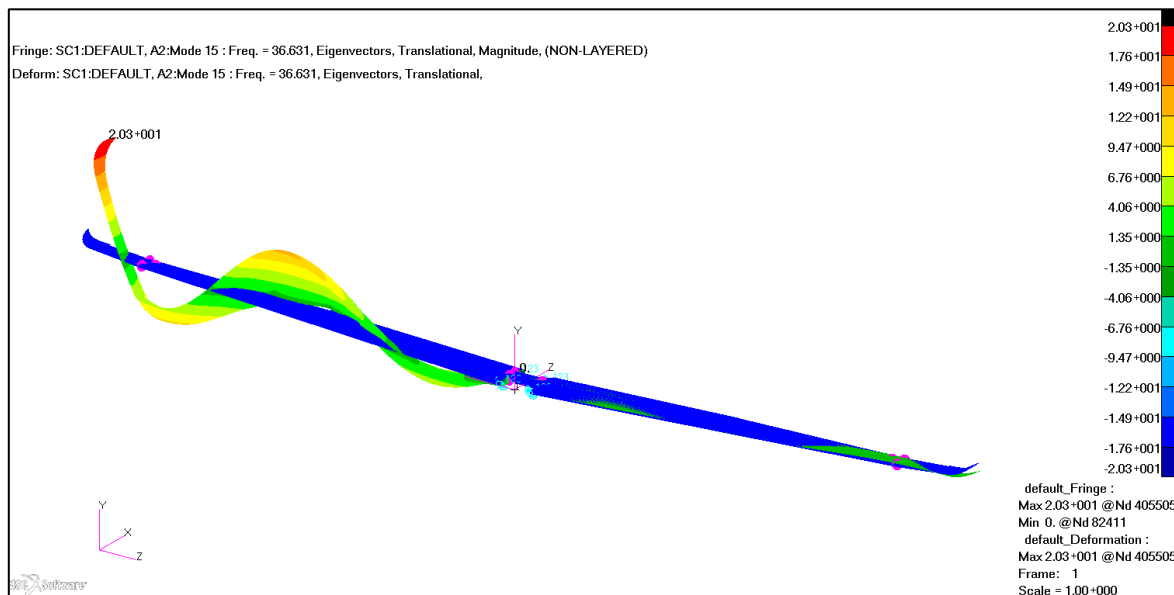
Mód 13: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 32,86 Hz, kdy tvar kmitání byl čistý krut pravého křídla doprovázený vícenásobným ohybem s posunem levého křídla.



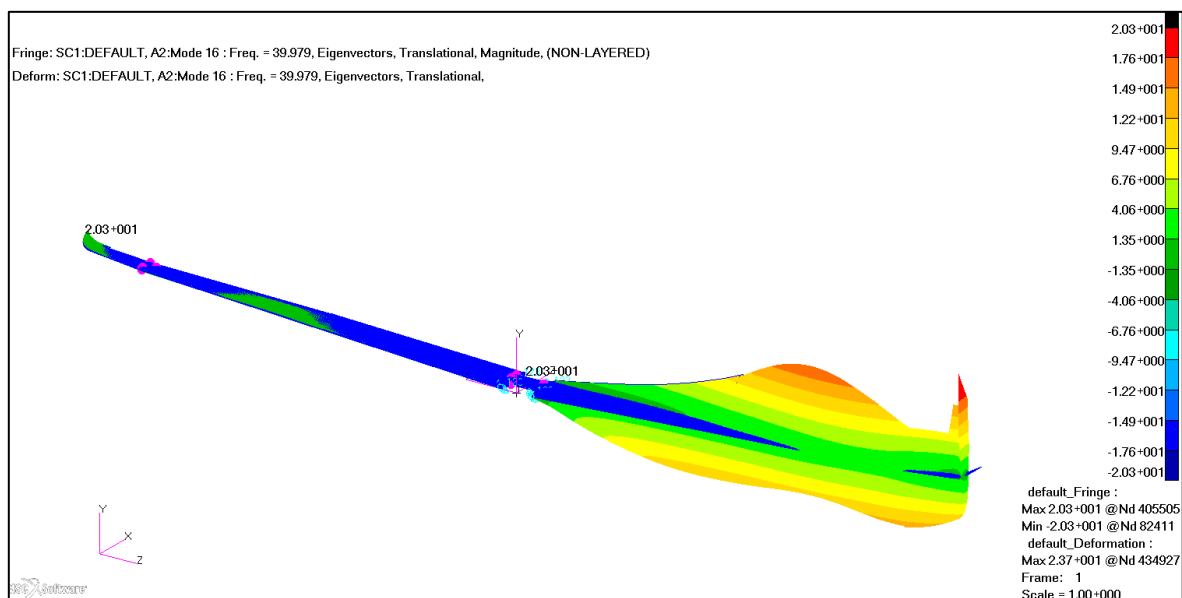
Mód 14: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 33,426 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem s posunem.



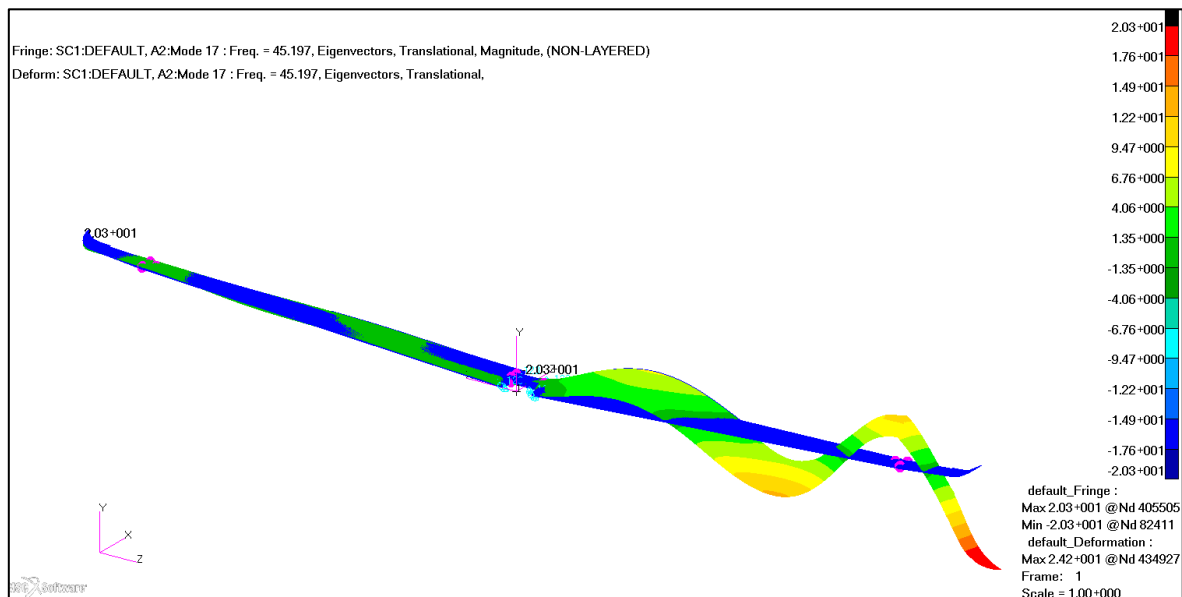
Mód 15: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 36,631 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



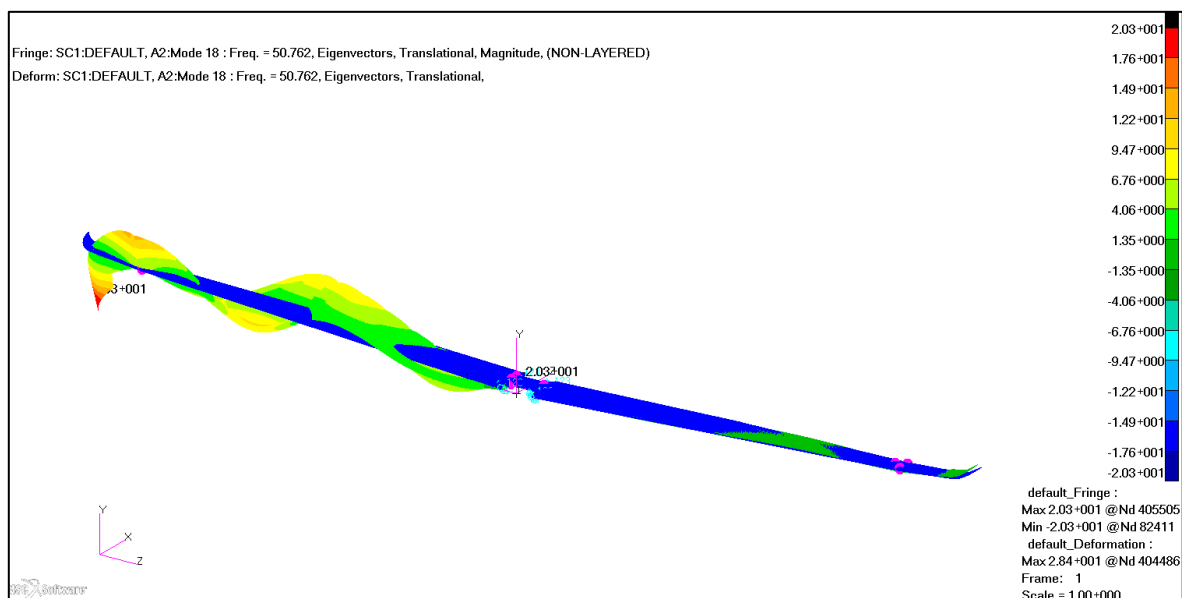
Mód 16: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 39,979 Hz, kdy tvar kmitání byl čistý krut pravého křídla doprovázený vícenásobným ohybem s posunem levého křídla.



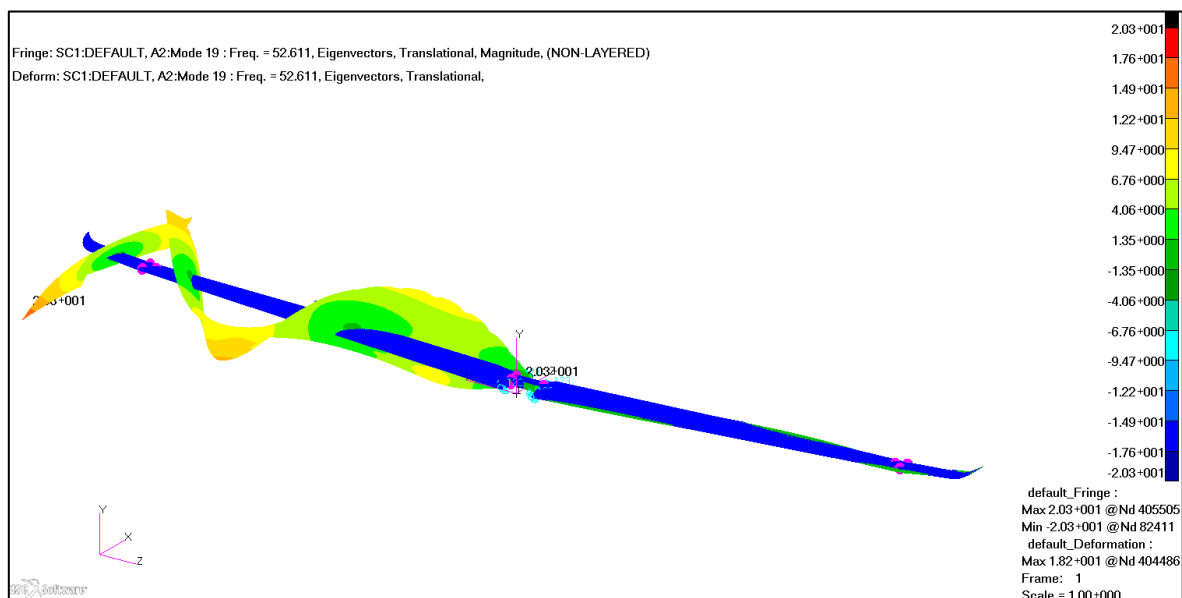
Mód 17: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 45,197 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb.



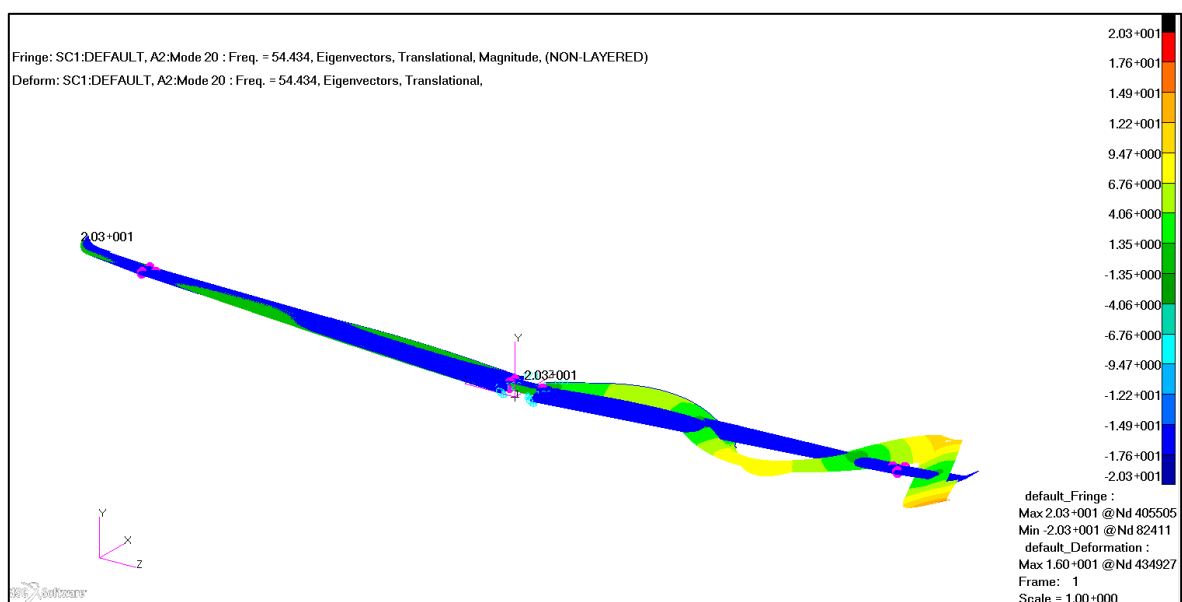
Mód 18: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 50,762 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb doprovázený symetrickým vícenásobným ohybem v podélném směru.



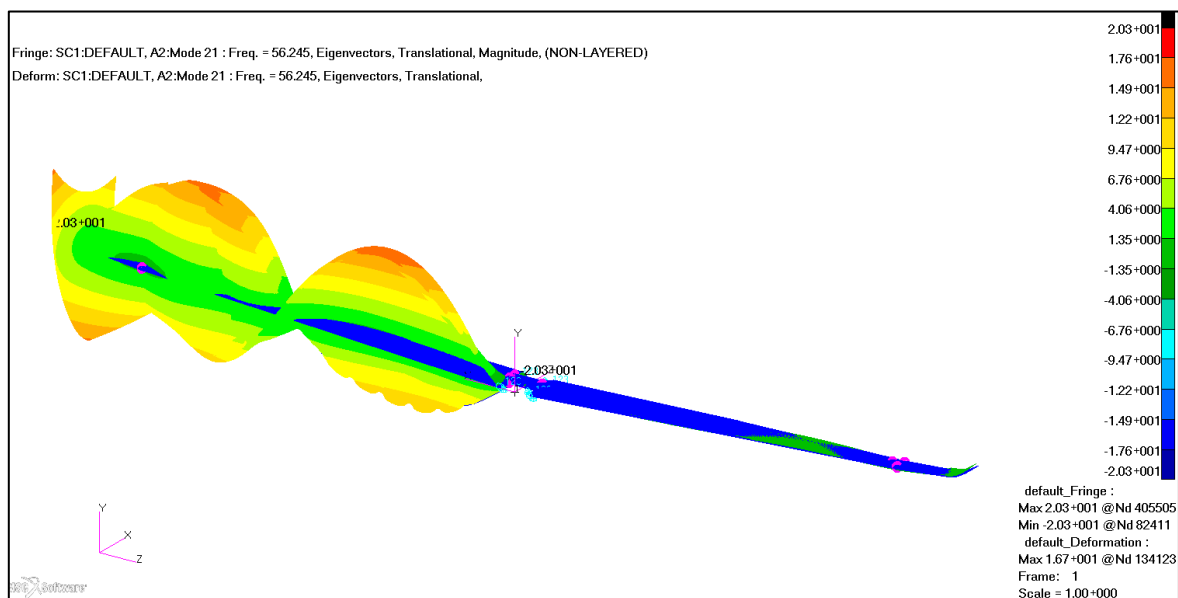
Mód 19: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 52,611 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru pravého křídla doprovázený krutem s posunem levého křídla.



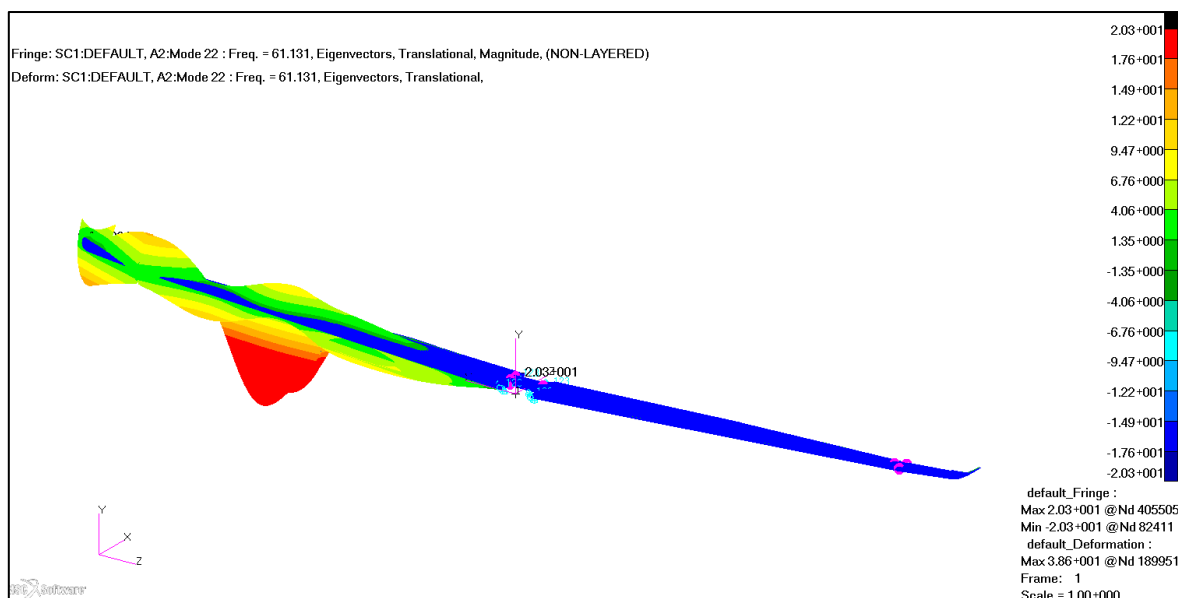
Mód 20: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 54,434 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru.



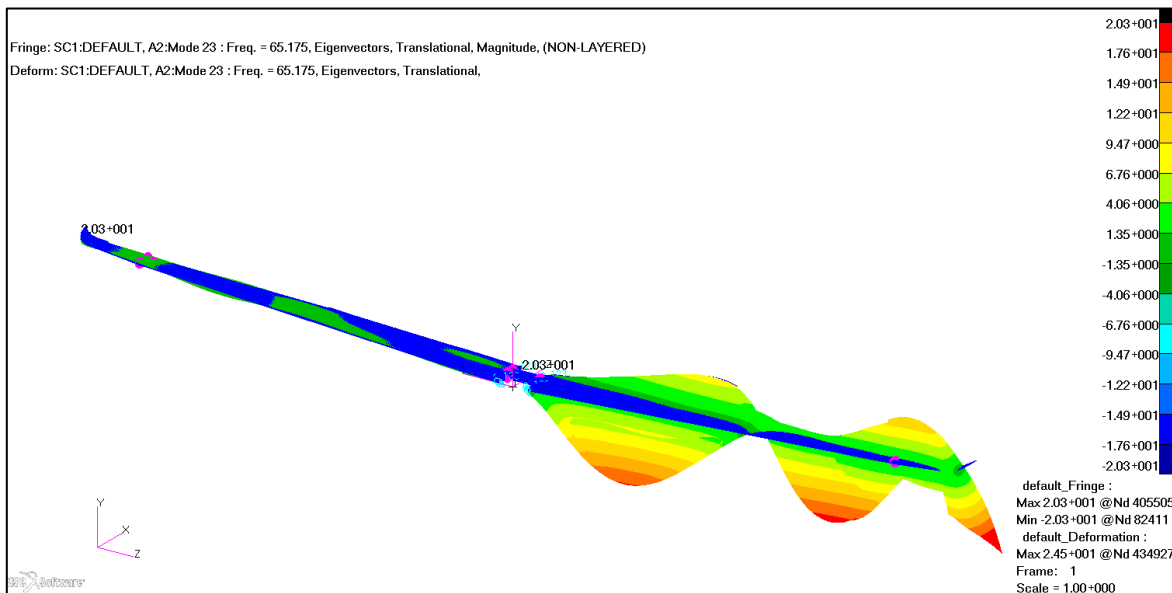
Mód 21: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 56,245 Hz, kdy tvar kmitání bylo vícenásobný krut pravého křídla doprovázený vícenásobným ohybem levého křídla.



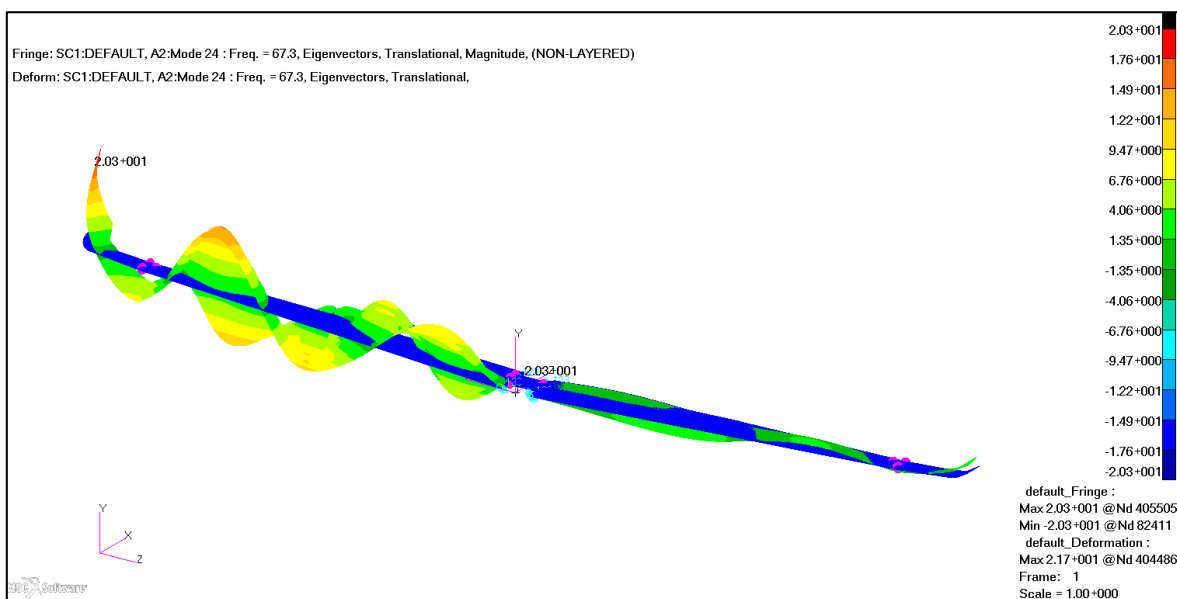
Mód 22: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 61,131 Hz, kdy tvar kmitání byl vícenásobný krut pravého křídla doprovázené vícenásobným ohybem levého křídla.



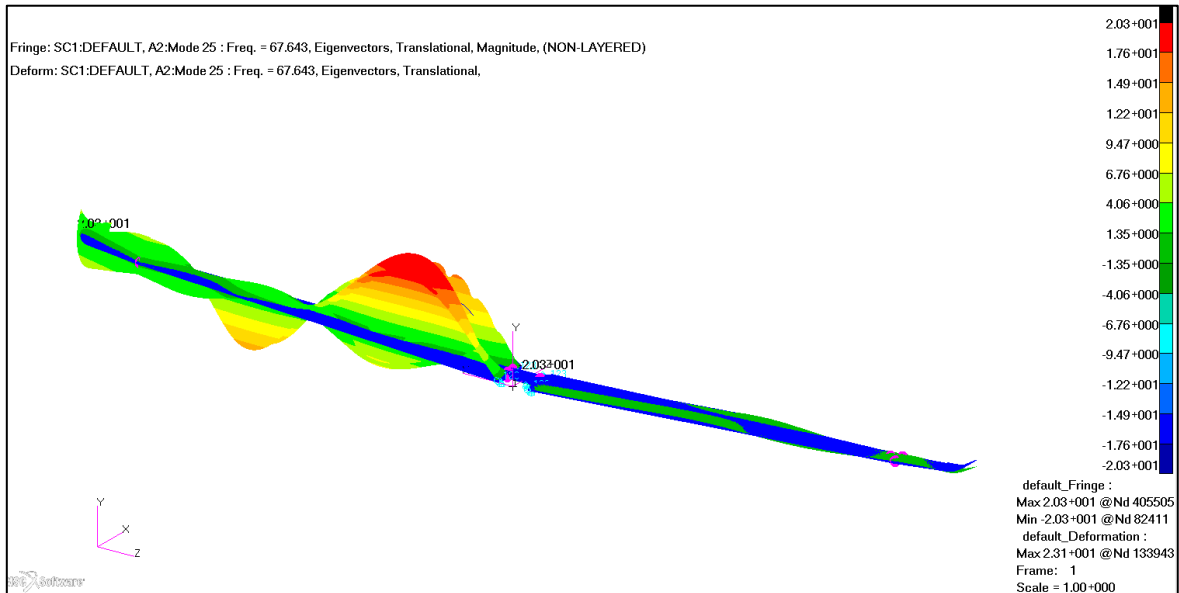
Mód 23: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 65,175 Hz, kdy tvar kmitání byl vícenásobný krut levého křídla doprovázené vícenásobným ohybem pravého křídla.



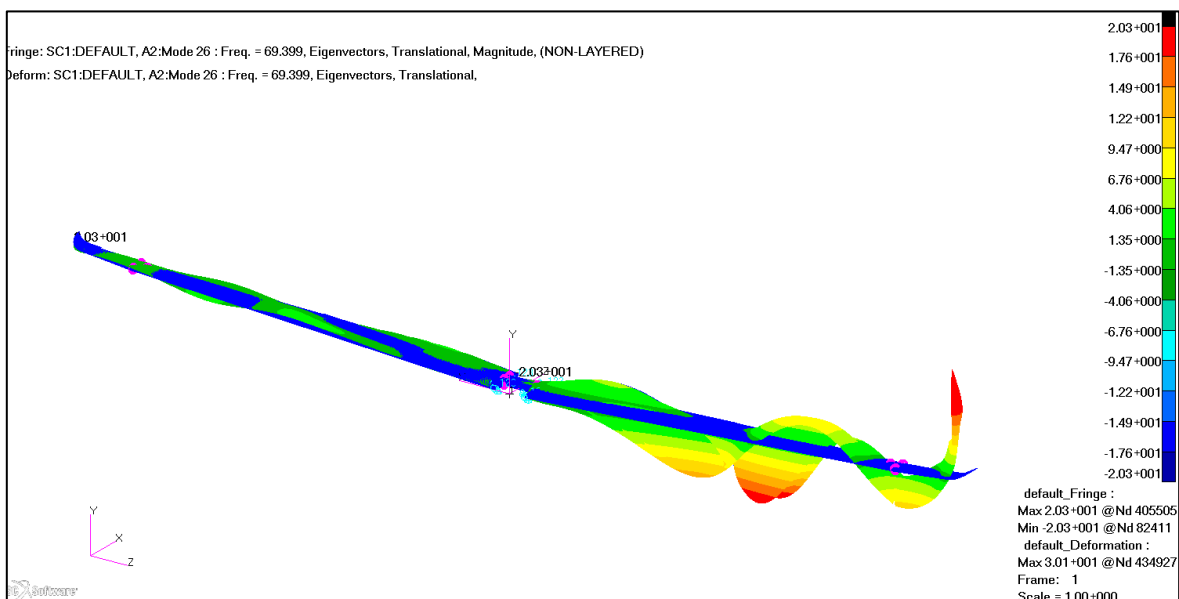
Mód 24: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 67,3 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem. U levého křídla byl nesymetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



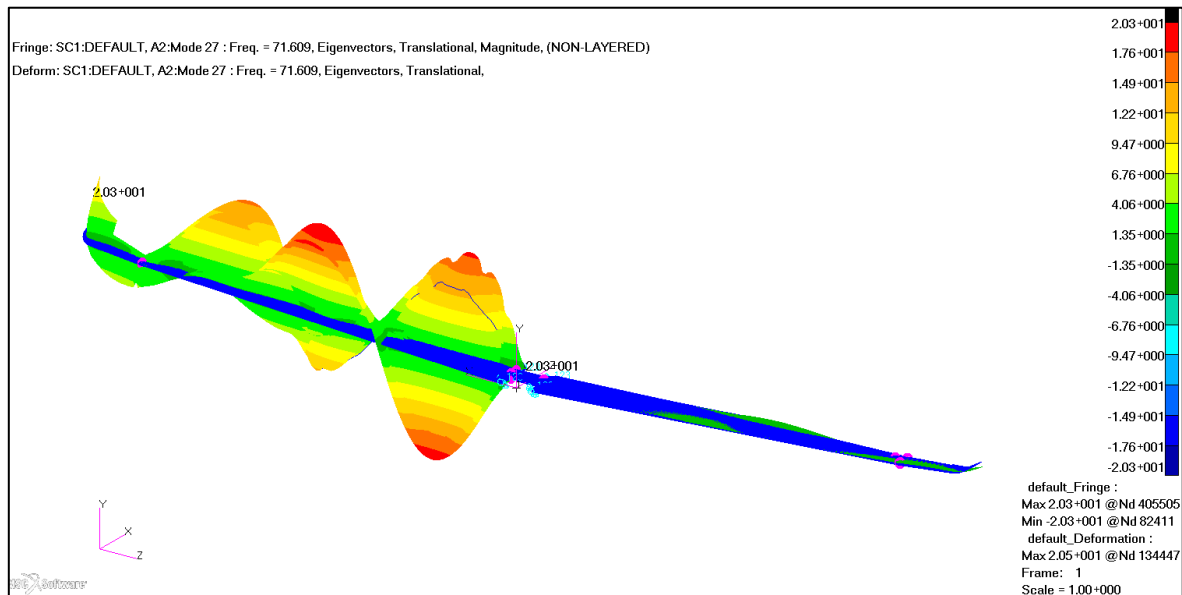
Mód 25: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 67,643 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla přecházející v krut. U levého křídla byl nesymetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



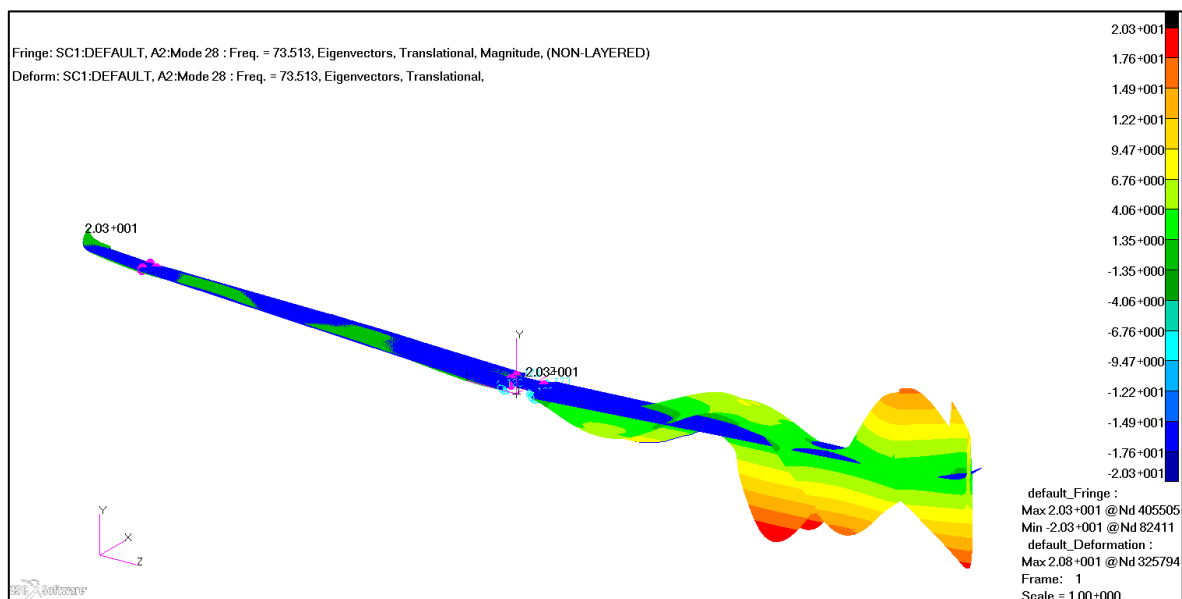
Mód 26: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 69,399 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem. U levého křídla byl nesymetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



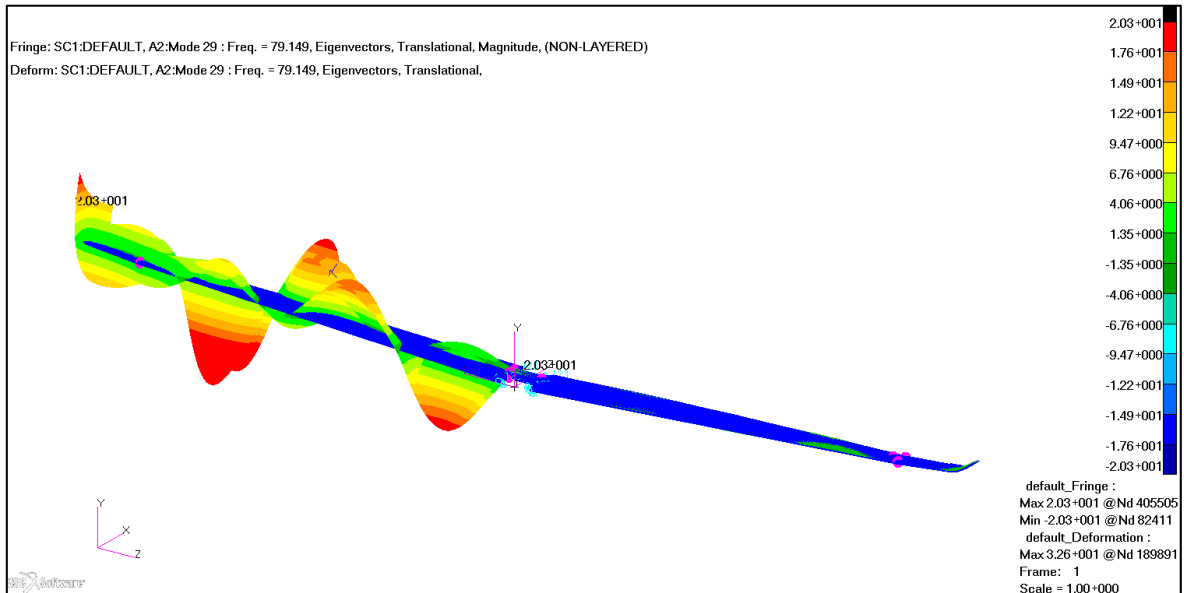
Mód 27: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 71,609 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem. U levého křídla byl nesymetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



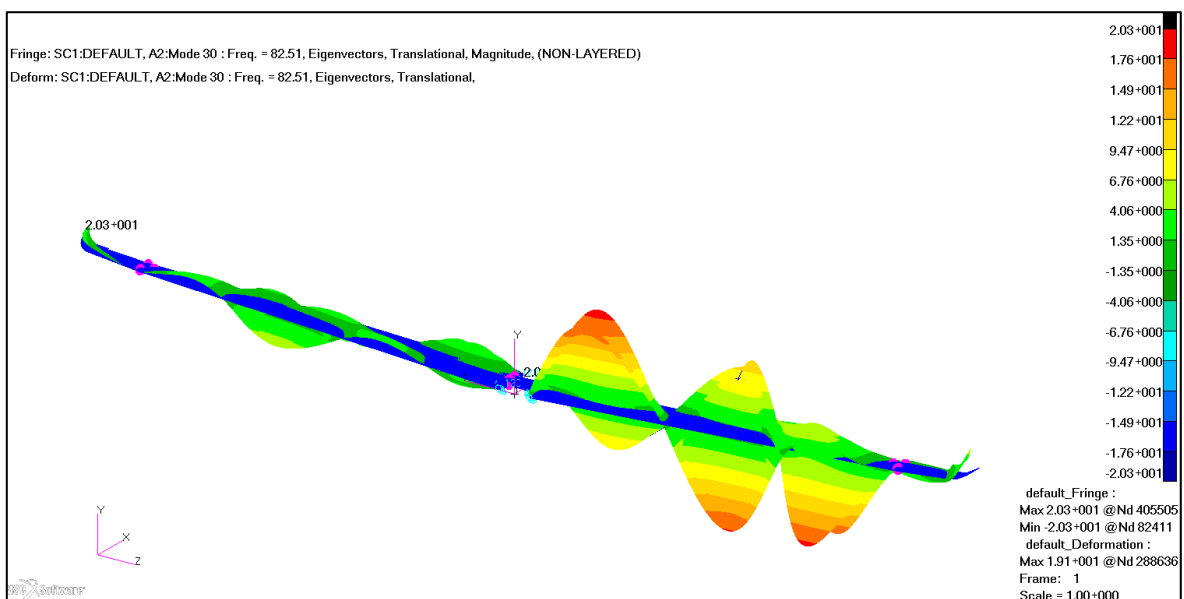
Mód 28: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 73,513 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb levého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla přecházející v krut. U pravého křídla byl symetrický vícenásobný ohyb přecházející v krut.



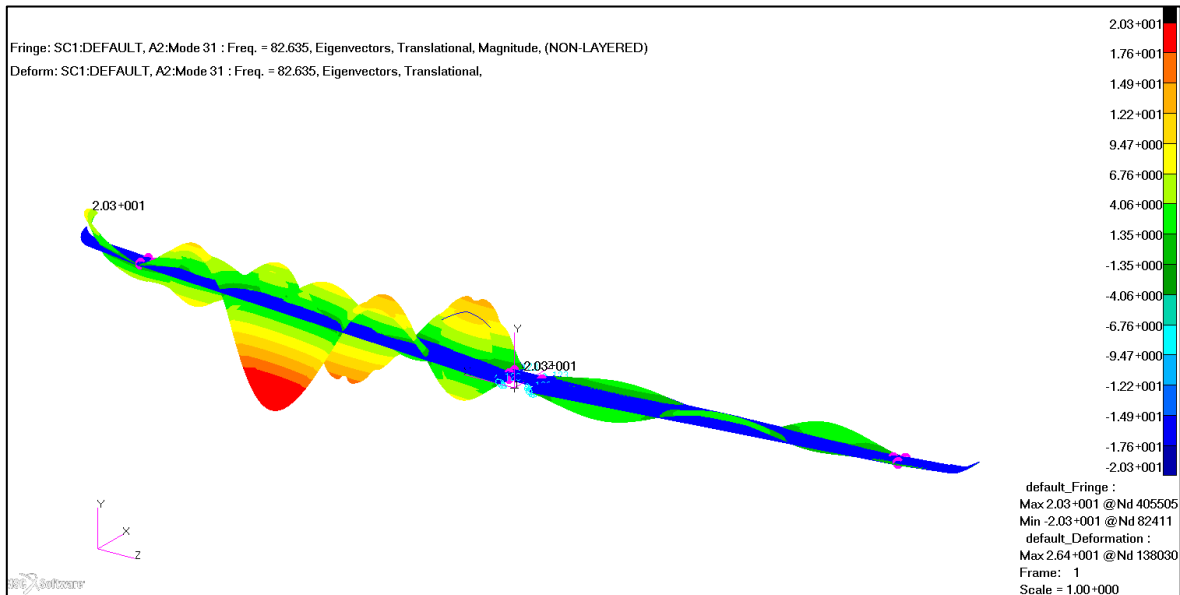
Mód 29: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 79,149 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla přecházející v krut. U levého křídla byl symetrický vícenásobný ohyb.



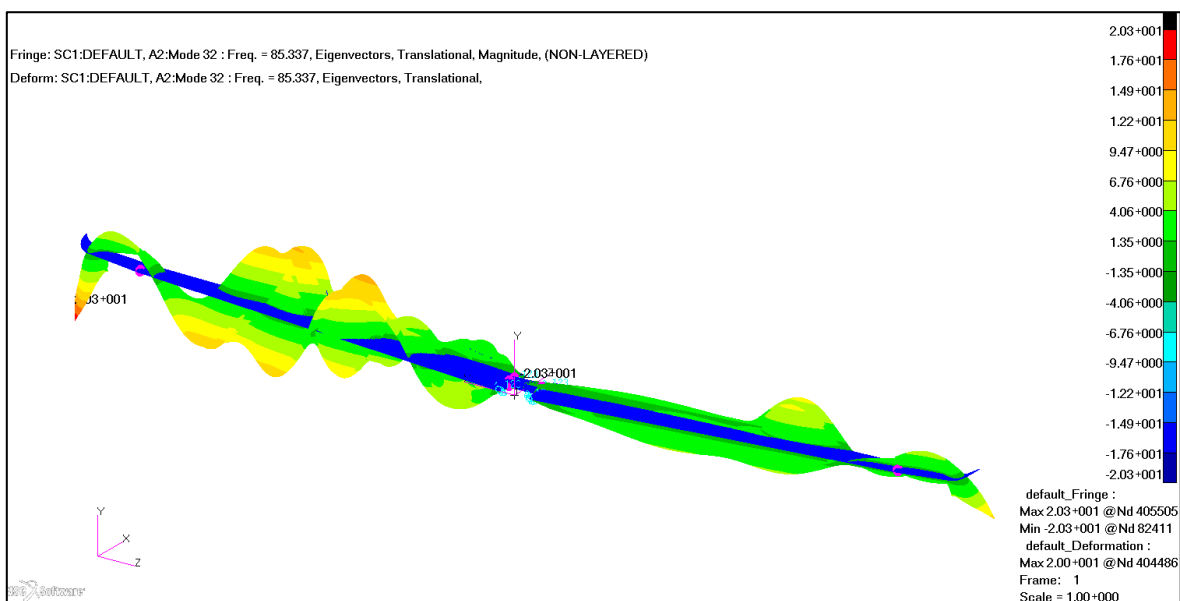
Mód 30: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 82,51 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



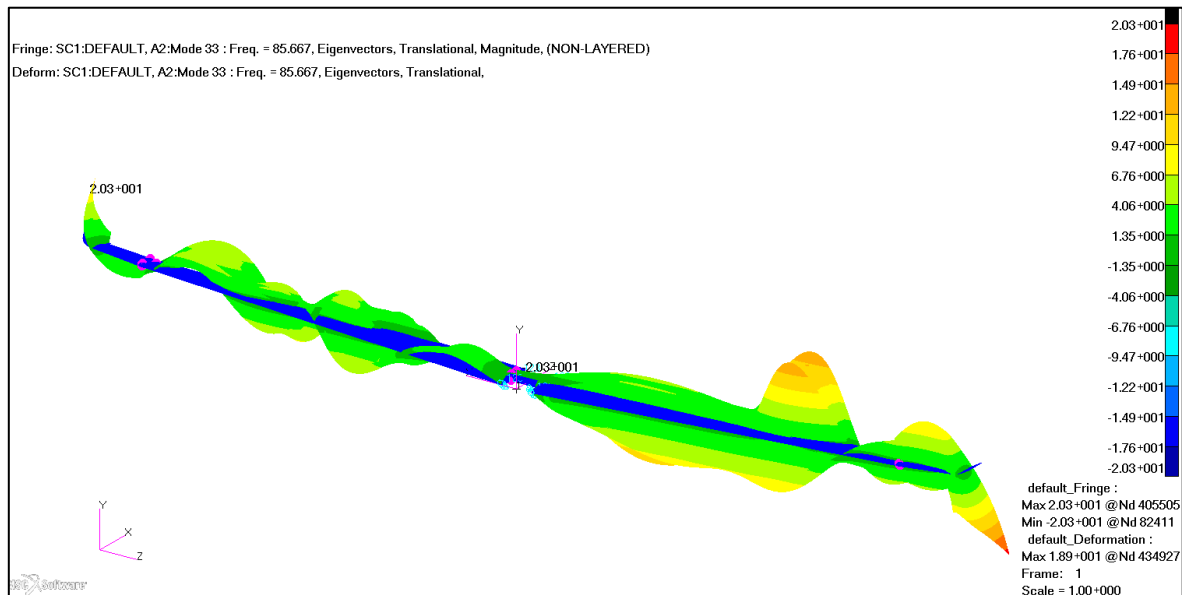
Mód 31: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 82,635 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



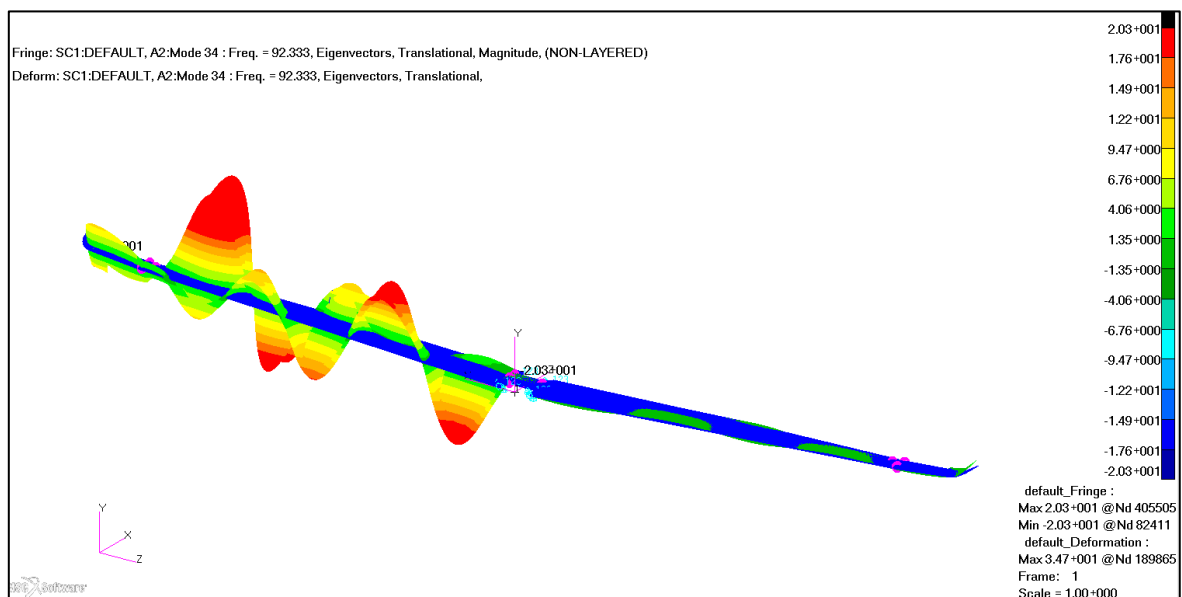
Mód 32: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 85,337 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázené místními izolovanými vibracemi na odtokové hraně a krutem.



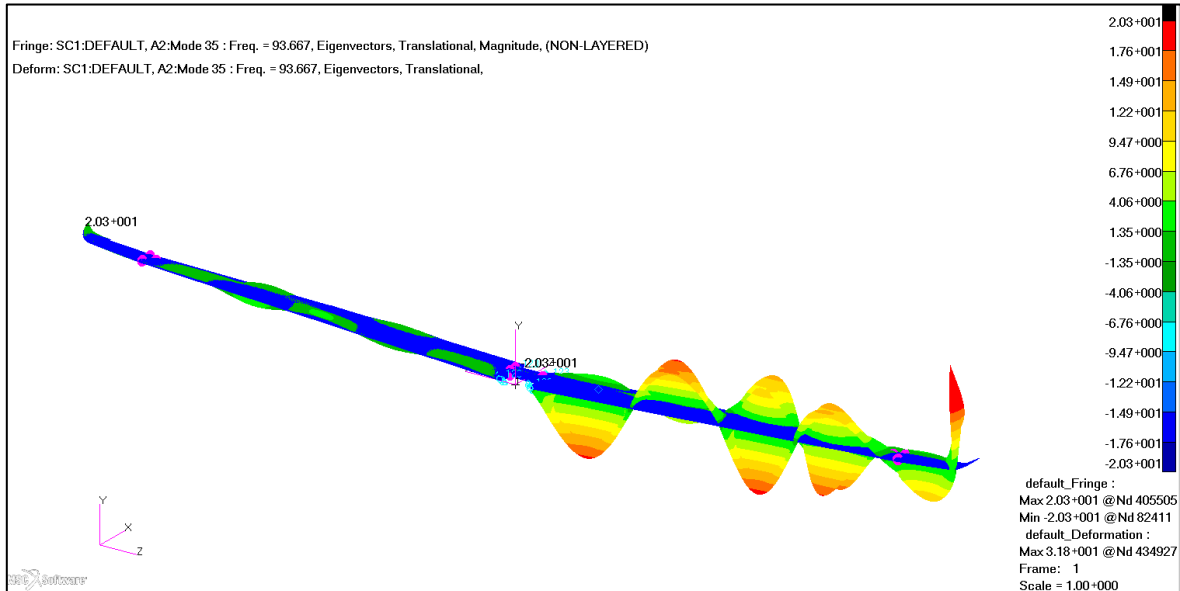
Mód 33: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 85,667 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázené místními izolovanými vibracemi na odtokové hraně a krutem.



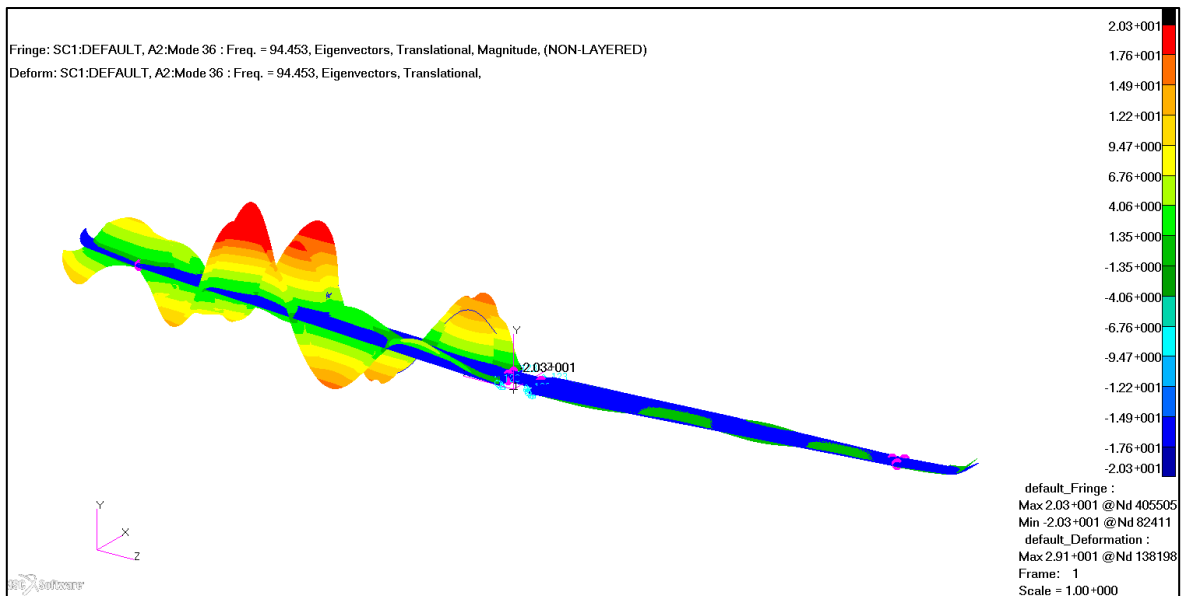
Mód 34: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 92,333 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb pravého křídla měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla přecházející v krut. U levého křídla byl symetrický vícenásobný ohyb.



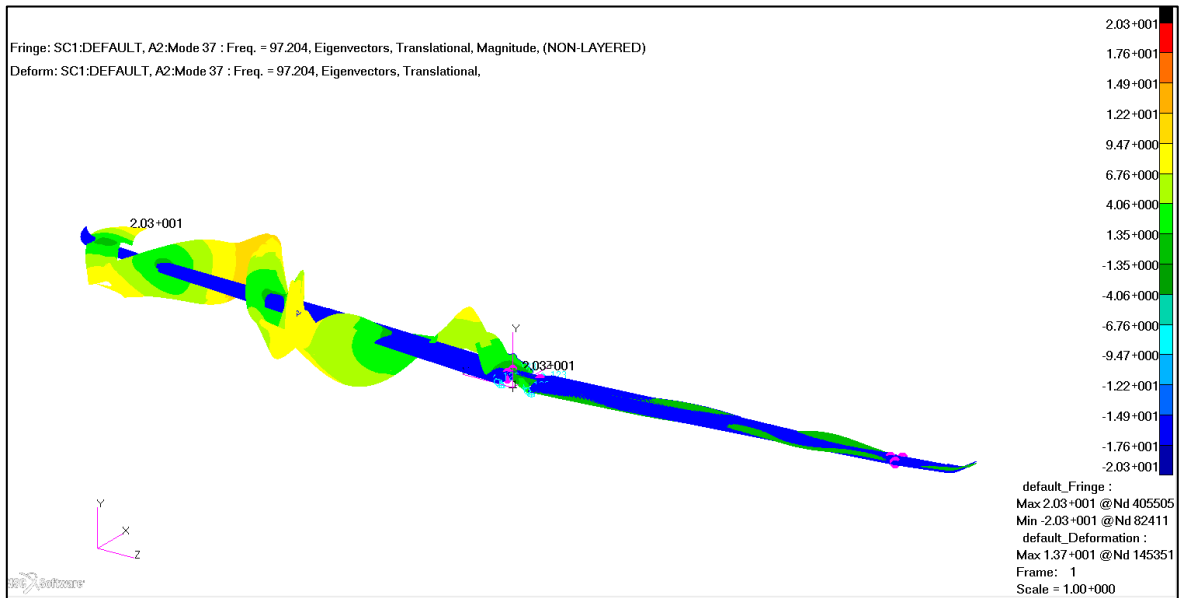
Mód 35: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 93,667 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



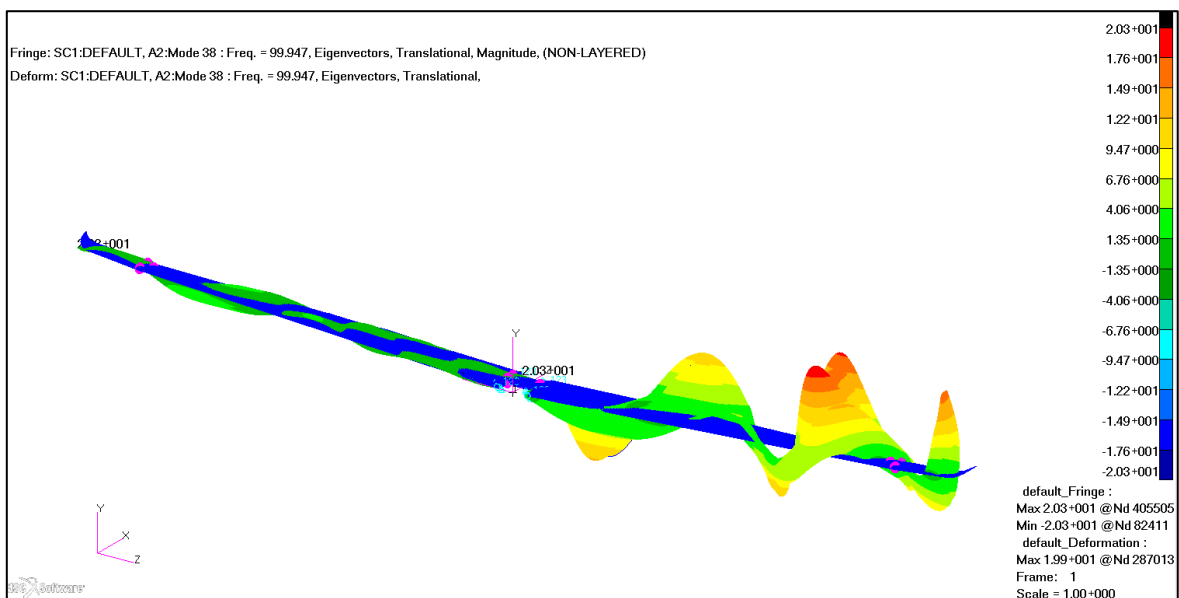
Mód 36: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 94,453 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb měnicí se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



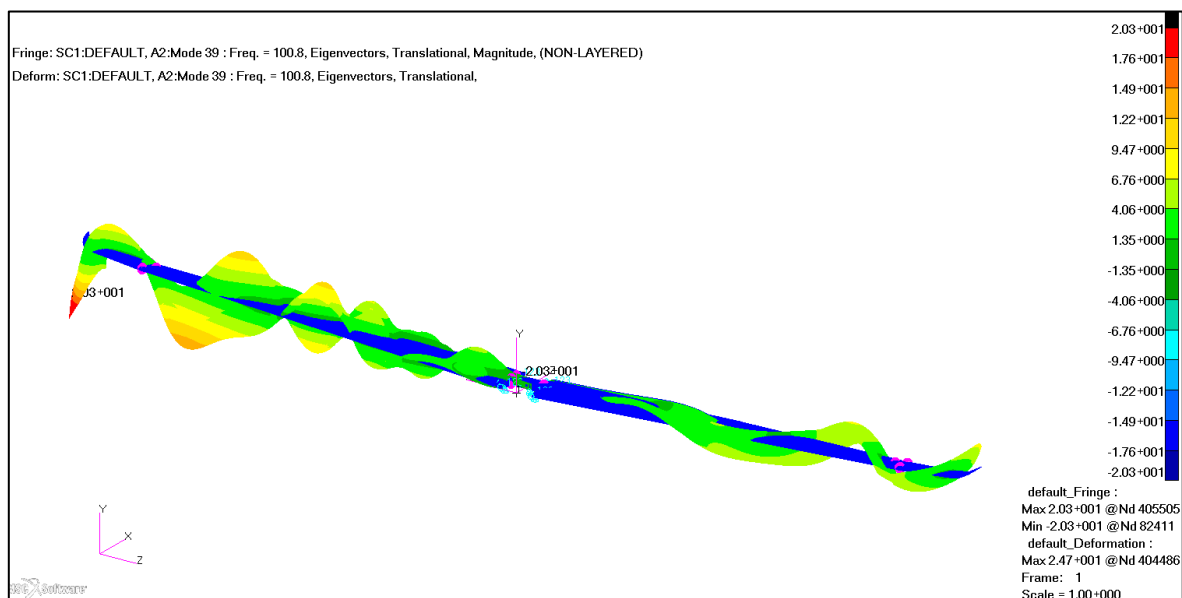
Mód 37: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 97,204 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



Mód 38: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 99,947 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený místními izolovanými vibracemi na odtokové hraně a krutem.



Mód 39: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 100,8 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru měnící se jak po hloubce profilu, tak po rozpětí křídla doprovázený krutem.



PŘÍLOHA 11: Kompletní hodnoty rozměrů odečtené z podrobného MKP modelu

Pásnice pravého křídla

Řez	Poloha	Plocha horní pásnice	Plocha dolní pásnice	Šířka horní pásnice	Šířka dolní pásnice	Tloušťka horní pásnice	Tloušťka dolní pásnice	Výška
i	z	A_{HP}	A_{DP}	$\check{S}_{HP}$	$\check{S}_{DP}$	tl_{HP}	tl_{HP}	h_P
[–]	[m]	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0	1373,46	1323,77	66,017	66,017	20,805	20,052	124,422
2	0,8715	1665,52	1709,49	89,917	89,978	18,523	18,999	132,473
3	1,743	1275,42	1317,53	82,214	83,302	15,513	15,816	126,576
4	2,6145	931,479	971,334	74,508	74,614	12,502	13,018	120,679
5	3,486	551,188	578,659	57,366	57,559	9,608	10,053	114,781
6	4,3575	320,37	333,467	40,568	40,624	7,897	8,209	106,524
7	5,229	218,127	222,44	27,896	27,903	7,819	7,972	94,906
8	6,1005	193,862	196,618	25,517	25,522	7,597	7,704	83,241
9	6,972	207,662	207,439	23,138	23,141	8,975	8,964	77,506
10	7,8435	260,134	238,045	48,788	48,887	5,332	4,869	60,625

Pásnice levého křídla

Řez	Poloha	Plocha horní pásnice	Plocha dolní pásnice	Šířka horní pásnice	Šířka dolní pásnice	Tloušťka horní pásnice	Tloušťka dolní pásnice	Výška
i	z	A_{HP}	A_{DP}	$\check{S}_{HP}$	$\check{S}_{DP}$	tl_{HP}	tl_{HP}	h_P
[–]	[m]	[mm ²]	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0	1372,72	1369,99	85,119	85,003	16,127	16,117	122,766
2	0,8715	2022,16	2018,51	115,245	115,639	17,547	17,455	132,007

Stojina pravého křídla

Řez	Poloha	Tloušťka	Výška
i	z	tl_s	h_s
[–]	[m]	[mm]	[mm]
2	0,8715	2,574	94,951
3	1,743	2,574	95,246
4	2,6145	2,574	95,159
5	3,486	1,716	95,119
6	4,3575	1,716	90,418
7	5,229	0,858	79,115

Řez	Poloha	Tloušťka	Výška
i	z	tl_s	h_s
$[-]$	$[m]$	$[mm]$	$[mm]$
8	6,1005	0,858	67,940
9	6,972	0,858	59,567
10	7,8435	0,858	50,424

Stojina levého křídla

Řez	Poloha	Tloušťka	Výška
i	z	tl_s	h_s
$[-]$	$[m]$	$[mm]$	$[mm]$
2	0,8715	1,716	97,005

Zadní nosník přední

Řez	Poloha	Šířka	Tloušťka	Vzdálenost	Úhel
i	z	$š_{ZNP}$	tl_{ZNP}	x_{ZNP}	α
$[-]$	$[m]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[^\circ]$
2	0,8715	87,098	1,232	258,116	27,184
3	1,743	83,177	1,232	247,439	27,289
4	2,6145	79,257	1,232	236,761	27,404
5	3,486	75,337	1,232	226,065	27,531
6	4,3575	44,758	0,924	238,472	5,492
7	5,229	39,893	0,924	208,612	5,48
8	6,1005	35,029	0,924	178,702	4,993
9	6,972	30,164	0,924	148,793	4,932
10	7,8435	29,045	0,616	122,461	3,563

Zadní nosník zadní

Řez	Poloha	Šířka	Tloušťka	Vzdálenost	Úhel
i	z	$š_{ZNZ}$	tl_{ZNZ}	x_{ZNZ}	α
$[-]$	$[m]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[^\circ]$
2	0,8715	55,958	1,232	301,654	22,933
3	1,743	53,571	1,232	288,632	23,023
4	2,6145	51,184	1,232	275,609	23,121
5	3,486	48,796	1,232	262,557	23,229

Zadní nosník spodní

Řez	Poloha	Šířka	Tloušťka	Vzdálenost	
i	z	$\bar{s}_{ZNS}$	tl_{ZNS}	x_{ZNZ}	y_{ZNS}
$[-]$	$[m]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$
2	0,8715	12,216	1,232	283,717	51,279
3	1,743	11,142	1,232	271,695	49,026
4	2,6145	10,068	1,232	259,673	46,772
5	3,486	8,994	1,232	247,651	44,16

Rozměry dutin

Řez	Poloha	Plocha přední dutiny	Plocha zadní dutiny	Délka potahu			Výška		
i	z	U_1	U_2	s_1	s_2	s_3	h_1	h_2	b
$[-]$	$[m]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$	$[mm]$
1	0	34605	32892	717,51	336,09	323,15	132,47	41,512	322,02
2	0,8715	31520	30100	684,42	321,69	309,32	126,57	39,663	308,24
3	1,743	28578	27430	651,33	307,29	295,49	120,67	37,814	294,46
4	2,6145	25780	24885	618,23	292,89	281,66	114,78	35,965	280,69
5	3,486	22339	20389	576,26	246,00	236,43	106,52	44,758	235,86
6	4,3575	18126	15819	521,61	215,25	206,76	94,906	39,893	206,25
7	5,229	14348	11823	466,96	184,50	177,08	83,241	35,029	176,64
8	6,1005	11004	8402	412,32	153,75	147,43	71,506	30,164	147,03
9	6,972	7645	6048	341,05	126,11	121,47	60,626	29,045	121,2
10	7,8435	34605	32892	717,51	336,09	323,15	132,47	41,512	322,02

PŘÍLOHA 12: Mezivýpočty modulu pružnosti v tahu

Výsledné kvadratické momenty průřezů

Řez	Poloha	Pravé křídlo		Levé křídlo	
i	z	J_X	J_Y	J_X	J_Y
[—]	[m]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]	[mm ⁴]
1	0	7,39E+06	9,80E+05	7,39E+06	9,80E+05
2	0,8715	1,13E+07	1,12E+07	1,36E+07	1,36E+07
3	1,743	8,30E+06	9,55E+06	8,30E+06	9,55E+06
4	2,6145	5,82E+06	7,70E+06	5,82E+06	7,70E+06
5	3,486	3,33E+06	6,16E+06	3,33E+06	6,16E+06
6	4,3575	1,70E+06	3,60E+05	1,70E+06	3,60E+05
7	5,229	8,76E+05	2,13E+05	8,76E+05	2,13E+05
8	6,1005	5,85E+05	1,40E+05	5,85E+05	1,40E+05
9	6,972	5,07E+05	8,94E+04	5,07E+05	8,94E+04
10	7,8435	3,98E+05	1,21E+05	3,98E+05	1,21E+05

Výsledné ohybové tuhosti

Řez	Poloha	Pravé křídlo		Levé křídlo	
i	z	$J_X \cdot E$	$J_Y \cdot E$	$J_X \cdot E$	$J_Y \cdot E$
[—]	[m]	[MPa · mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
1	0	1,52E+12	2,63E+11	1,52E+12	2,63E+11
2	0,8715	1,11E+12	3,88E+11	1,34E+12	6,13E+11
3	1,743	8,08E+11	2,93E+11	8,08E+11	2,93E+11
4	2,6145	5,61E+11	2,11E+11	5,61E+11	2,11E+11
5	3,486	3,16E+11	1,36E+11	3,16E+11	1,36E+11
6	4,3575	1,61E+11	1,38E+10	1,61E+11	1,38E+10
7	5,229	8,43E+10	6,17E+09	8,43E+10	6,17E+09
8	6,1005	5,64E+10	4,26E+09	5,64E+10	4,26E+09
9	6,972	4,93E+10	3,13E+09	4,93E+10	3,13E+09
10	7,8435	3,87E+10	1,03E+10	3,87E+10	1,03E+10

Výsledný modul pružnosti v tahu

Řez	Poloha	Pravé křídlo		Levé křídlo	
i	z	E_X	E_Y	E_X	E_Y
[—]	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	1,52E+12	2,63E+11	1,52E+12	2,63E+11
2	0,8715	1,11E+12	3,88E+11	1,34E+12	6,13E+11
3	1,743	8,08E+11	2,93E+11	8,08E+11	2,93E+11
4	2,6145	5,61E+11	2,11E+11	5,61E+11	2,11E+11

Řez	Poloha	Pravé křídlo		Levé křídlo	
i	z	E_x	E_y	E_x	E_y
$[-]$	$[m]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$	$[MPa]$
5	3,486	3,16E+11	1,36E+11	3,16E+11	1,36E+11
6	4,3575	1,61E+11	1,38E+10	1,61E+11	1,38E+10
7	5,229	8,43E+10	6,17E+09	8,43E+10	6,17E+09
8	6,1005	5,64E+10	4,26E+09	5,64E+10	4,26E+09
9	6,972	4,93E+10	3,13E+09	4,93E+10	3,13E+09
10	7,8435	3,87E+10	1,03E+10	3,87E+10	1,03E+10

Výsledné průřezy ploch

Řez	Poloha	Horní pásnice	Dolní pásnice	Zadní nosník přední	Zadní nosník zadní	Zadní nosník spodní	Stojina
i	z	A_H	A_D	A_{ZNP}	A_{ZNZ}	A_{ZNS}	A_S
$[-]$	$[m]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$	$[mm^2]$
1	0	2,75E+03	2,69E+03				
2	0,8715	1,67E+03	1,71E+03	1,42E+02	9,10E+01	1,99E+01	1,87E+02
3	1,743	1,28E+03	1,32E+03	1,35E+02	8,71E+01	1,81E+01	1,87E+02
4	2,6145	9,31E+02	9,71E+02	1,29E+02	8,32E+01	1,64E+01	1,87E+02
5	3,486	5,51E+02	5,79E+02	1,22E+02	7,93E+01	1,46E+01	1,55E+02
6	4,3575	3,20E+02	3,33E+02	5,46E+01			1,47E+02
7	5,229	2,18E+02	2,22E+02	4,86E+01			6,43E+01
8	6,1005	1,94E+02	1,97E+02	4,27E+01			5,52E+01
9	6,972	2,08E+02	2,07E+02	3,68E+01			4,84E+01
10	7,8435	2,60E+02	2,38E+02	1,70E+01			5,81E+01

Výsledné plošné tuhosti

Řez	Poloha	Pravé křídlo	Levé křídlo
i	z	$A \cdot E$	$A \cdot E$
$[-]$	$[m]$	$[MPa \cdot mm^2]$	$[MPa \cdot mm^2]$
1	0	5,44E+08	5,44E+08
2	0,8715	3,45E+08	4,11E+08
3	1,743	2,67E+08	2,67E+08
4	2,6145	1,98E+08	1,98E+08
5	3,486	1,20E+08	1,20E+08
6	4,3575	6,90E+07	6,90E+07
7	5,229	4,61E+07	4,61E+07
8	6,1005	4,08E+07	4,08E+07
9	6,972	4,30E+07	4,30E+07
10	7,8435	5,12E+07	5,12E+07

PŘÍLOHA 13: Výpočet polohy elastické osy

i	z	E_1	J_1	E_2	J_2
$[-]$	$[m]$	$[MPa]$	$[mm^4]$	$[MPa]$	$[mm^4]$
1	0	1,00E+05	7,39E+06	18 000	0,00E+00
2	0,8715	6,68E+04	1,11E+07	18 000	1,53E+05
3	1,743	7,21E+04	8,17E+06	18 000	1,31E+05
4	2,6145	6,97E+04	5,71E+06	18 000	1,12E+05
5	3,486	6,56E+04	3,24E+06	18 000	9,40E+04
6	4,3575	7,13E+04	1,69E+06	18 000	9,11E+03
7	5,229	6,95E+04	8,70E+05	18 000	6,45E+03
8	6,1005	7,01E+04	5,81E+05	18 000	4,37E+03
9	6,972	7,28E+04	5,05E+05	18 000	2,79E+03
10	7,8435	9,05E+04	3,97E+05	18 000	1,19E+03

PŘÍLOHA 14: Mezivýpočty modulu pružnosti ve smyku

Výsledné momenty tuhosti dutin

<i>i</i>	<i>z</i>	Přední dutina		Zadní dutina	
		J_K	$J_K \cdot G$	J_K	$J_K \cdot G$
[–]	[m]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
2	0,8715	3,72E+02	6,77E+05	2,59E+02	4,71E+05
3	1,743	3,56E+02	6,46E+05	2,48E+02	4,51E+05
4	2,6145	3,39E+02	6,16E+05	2,36E+02	4,30E+05
5	3,486	3,22E+02	5,85E+05	2,25E+02	4,09E+05
6	4,3575	2,99E+02	5,44E+05	2,20E+02	3,99E+05
7	5,229	2,68E+02	4,88E+05	1,95E+02	3,54E+05
8	6,1005	2,37E+02	4,31E+05	1,70E+02	3,09E+05
9	6,972	2,06E+02	3,75E+05	1,45E+02	2,64E+05
10	7,8435	1,73E+02	3,15E+05	1,27E+02	2,31E+05

Výsledné momenty tuhosti pravé horní pásnice

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	J_K	$J_K \cdot G$
[–]	[m]	[–]	[–]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
1	0	8,178334361	0,307	2,92E+05	1,12E+10
2	0,8715	4,854371203	0,289	1,65E+05	6,35E+09
3	1,743	5,299537797	0,293	8,99E+04	3,46E+09
4	2,6145	5,959814514	0,299	4,35E+04	1,67E+09
5	3,486	5,970481861	0,299	1,52E+04	5,85E+08
6	4,3575	5,137068465	0,292	5,83E+03	2,24E+08
7	5,229	3,567585929	0,272	3,63E+03	1,40E+08
8	6,1005	3,358663838	0,27	3,02E+03	1,16E+08
9	6,972	2,578069382	0,249	4,17E+03	1,60E+08
10	7,8435	9,1501647	0,309	2,29E+03	8,79E+07

Výsledné momenty tuhosti levé horní pásnice

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	J_K	$J_K \cdot G$
[–]	[m]	[–]	[–]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
2	0,8715	6,567909587	0,303	1,89E+05	7,26E+09

Výsledné momenty tuhosti pravé dolní pásnice

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[<i>m</i>]	[–]	[–]	[<i>mm</i> ⁴]	[<i>MPa</i> · <i>mm</i> ⁴]
1	0	8,350781487	0,308	2,75E+05	1,06E+10
2	0,8715	4,735933531	0,288	1,78E+05	6,84E+09
3	1,743	5,266822668	0,293	9,66E+04	3,71E+09
4	2,6145	5,731549597	0,298	4,91E+04	1,89E+09
5	3,486	5,725372769	0,298	1,74E+04	6,70E+08
6	4,3575	4,948943602	0,291	6,54E+03	2,51E+08
7	5,229	3,500168176	0,272	3,85E+03	1,48E+08
8	6,1005	3,312883276	0,27	3,15E+03	1,21E+08
9	6,972	2,581510136	0,249	4,15E+03	1,60E+08
10	7,8435	10,03986124	0,312	1,76E+03	6,77E+07

Výsledné momenty tuhosti levé dolní pásnice

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[<i>m</i>]	[–]	[–]	[<i>mm</i> ⁴]	[<i>MPa</i> · <i>mm</i> ⁴]
2	0,8715	6,624859523	0,303	1,86E+06	7,17E+09

Výsledné momenty tuhosti stojiny

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[<i>m</i>]	[–]	[–]	[<i>mm</i> ⁴]	[<i>MPa</i> · <i>mm</i> ⁴]
2	0,8715	48,32505709	0,333	2,40E+02	4,36E+05
3	1,743	48,47524614	0,333	2,41E+02	4,37E+05
4	2,6145	48,43093929	0,333	2,40E+02	4,37E+05
5	3,486	58,51038626	0,333	1,36E+02	2,47E+05
6	4,3575	55,618593	0,333	1,29E+02	2,35E+05
7	5,229	97,33108526	0,333	1,41E+01	2,57E+04
8	6,1005	83,58298588	0,333	1,22E+01	2,21E+04
9	6,972	73,28229392	0,333	1,07E+01	1,94E+04
10	7,8435	43,77064558	0,333	2,57E+01	4,67E+04

Výsledné momenty tuhosti zadního nosníku předního

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[m]	[–]	[–]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
2	0,8715	53,57621083	0,333	1,25E+02	4,36E+05
3	1,743	51,16430329	0,333	1,19E+02	4,37E+05
4	2,6145	48,75301088	0,333	1,13E+02	4,37E+05
5	3,486	46,34171847	0,333	1,08E+02	2,47E+05
6	4,3575	36,70905638	0,333	2,70E+01	2,35E+05
7	5,229	32,71894155	0,333	2,41E+01	2,57E+04
8	6,1005	28,7296469	0,333	2,11E+01	2,21E+04
9	6,972	24,73953207	0,333	1,82E+01	1,94E+04
10	7,8435	49,77047258	0,333	1,92E+00	4,67E+04

Výsledné momenty tuhosti zadního nosníku zadního

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[m]	[–]	[–]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
2	0,8715	34,42119917	0,333	8,01E+01	1,46E+05
3	1,743	32,95289433	0,333	7,66E+01	1,39E+05
4	2,6145	31,48458948	0,333	7,32E+01	1,33E+05
5	3,486	30,01566952	0,333	6,98E+01	1,27E+05

Výsledné momenty tuhosti zadního nosníku spodního

<i>i</i>	<i>z</i>	<i>a/b</i>	<i>k</i>	<i>J_K</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[m]	[–]	[–]	[mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
2	0,8715	7,514374514	0,304	1,60E+01	2,90E+04
3	1,743	6,853729604	0,302	1,45E+01	2,63E+04
4	2,6145	6,193084693	0,3	1,30E+01	2,36E+04
5	3,486	5,532439782	0,295	1,14E+01	2,07E+04

Výsledné smykové tuhosti

Řez	Poloha	Pravé křídlo	Levé křídlo
<i>i</i>	<i>z</i>	<i>J_K · G</i>	<i>J_K · G</i>
[–]	[m]	[MPa · mm ⁴]	[MPa · mm ⁴]
1	0	2,18E+10	2,18E+10
2	0,8715	1,32E+10	1,44E+10
3	1,743	7,17E+09	7,17E+09
4	2,6145	3,56E+09	3,56E+09
5	3,486	1,26E+09	1,26E+09
6	4,3575	4,76E+08	4,76E+08

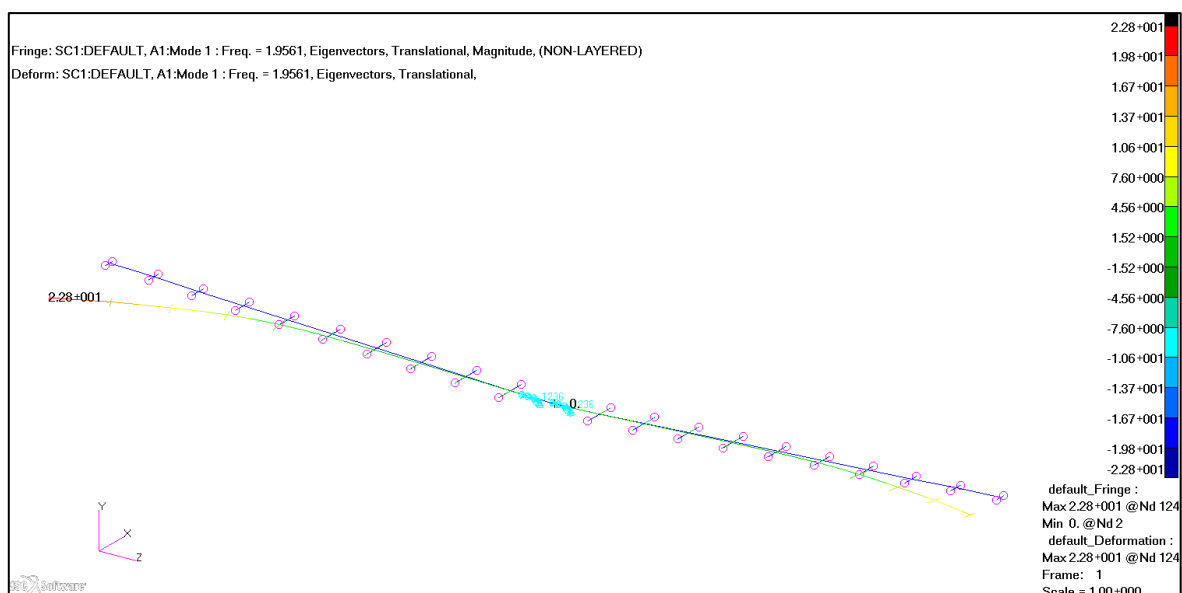
7	5,229	2,87E+08	2,87E+08
Řez	Poloha	Pravé křídlo	Levé křídlo
i	z	$J_K \cdot G$	$J_K \cdot G$
$[-]$	$[m]$	$[MPa \cdot mm^4]$	$[MPa \cdot mm^4]$
8	6,1005	2,37E+08	2,37E+08
9	6,972	3,20E+08	3,20E+08
10	7,8435	1,56E+08	1,56E+08

Výsledný modul pružnosti ve smyku

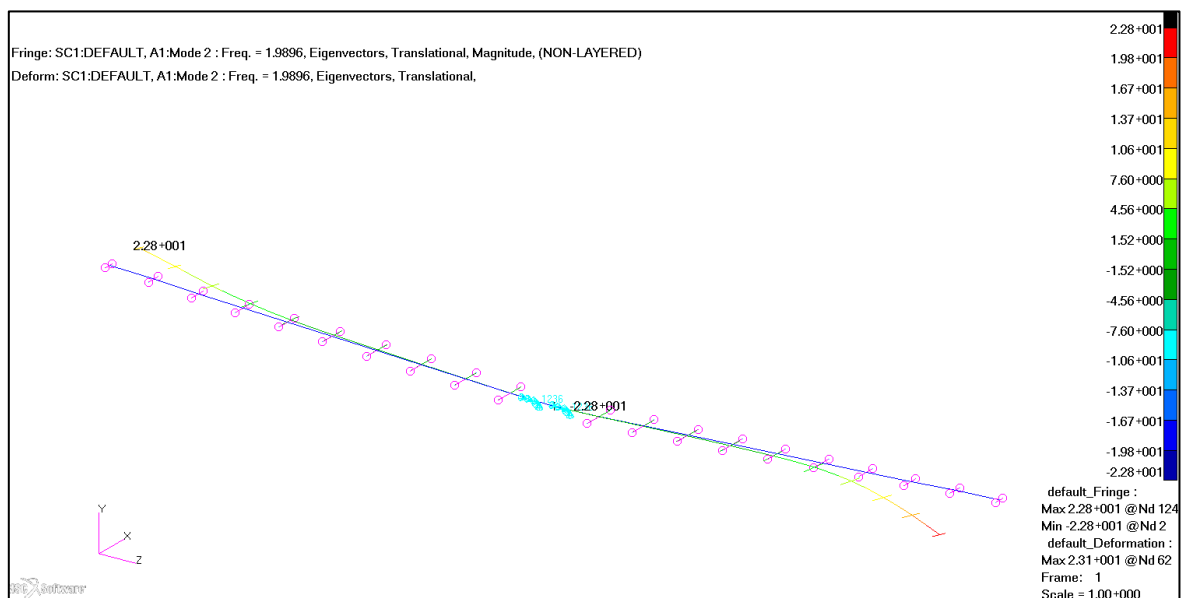
Řez	Poloha	Pravé křídlo	Levé křídlo
i	z	G	G
$[-]$	$[m]$	$[MPa]$	$[MPa]$
1	0	38461,54	38461,54
2	0,8715	38345,81	41941,48
3	1,743	38256,79	38256,79
4	2,6145	38066,60	38066,60
5	3,486	37509,66	37509,66
6	4,3575	36579,55	36579,55
7	5,229	36155,89	36155,89
8	6,1005	36018,65	36018,65
9	6,972	36859,28	36859,28
10	7,8435	35726,95	35726,95

PŘÍLOHA 15: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro nosníkový MKP model křídla

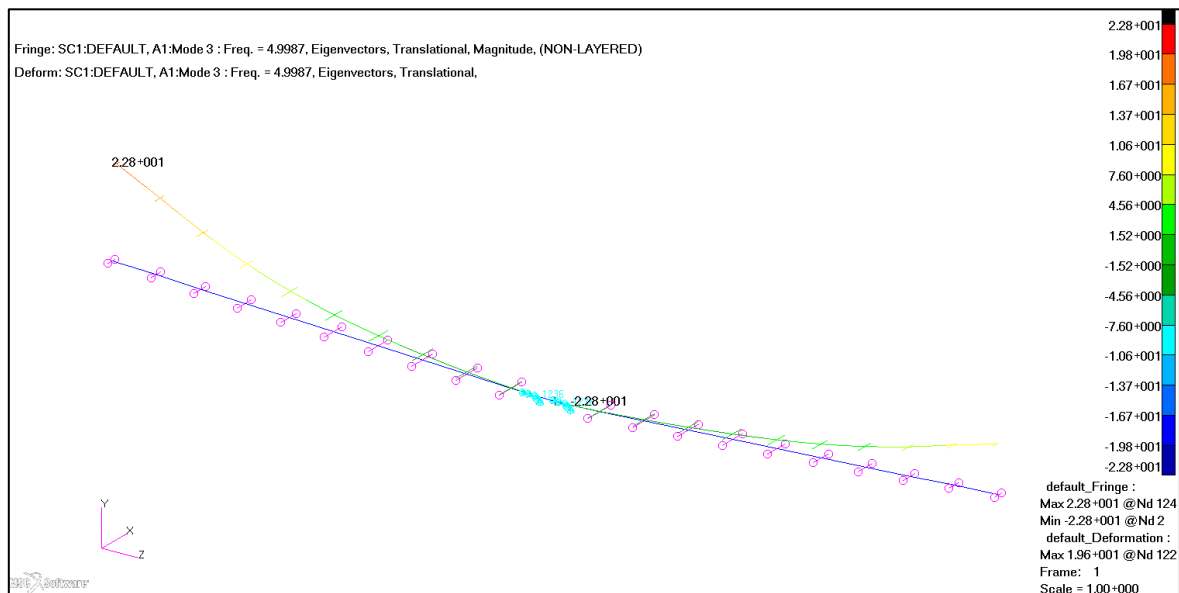
Mód 1: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 1,9561 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



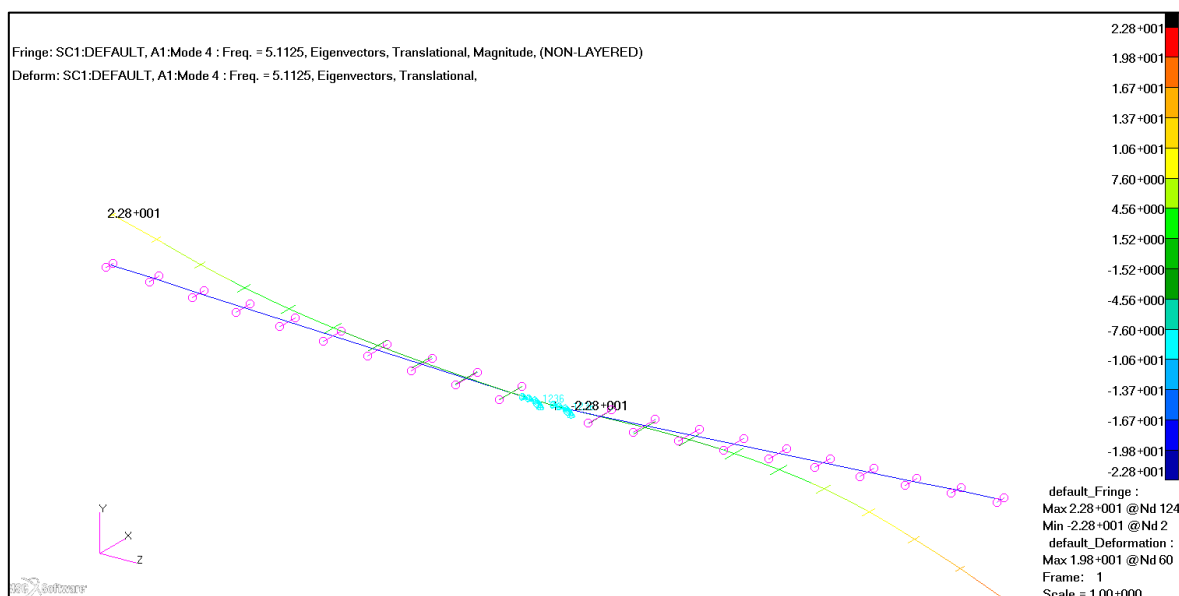
Mód 2: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 1,9896 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



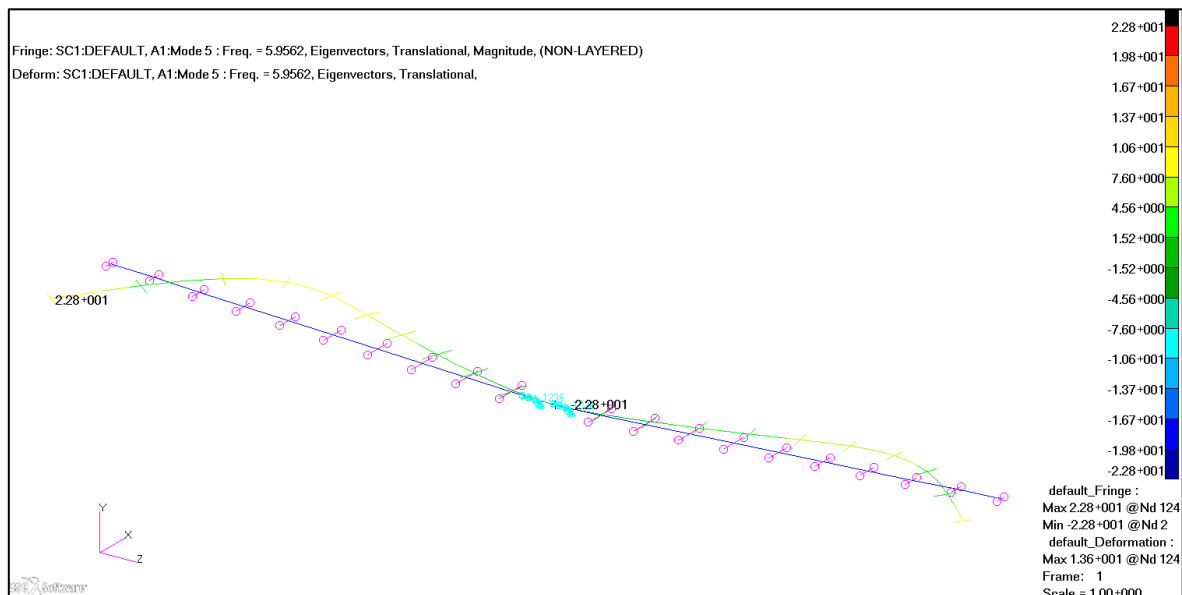
Mód 3: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 4,9987 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



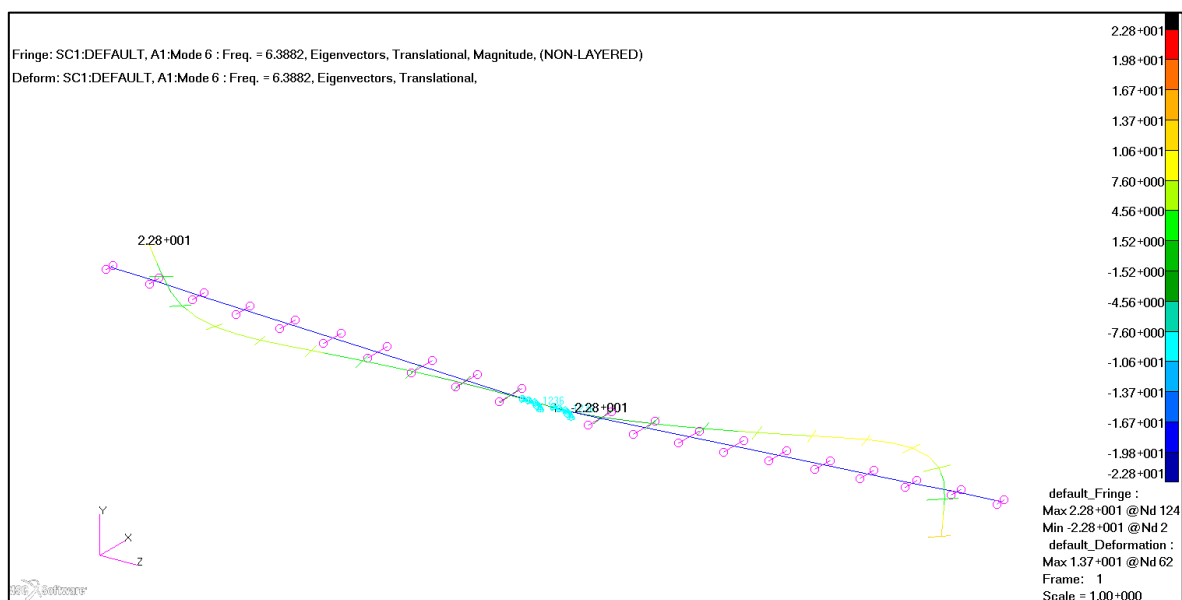
Mód 4: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 5,1125 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



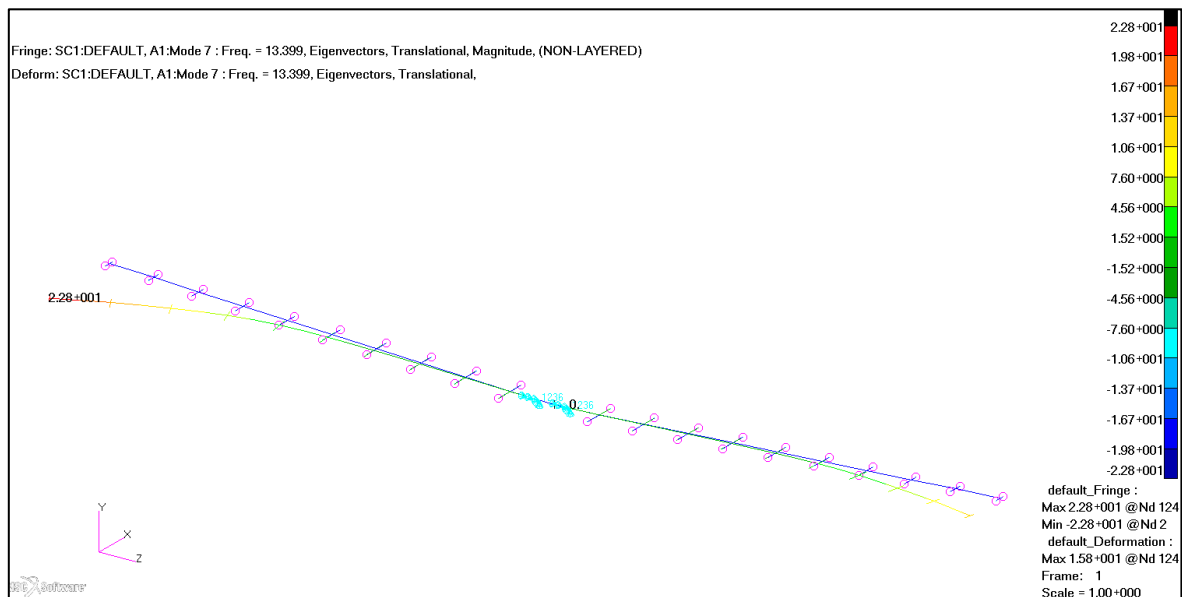
Mód 5: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 5,9562 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



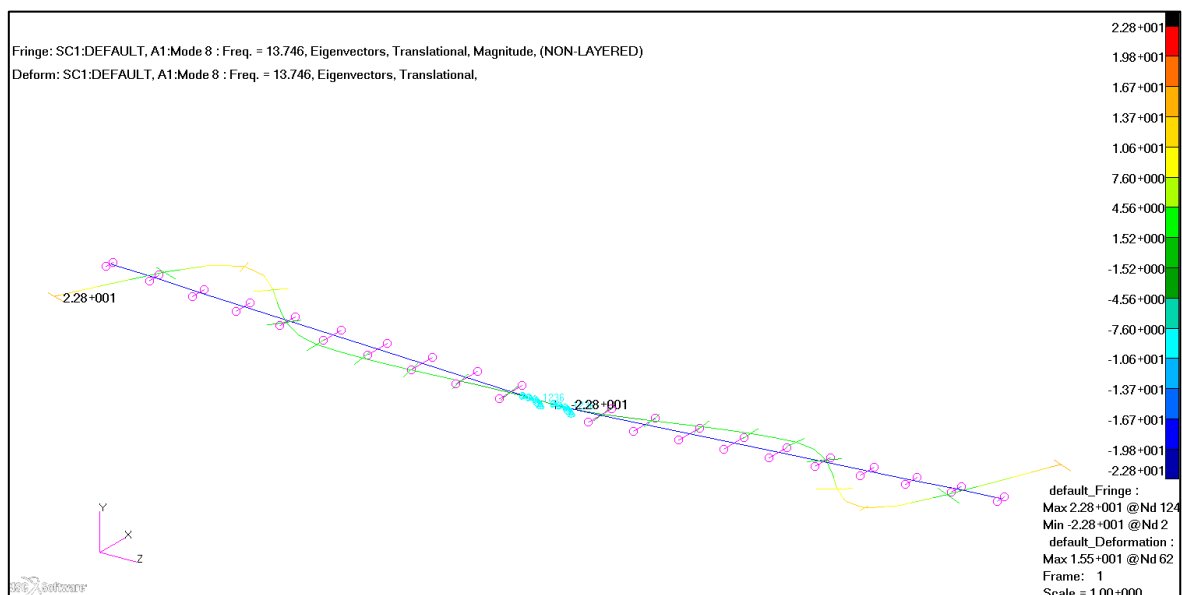
Mód 6: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 6,3882 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



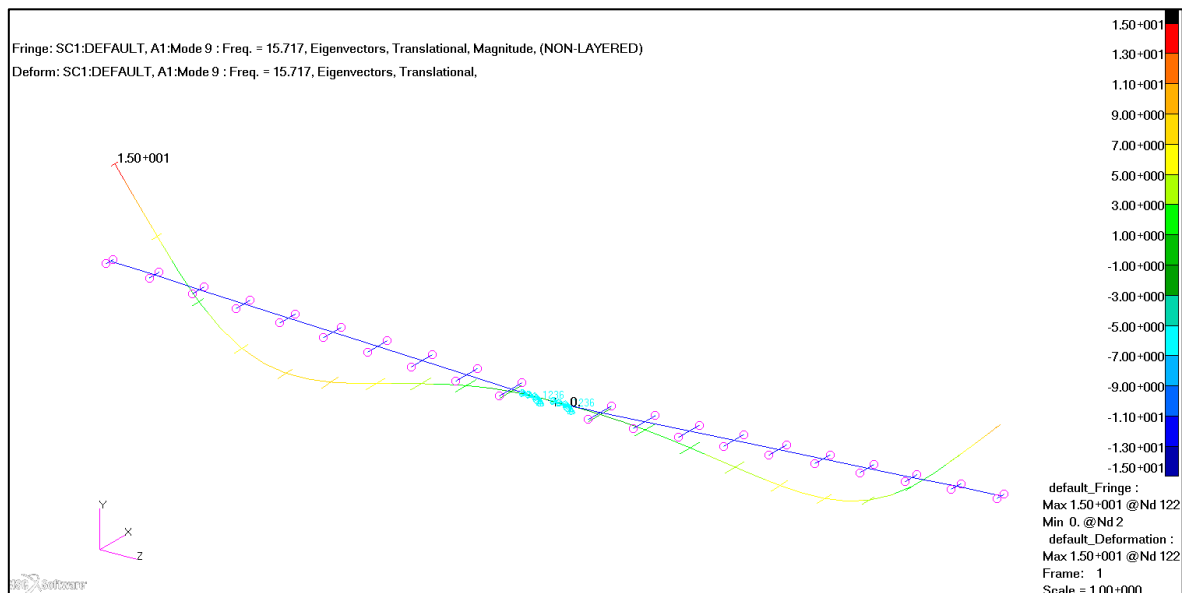
Mód 7: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 13,399 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



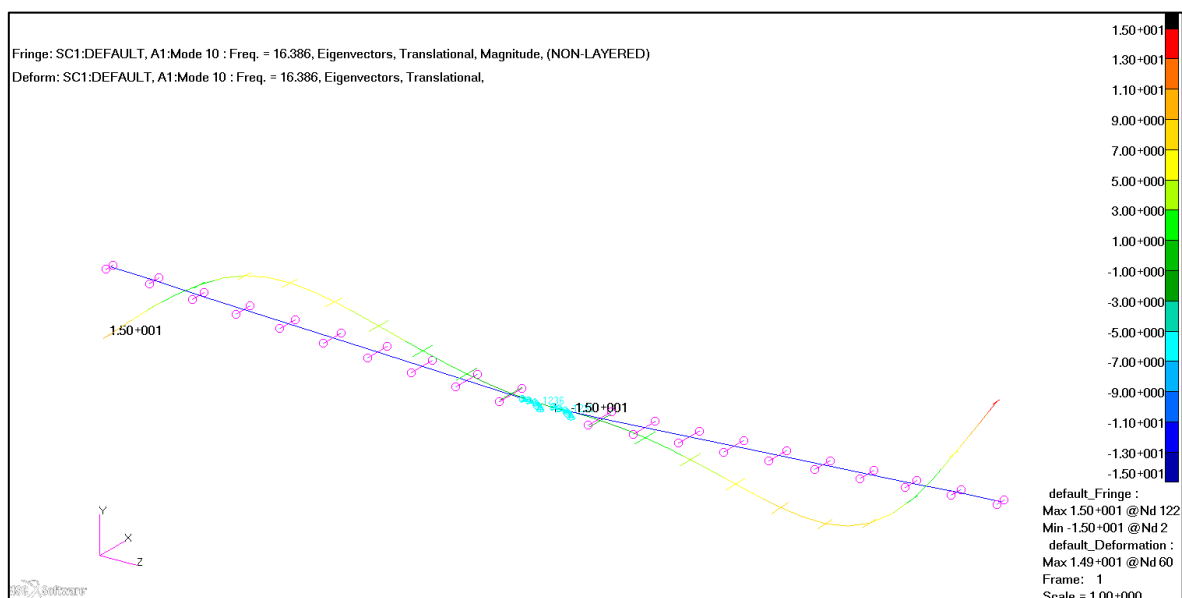
Mód 8: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 13,746 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru.



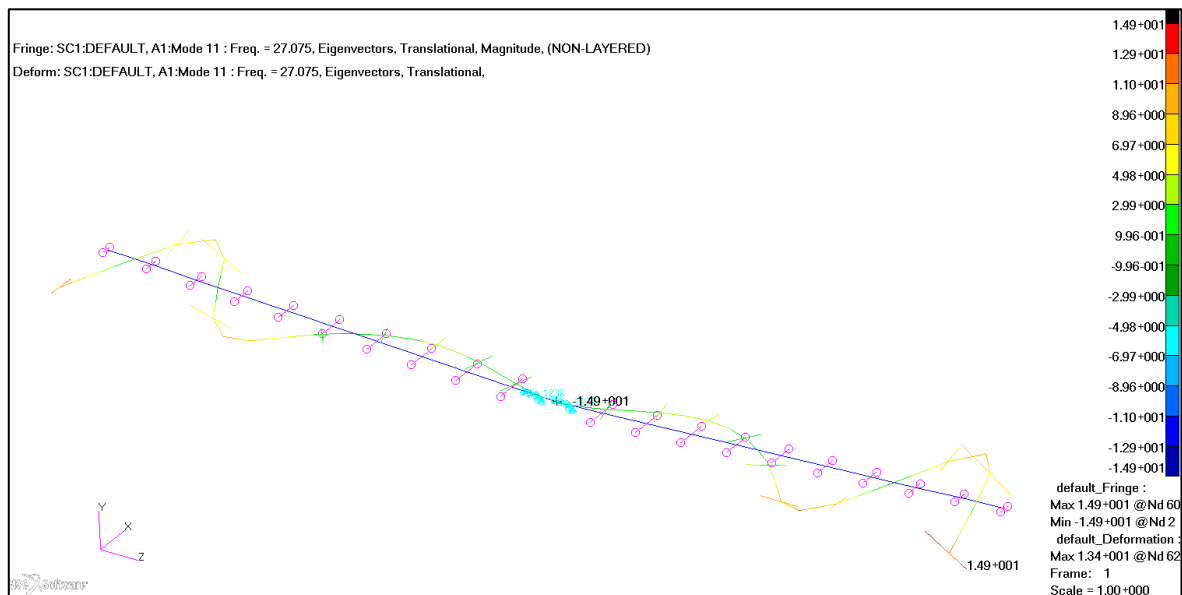
Mód 9: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 15,717 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb.



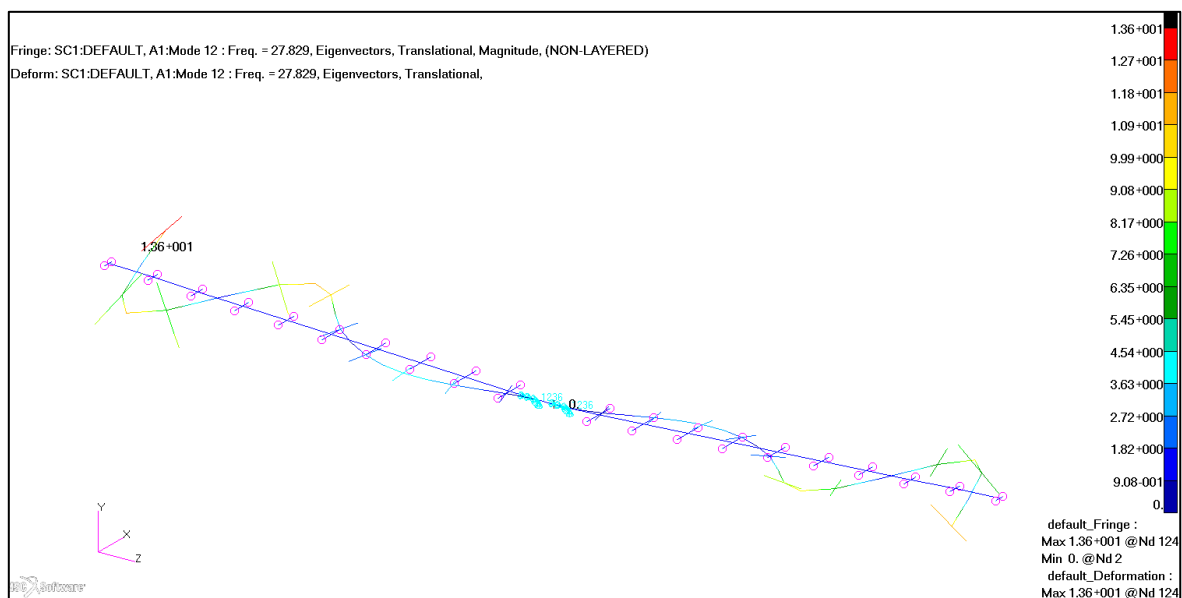
Mód 10: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 16,386 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



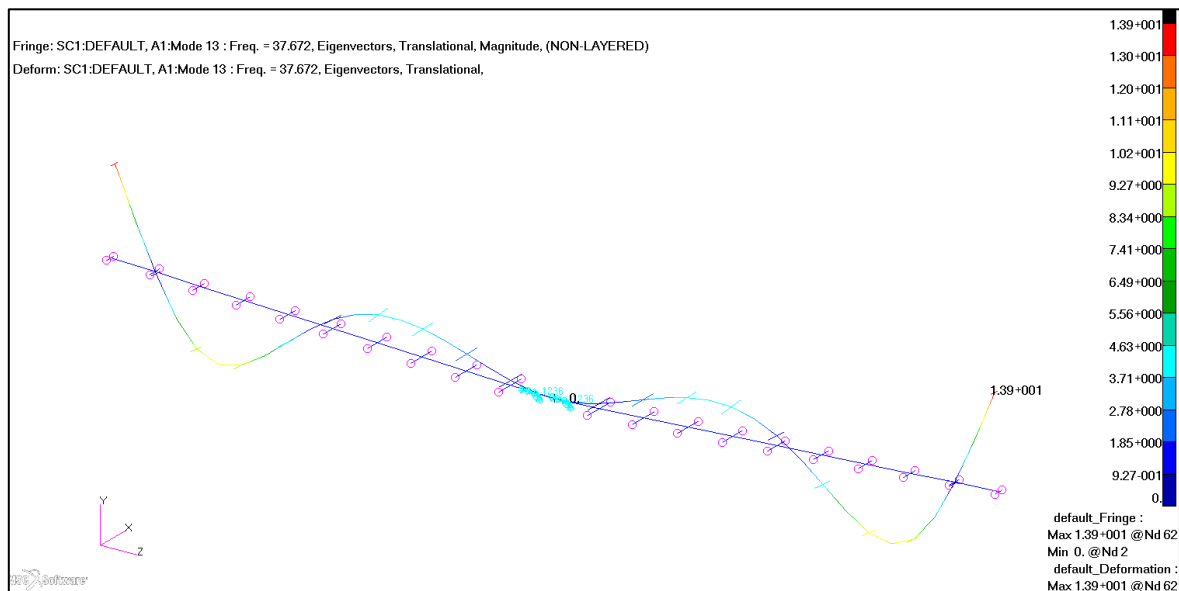
Mód 11: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 27,075 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru.



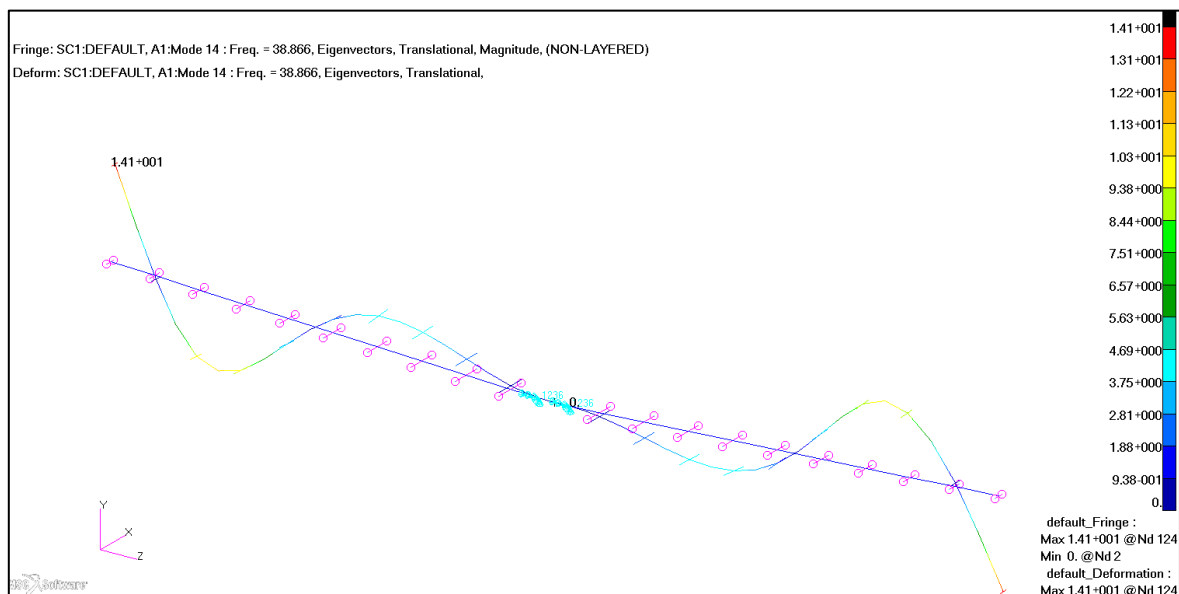
Mód 12: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 27,829 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



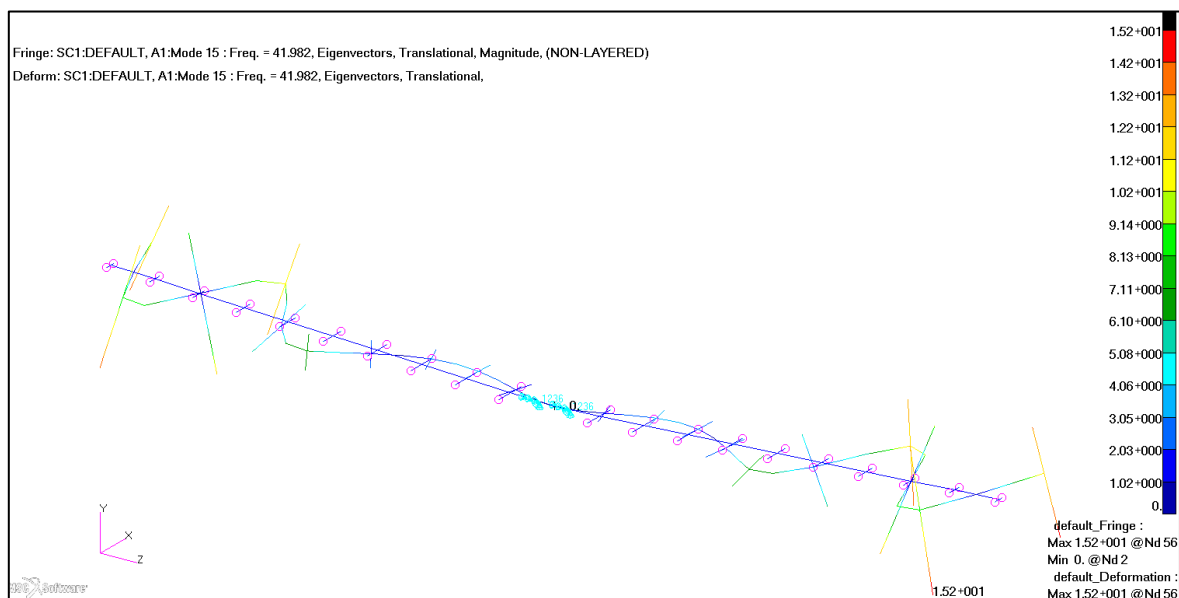
Mód 13: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 37,672 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb.



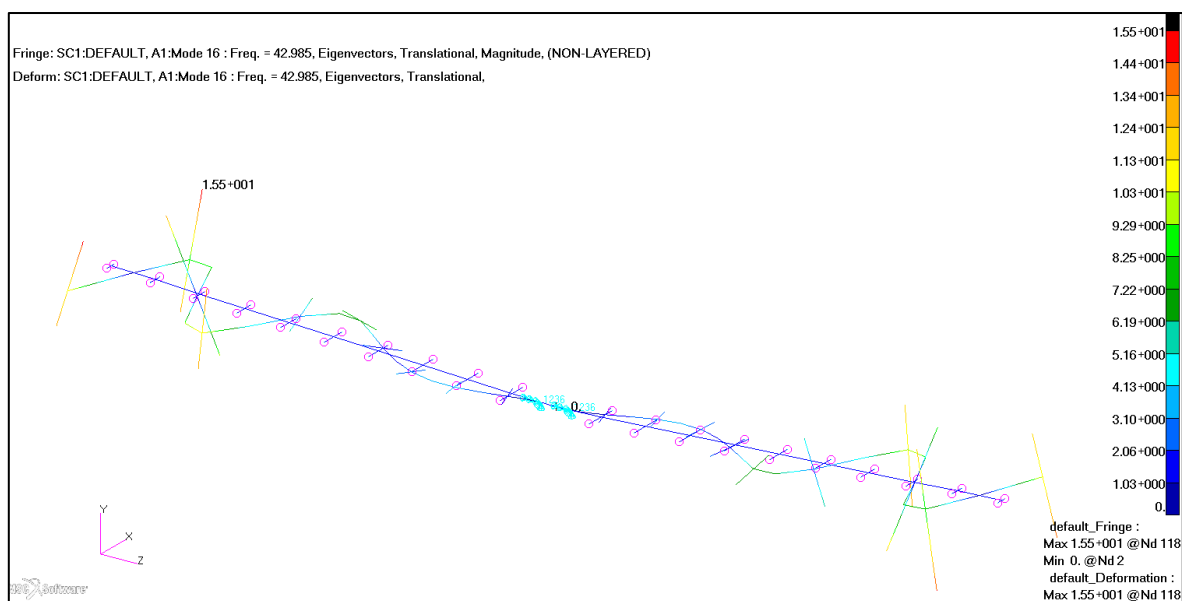
Mód 14: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 38,866 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



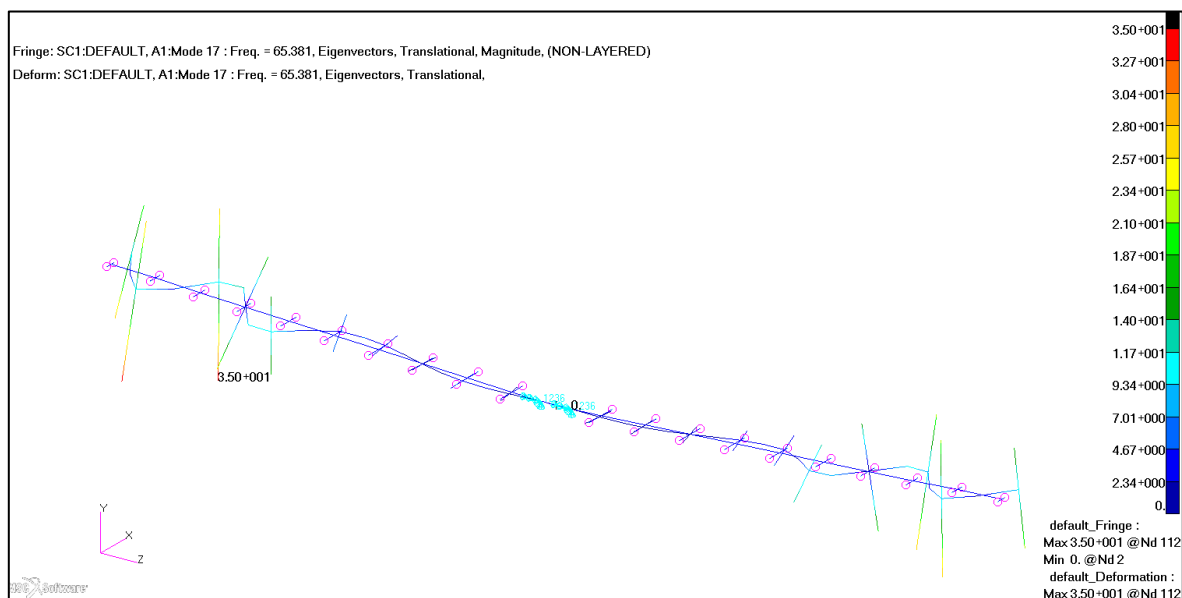
Mód 15: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 41,982 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



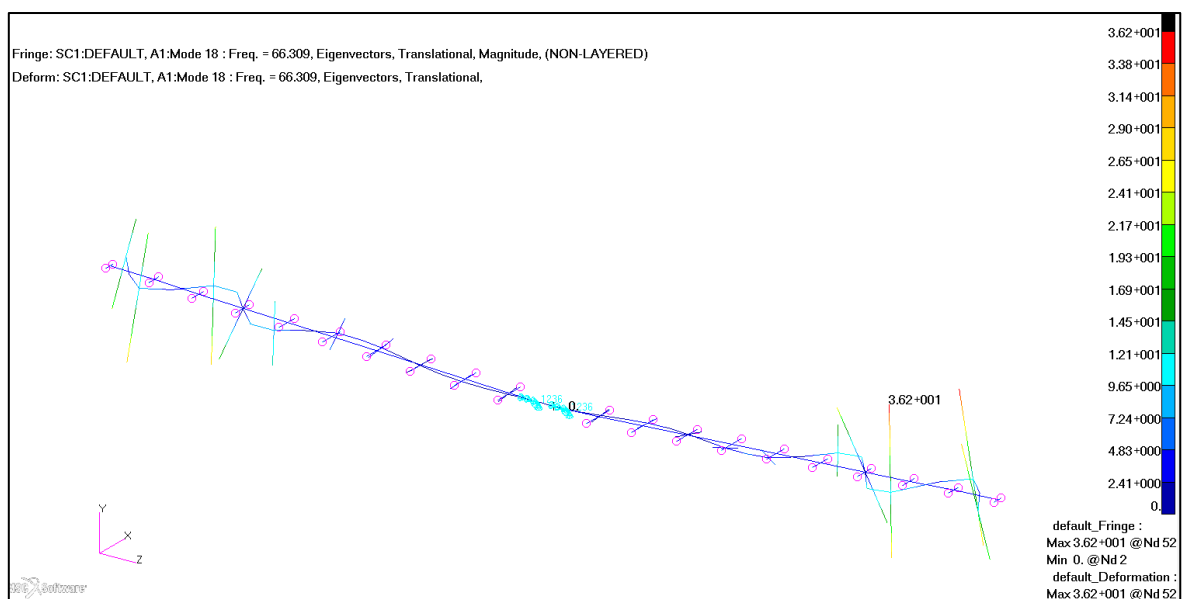
Mód 16: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 42,985 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



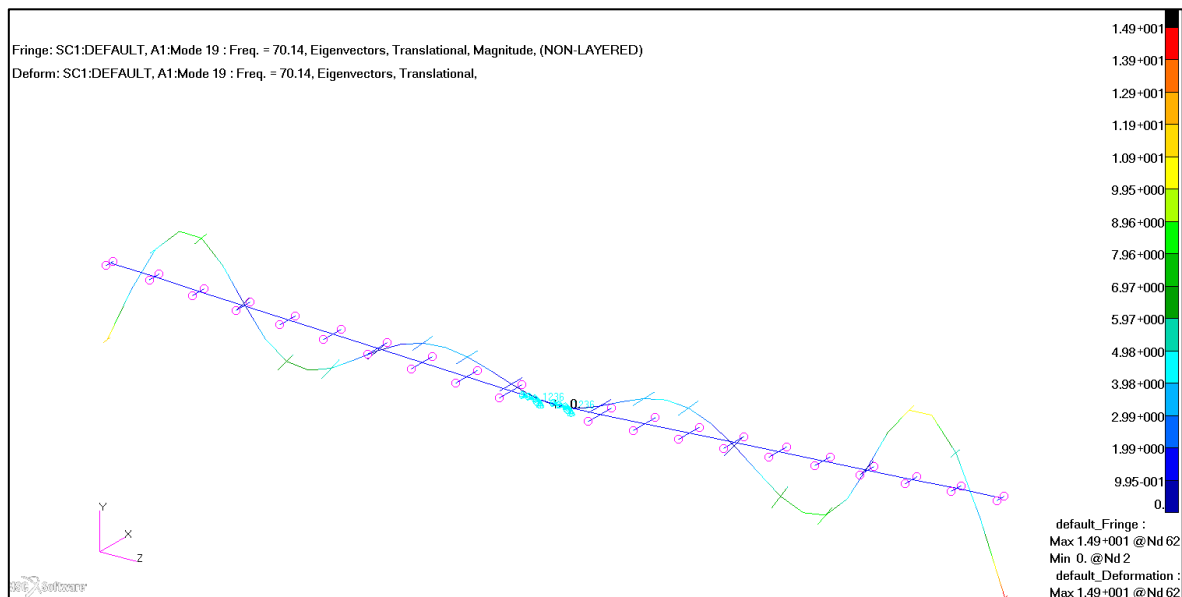
Mód 17: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 65,381 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



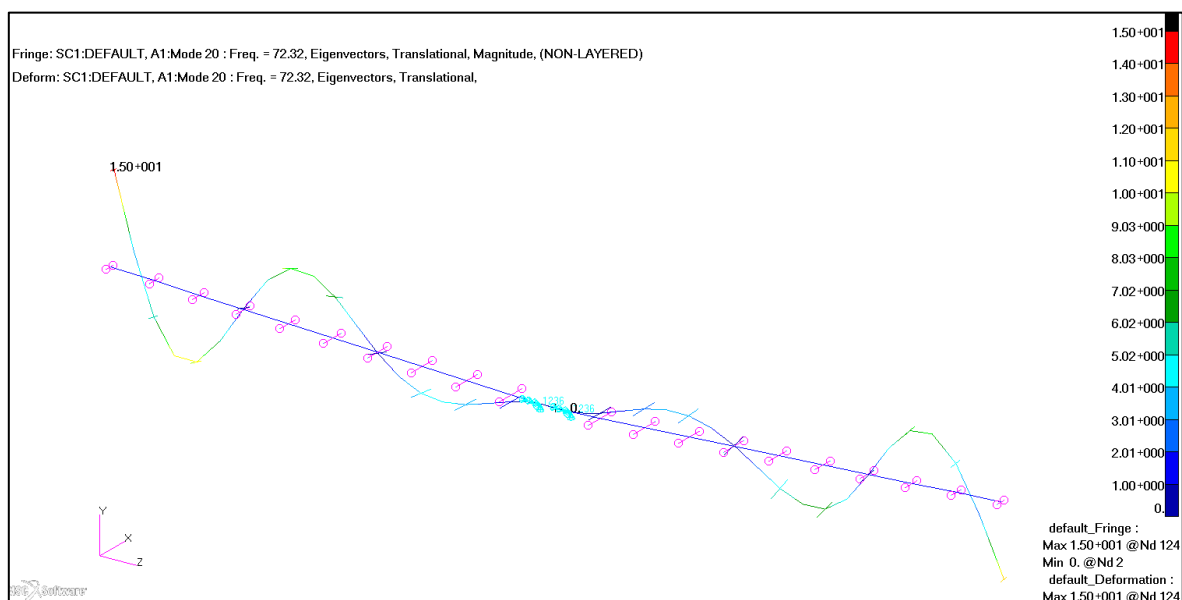
Mód 18: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 66,309 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



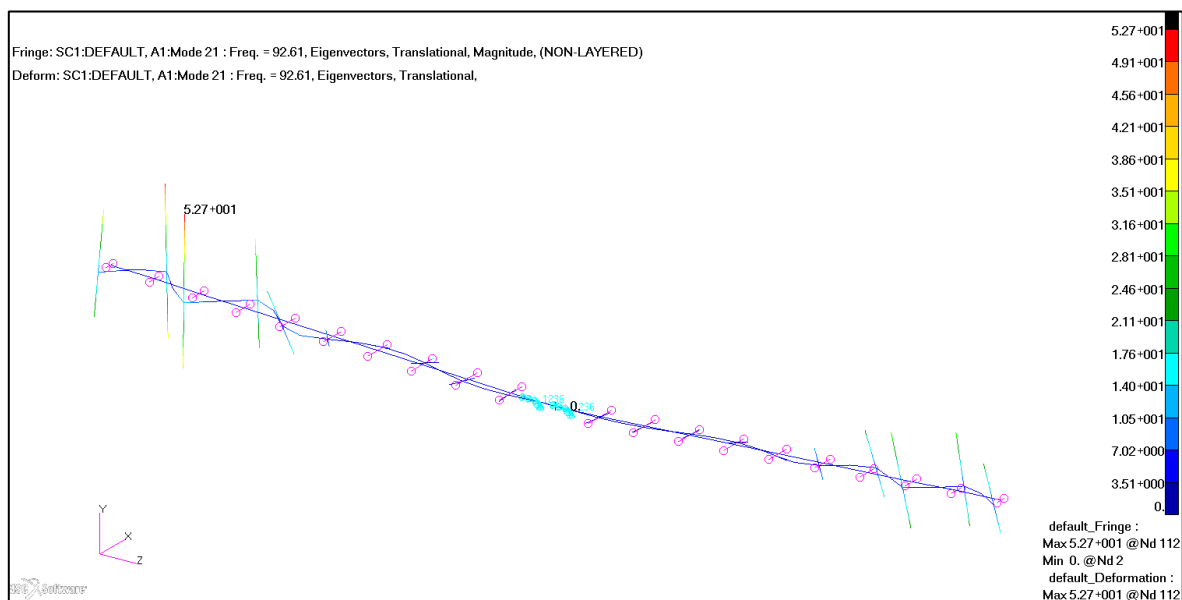
Mód 19: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 52,611 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb.



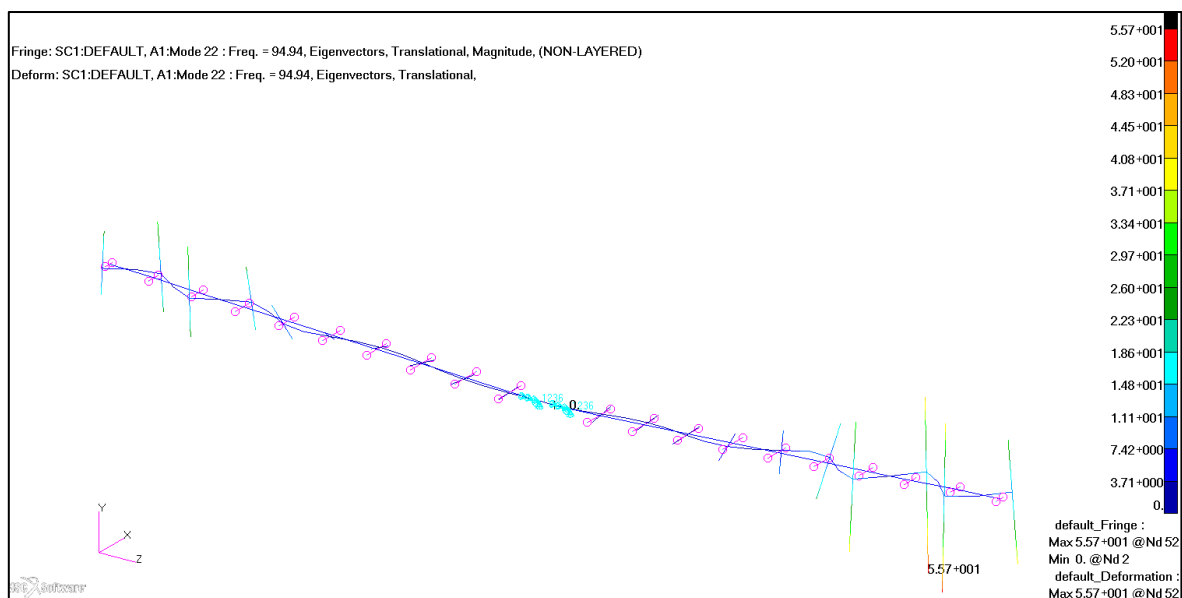
Mód 20: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 72,32 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



Mód 21: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 92,61 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.

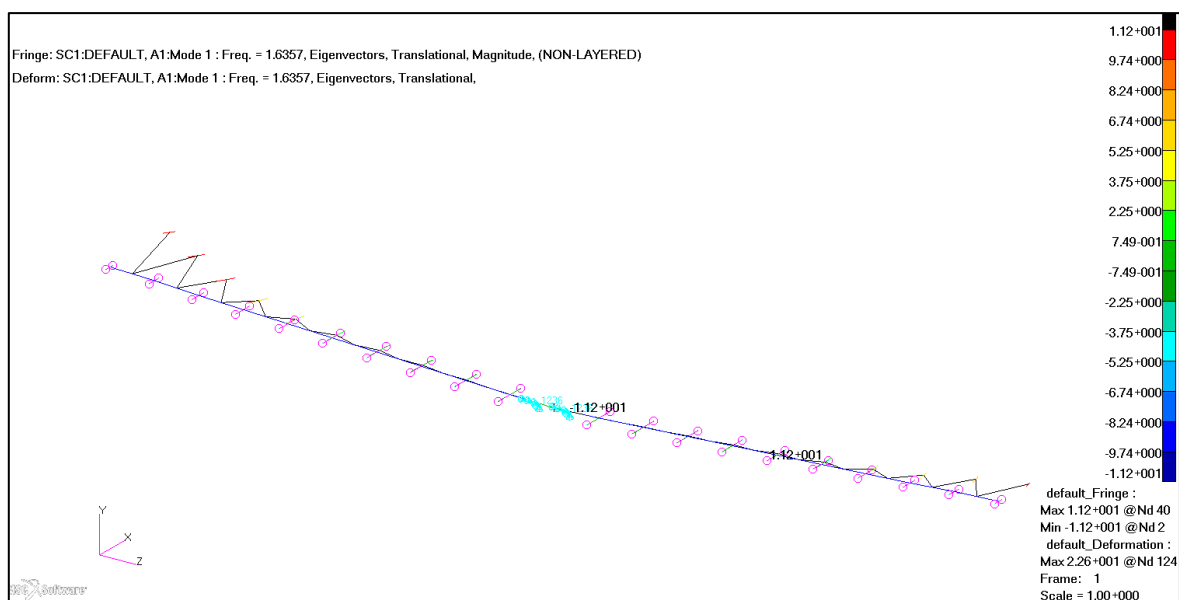


Mód 22: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 94,94 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.

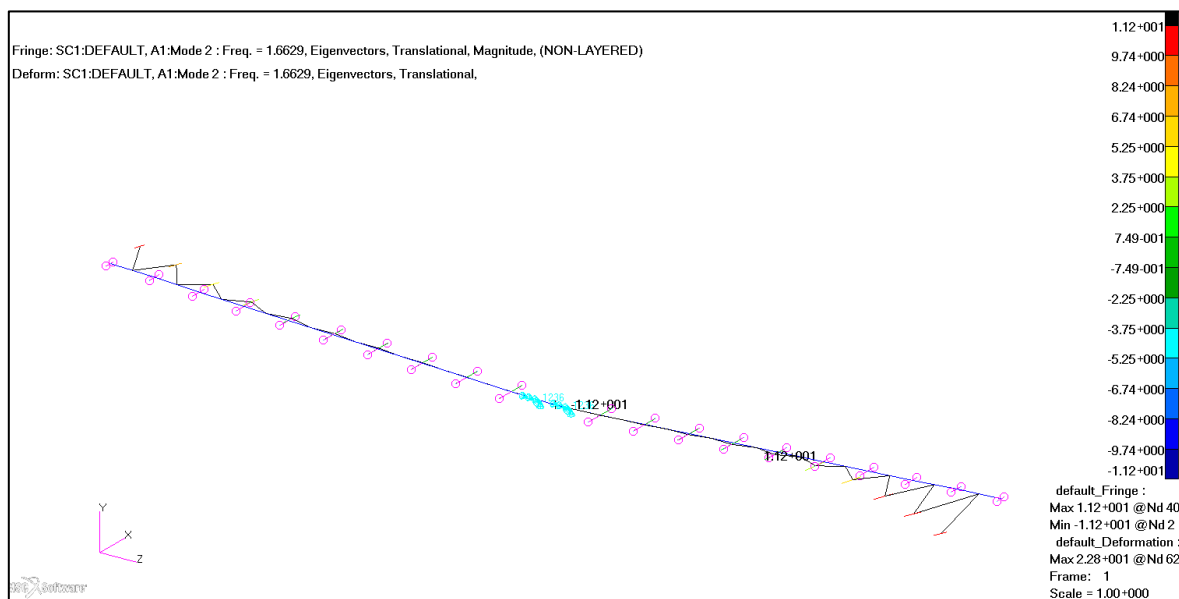


PŘÍLOHA 16: Výsledky analýzy vlastních frekvencí pro nosníkový MKP model křídla druhé konfigurace

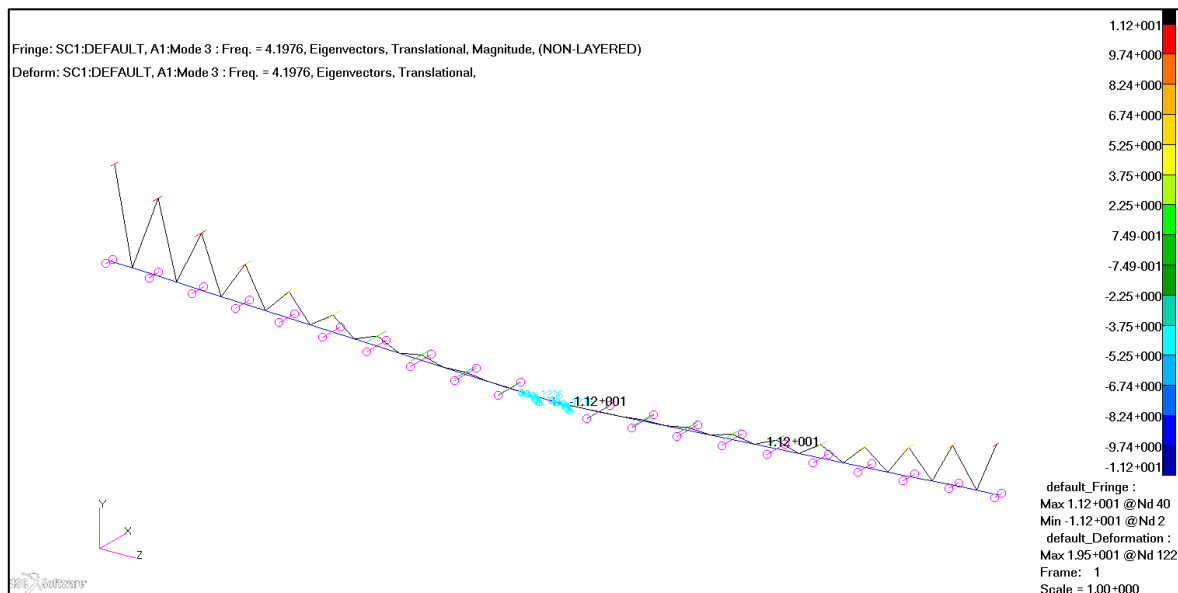
Mód 1: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 1,6357 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



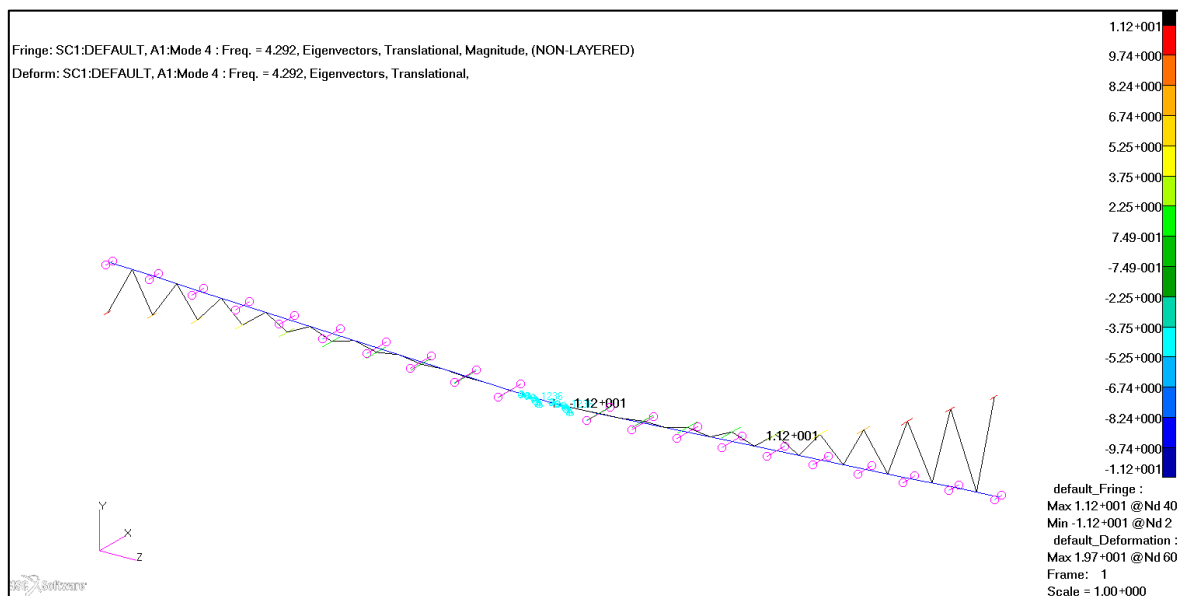
Mód 2: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 1,6629 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



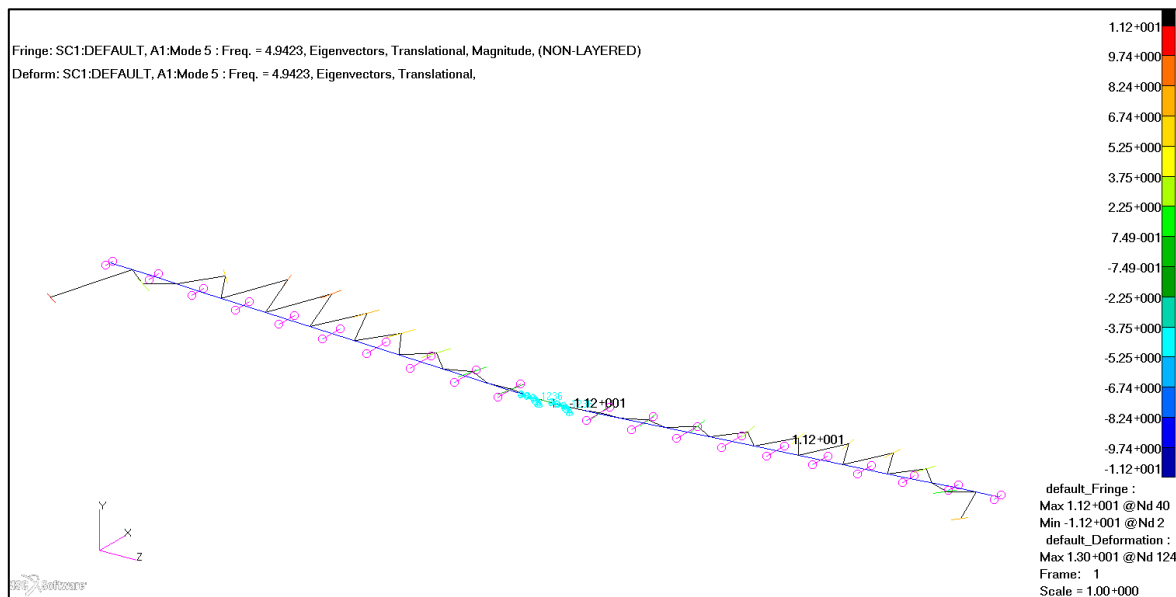
Mód 3: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 4,1976 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb.



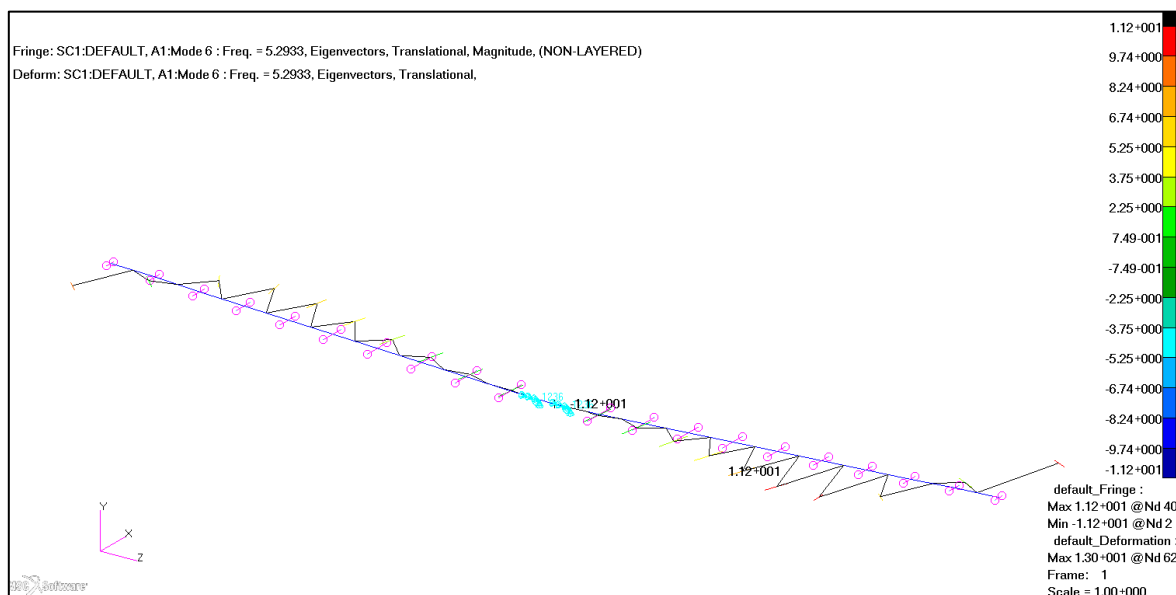
Mód 4: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 4,292 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



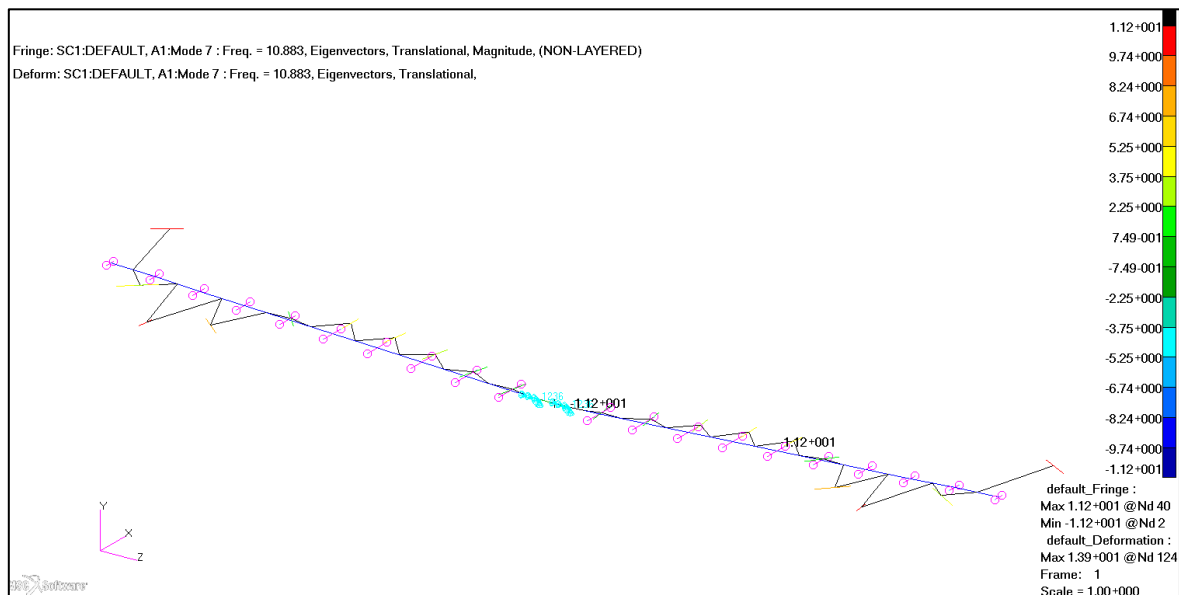
Mód 5: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 4,9423 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



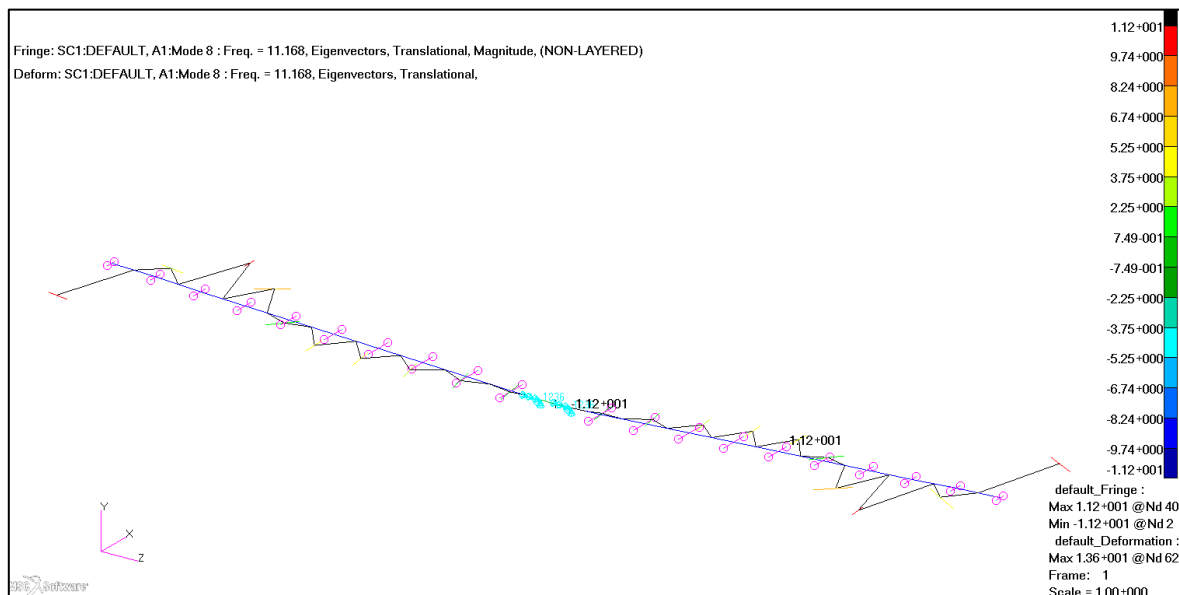
Mód 6: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 5,2933 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb v podélném směru.



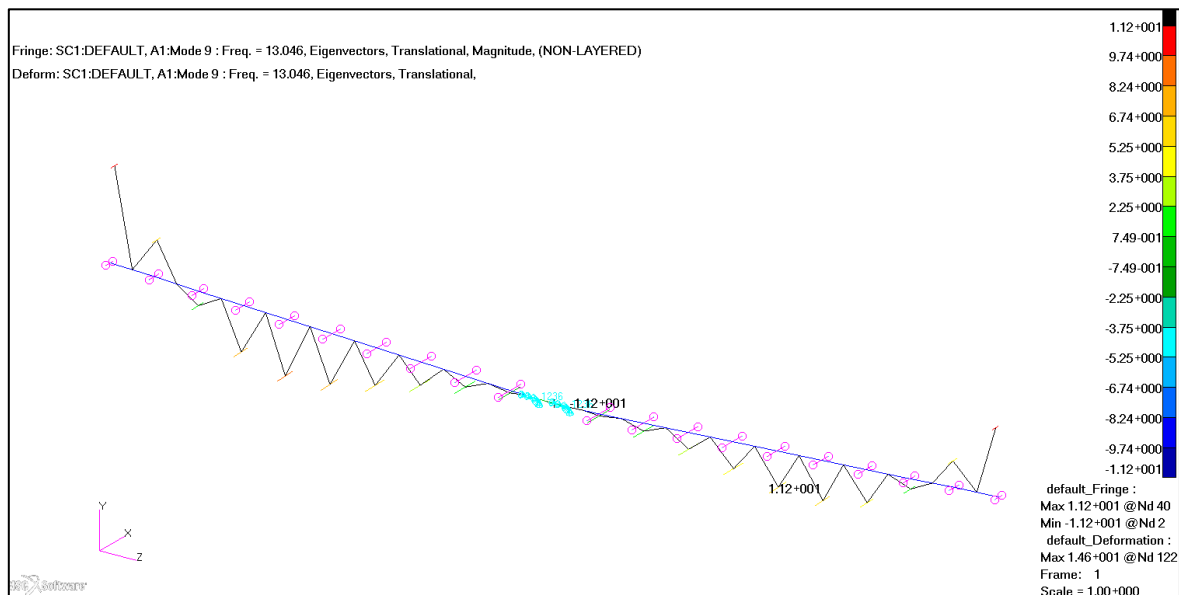
Mód 7: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 10,883 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb v podélném směru.



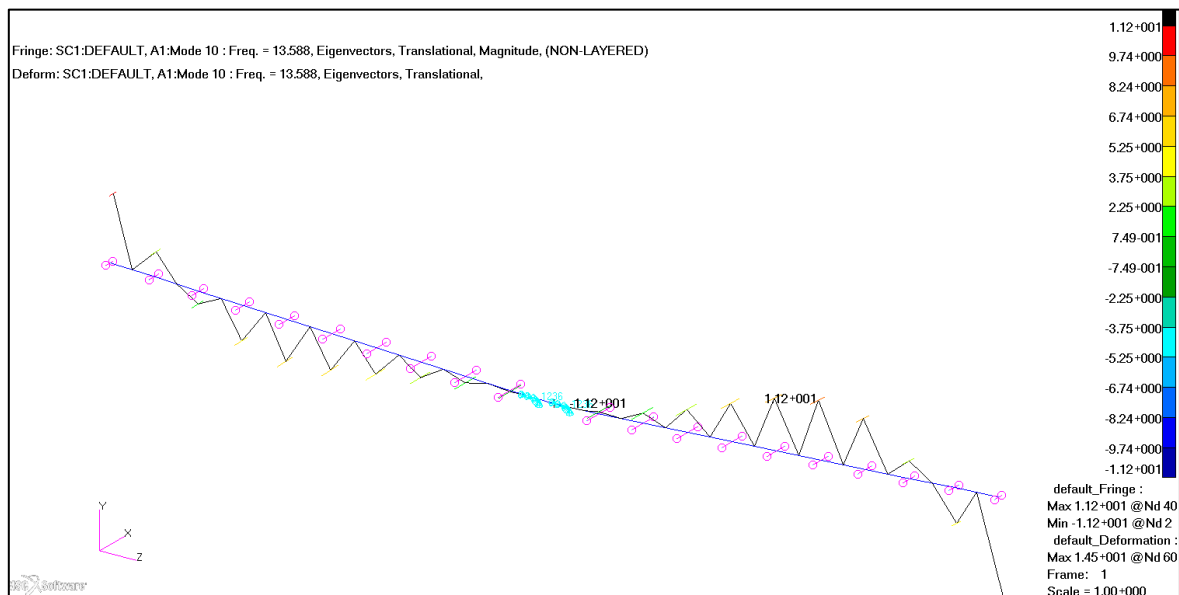
Mód 8: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 11,168 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru.



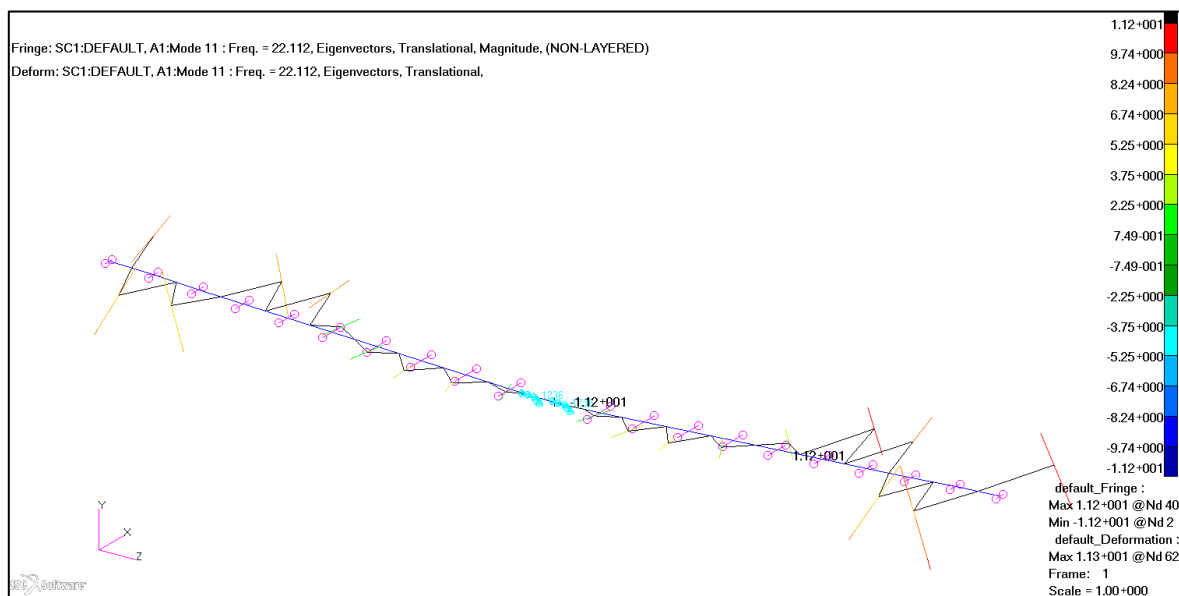
Mód 9: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 13,046 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický ohyb.



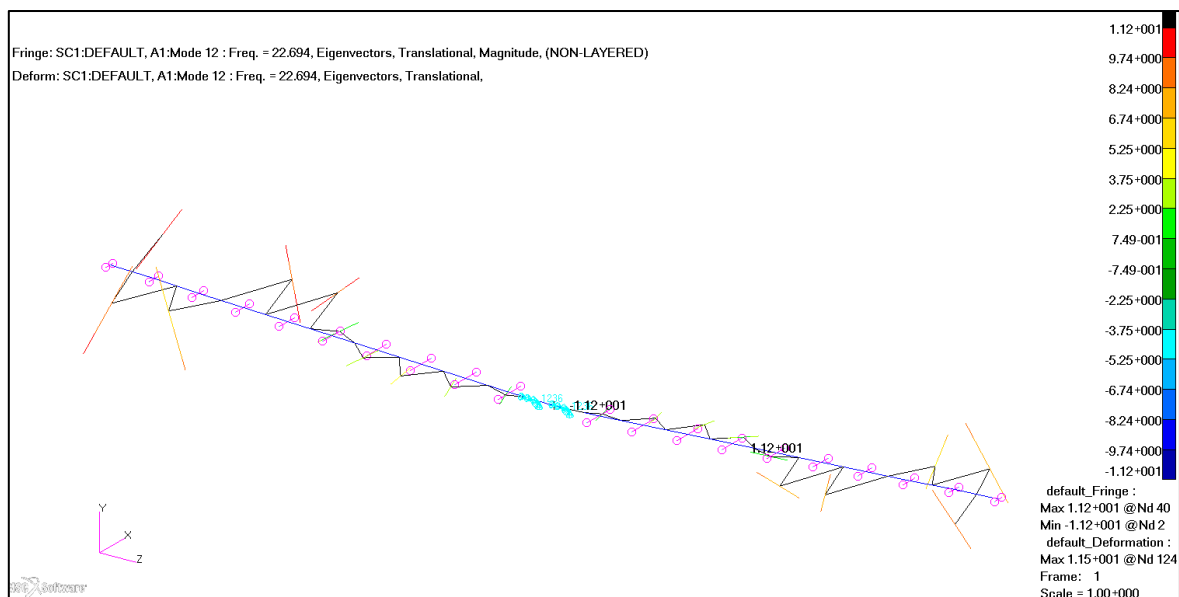
Mód 10: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 13,588 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický ohyb.



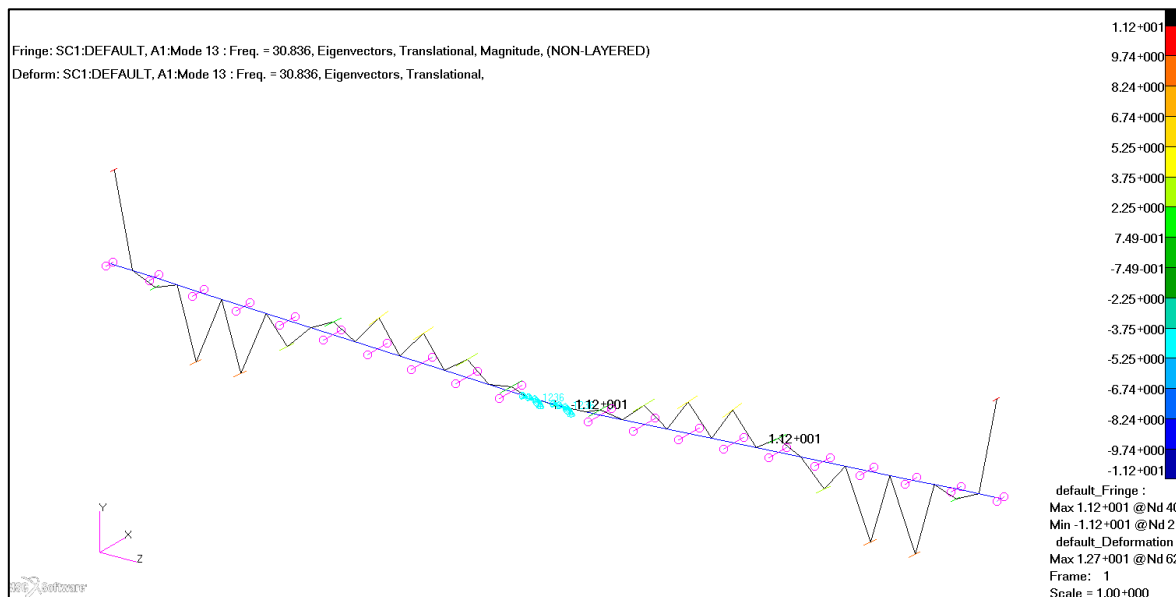
Mód 11: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 22,112 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



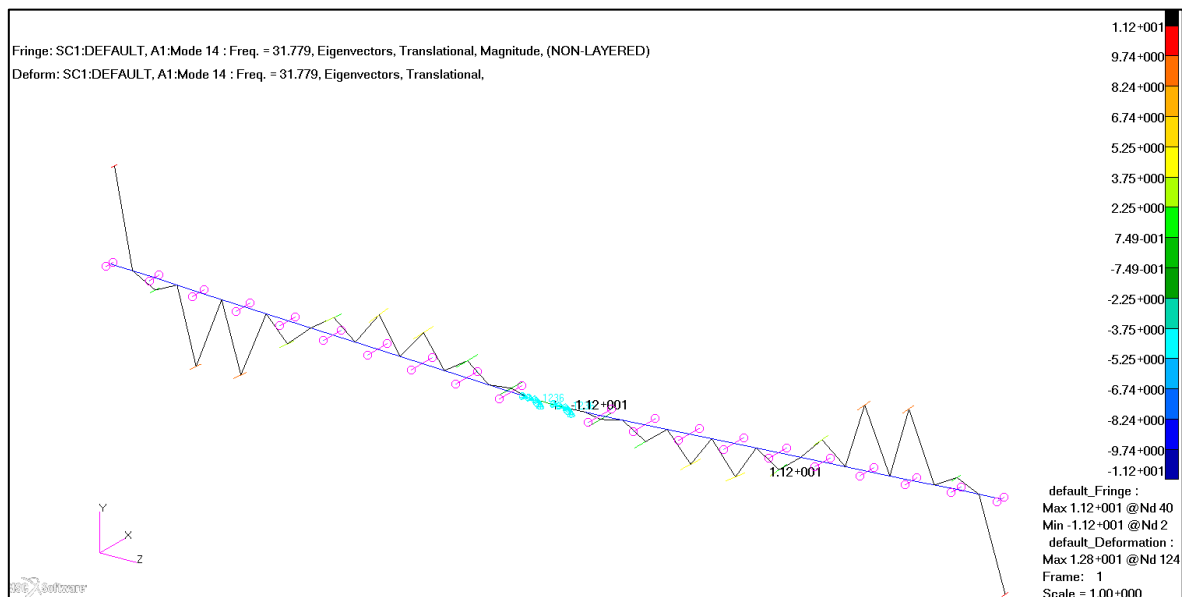
Mód 12: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 22,694 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



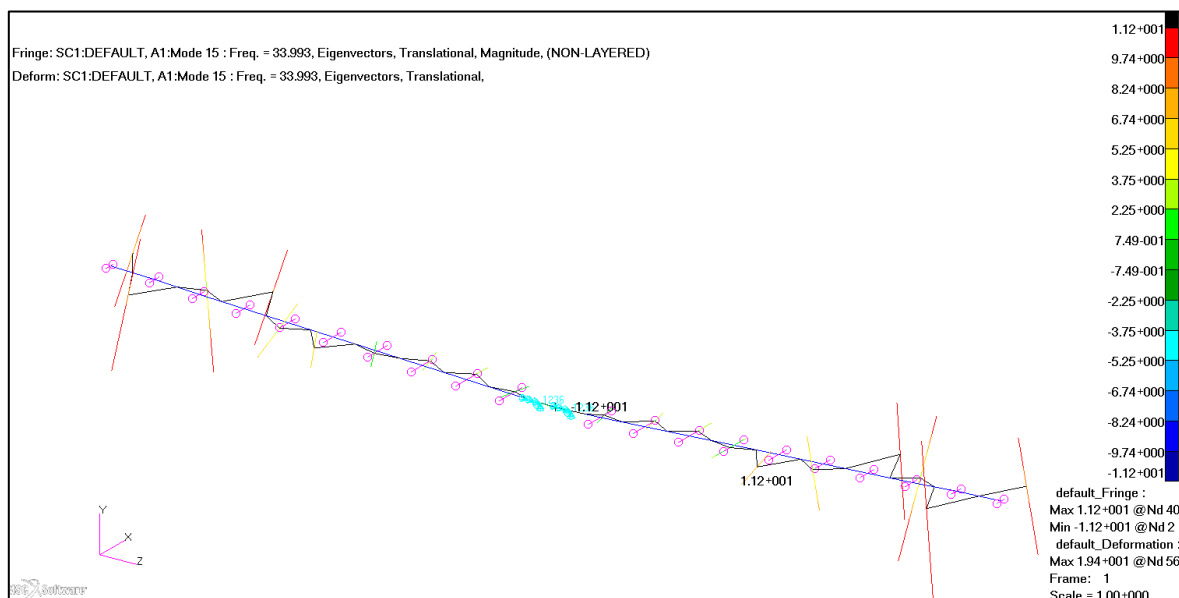
Mód 13: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 30,836 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb.



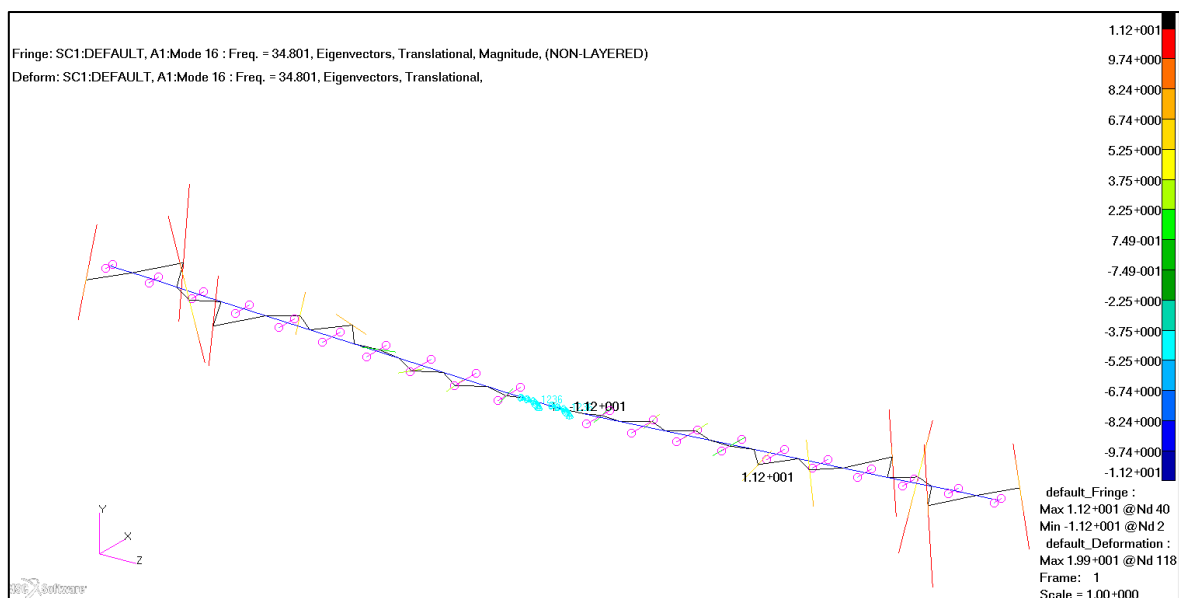
Mód 14: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 31,779 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



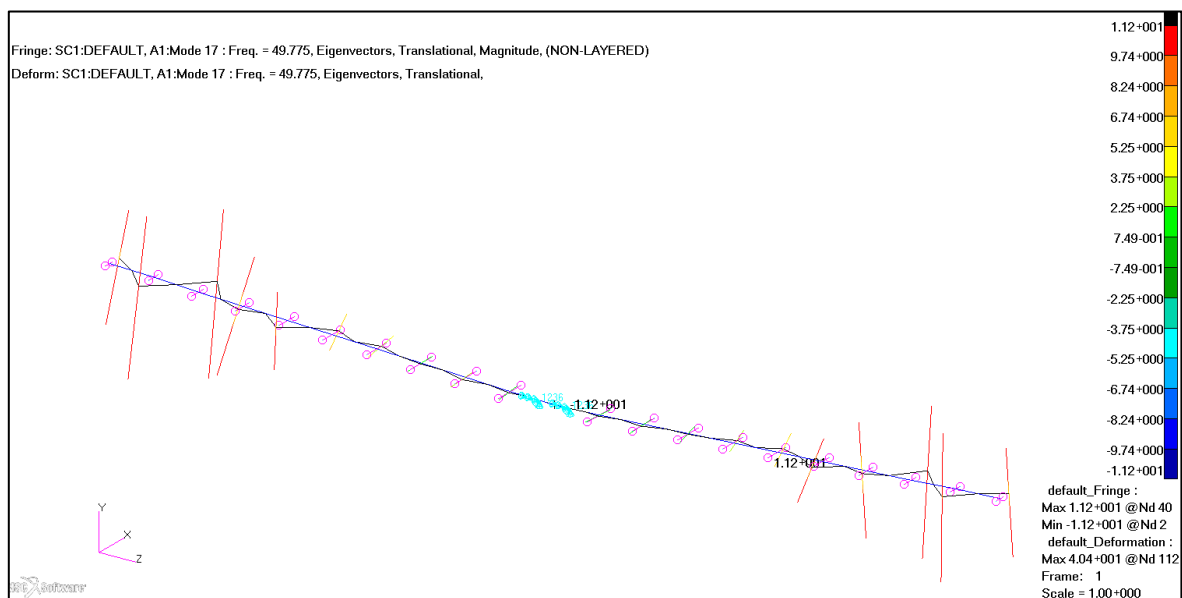
Mód 15: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 33,933 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



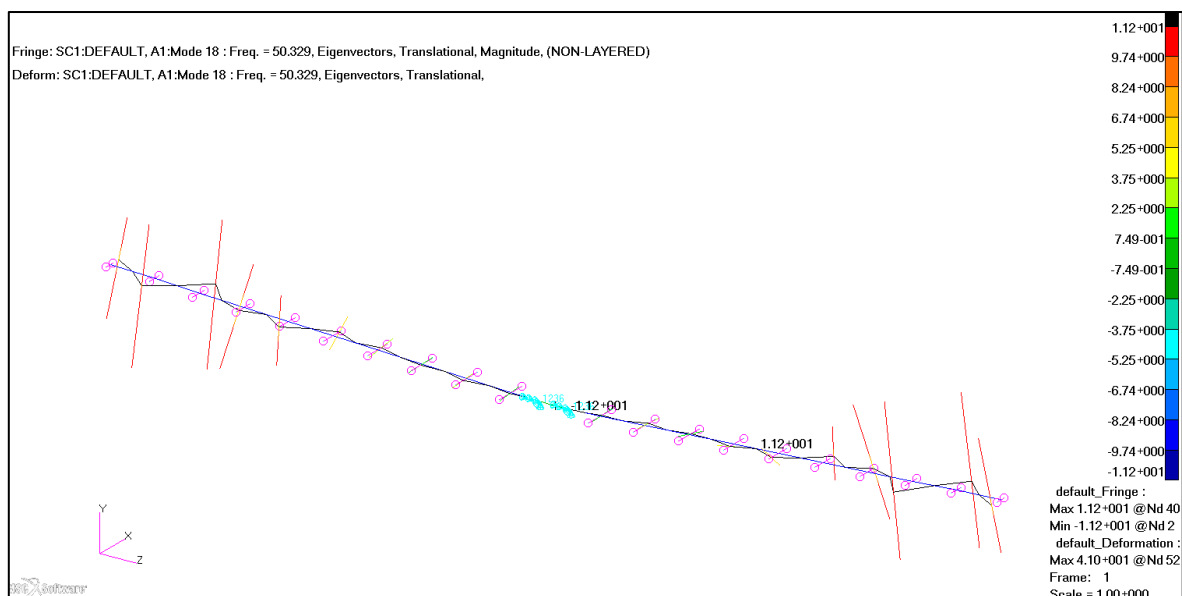
Mód 16: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 34,801 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



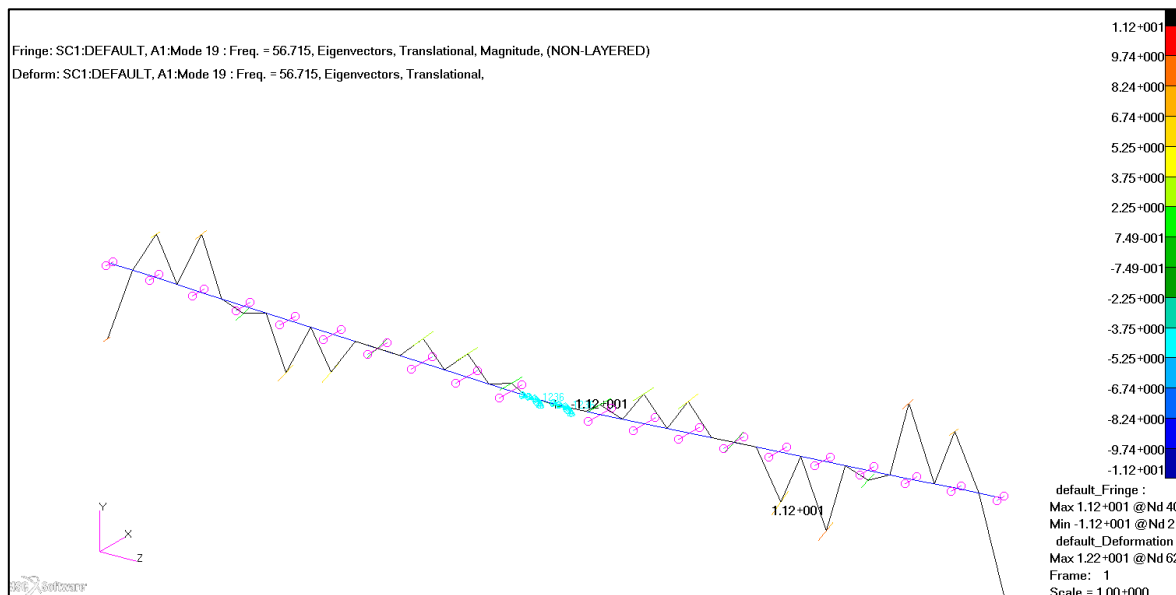
Mód 17: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 49,775 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



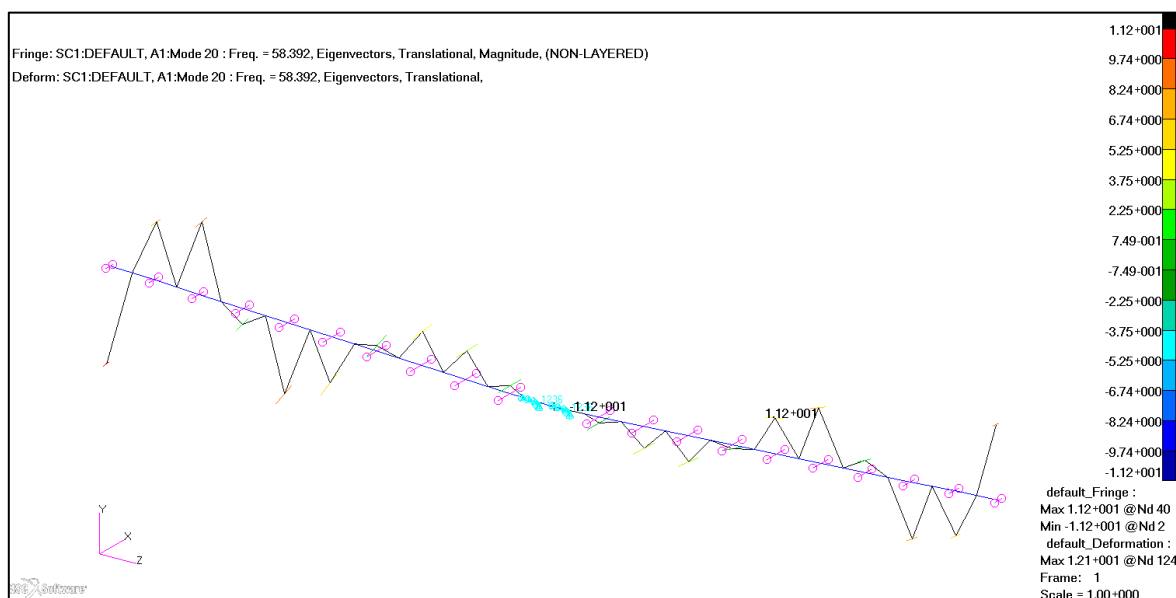
Mód 18: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 50,329 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



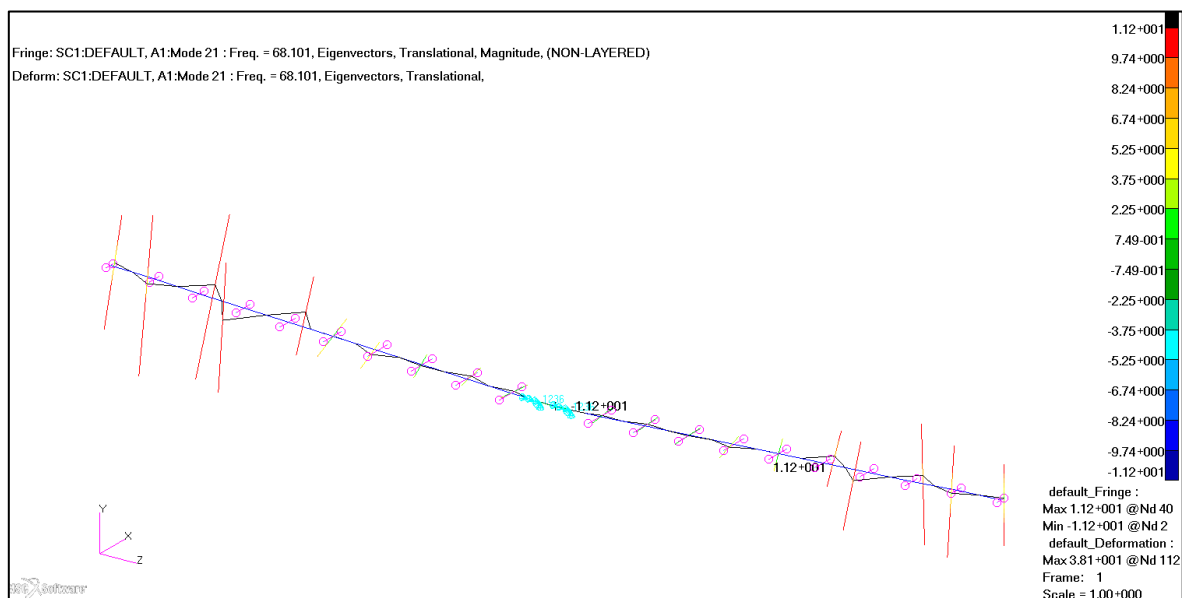
Mód 19: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 56,715 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb.



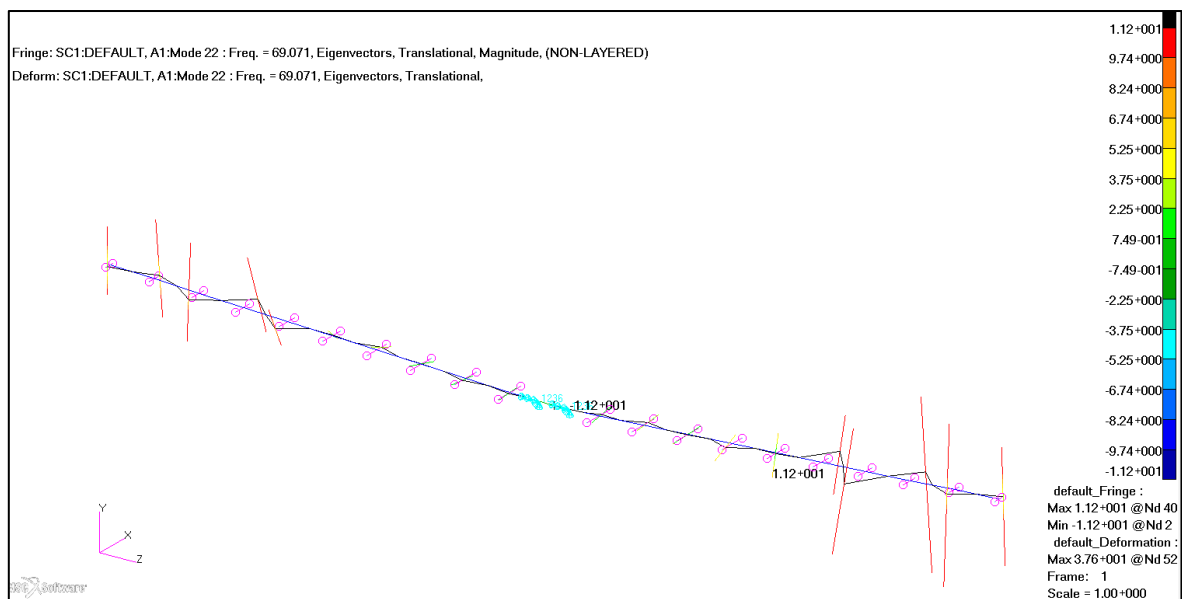
Mód 20: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 58,392 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



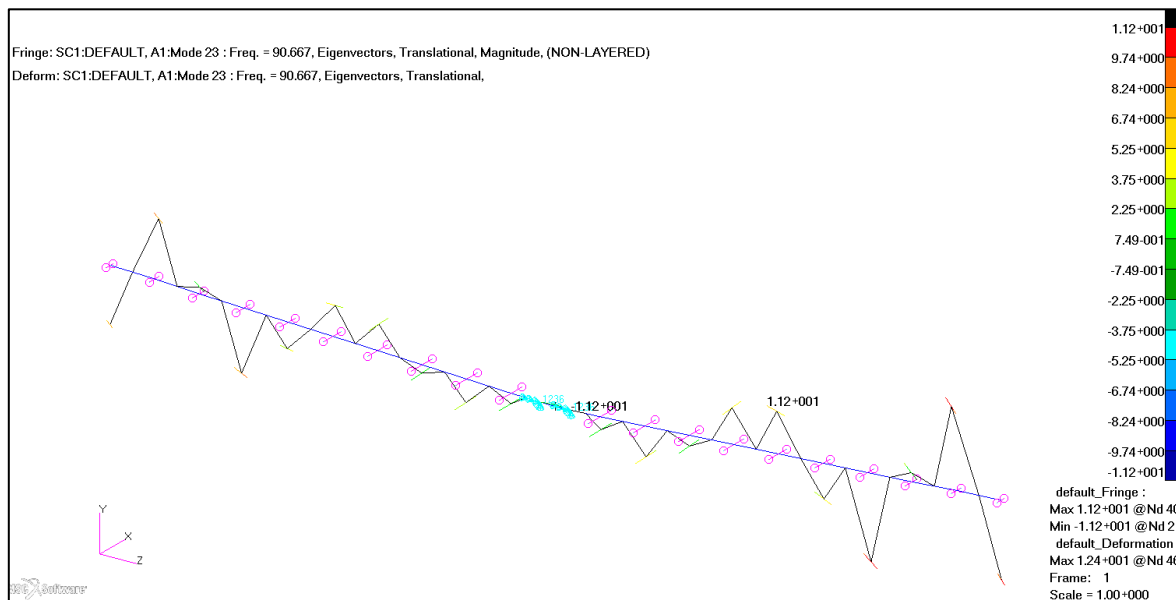
Mód 21: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 68,101 Hz, kdy tvar kmitání byl nesymetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



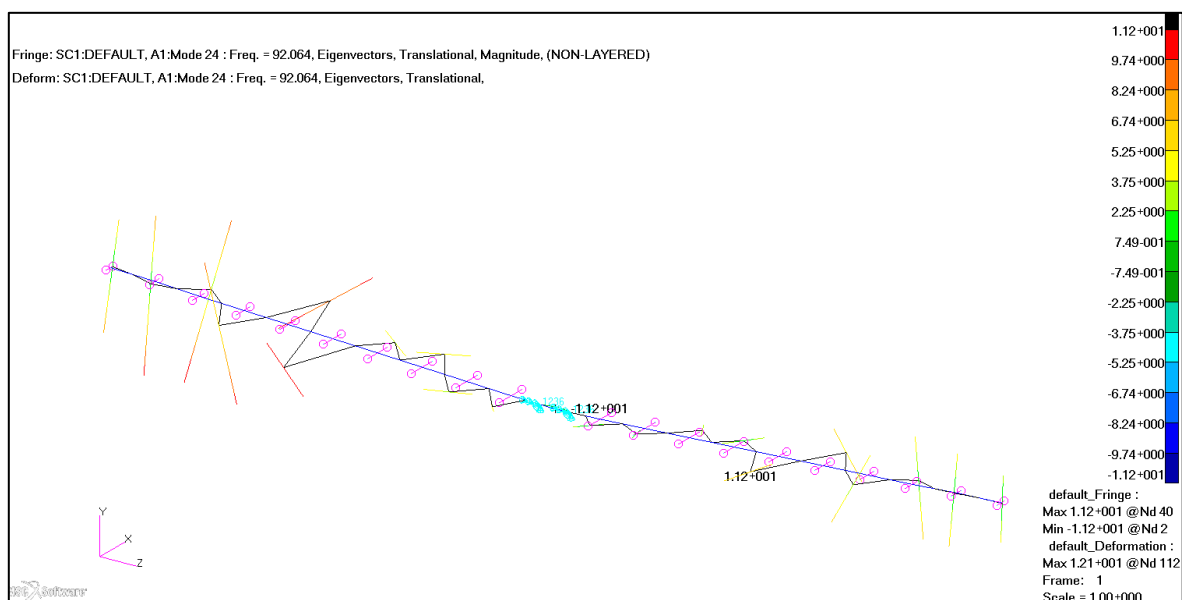
Mód 22: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 69,071 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



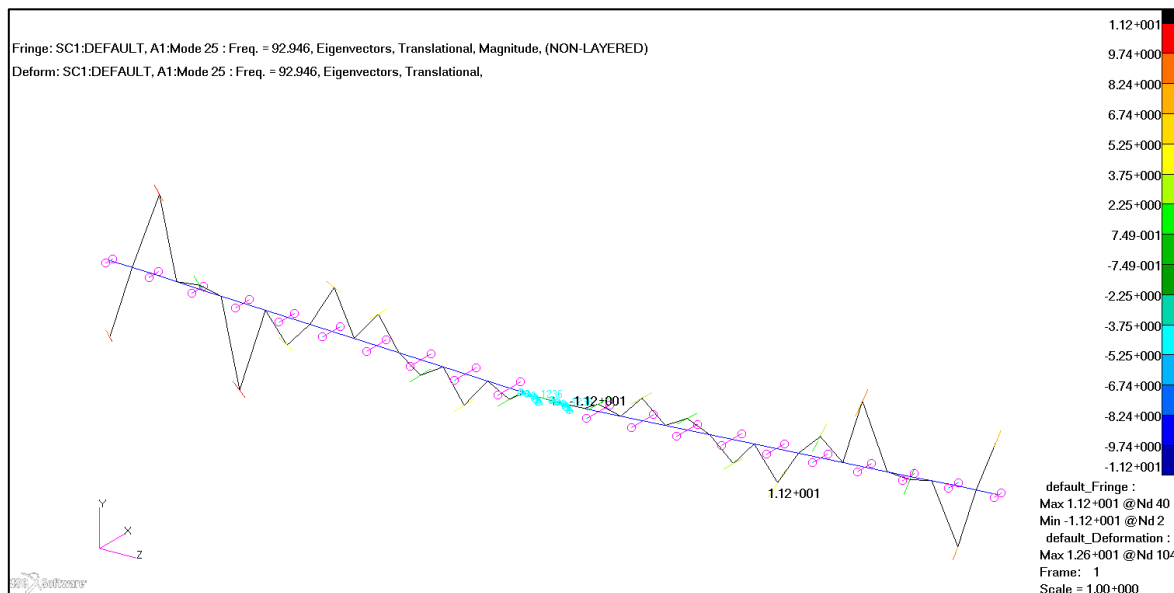
Mód 23: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 90,667 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb doprovázený krutem.



Mód 24: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 92,064 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.



Mód 25: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 92,946 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb.



Mód 26: Grafický výsledek modální analýzy vlastní frekvence 95,658 Hz, kdy tvar kmitání byl symetrický vícenásobný ohyb v podélném směru doprovázený krutem.

