

**ELEKTROMAGNETICKY VYBUZENÉ REZONANČNÍ STAVY MEMBRÁNOVÉ
SPOJKY A PASTORKU ZCELA ODPRUŽENÉHO POHONU LOKOMOTIVY A JEJICH
CITLIVOST NA TORZNÍ TUHOSTI**

***ELECTROMAGNETICALLY EXCITED RESONANCE STATES OF A MEMBRANE
COUPLING AND A PINION OF A LOCOMOTIVE FULLY-SUSPENDED DRIVE AND
THEIR SENSITIVITY ON TORSION STIFFNESSES***

Vojtěch DYBALA¹

Abstrakt

Článek se zabývá jevem torzních oscilací ve zcela odpruženém pohonu lokomotivy. Konkrétně se zaměřuje na vybuzené rezonanční stavy membránové spojky a pastorku a na jejich citlivost na torzní tuhosti přiléhajících torzních pružin. Zdrojem buzení tohoto rezonančního kmitání jsou harmonické složky elektromagnetického momentu trakčního asynchronního motoru. Předchozí výzkum ukázal, jak jsou amplitudy budících harmonických složek závislé na otáčkách motoru. Navazující výzkum, prezentovaný v tomto článku, se dále věnuje zkoumání možností eliminace vybuzených rezonančních stavů přeladěním této torzní soustavy prostřednictvím změn torzní tuhosti konkrétních torzních pružin. Ty v konstrukci reálného zcela odpruženého pohonu představují hřídel rotoru a membránu spojky.

Klíčová slova

asynchronní motor, elektromagnetický moment, torzní kmitání, rezonance, zcela odpružený pohon

Abstract

The article deals with the phenomenon of torsion oscillations in a fully-suspended drive of a locomotive. Specifically, it focuses on excited resonance states of a membrane coupling and a pinion and on their sensitivity on torsion stiffnesses of adjacent torsion springs. The source of excitation of this resonance oscillations are harmonic components of the electromagnetic torque of a traction asynchronous motor. Subsequent research, presented in this article, is further oriented on investigation of elimination possibilities of the resonance states via retuning of torsion stiffnesses of specific torsion springs. These represents a rotor shaft and a membrane coupling in the real fully-suspended drive.

Keywords

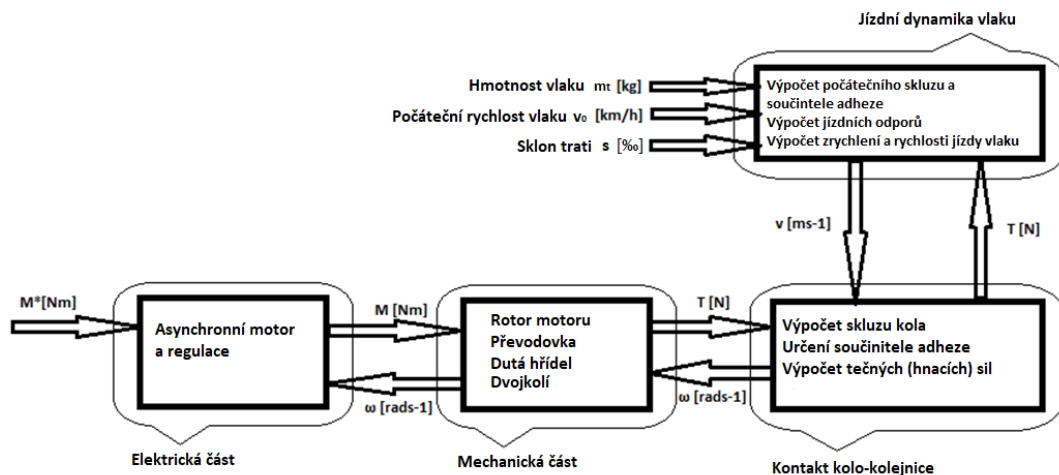
asynchronous motor, electromagnetic torque, torsion oscillation, resonance, full-suspended drive

¹ Ing. Vojtěch Dybala, ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Technická 4, 160 00 Praha. Tel.: +420 224 352 491, e-mail: vojtech.dybala@fs.cvut.cz

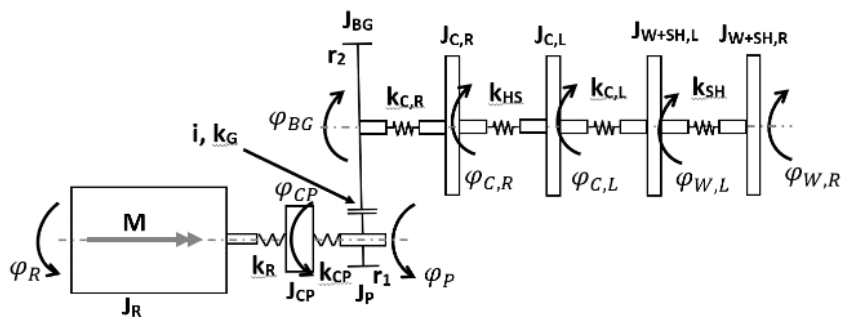
1 ÚVOD

Základní myšlenka v pohledu na zkoumané kolejové vozidlo – lokomotivu je dána představou o uspořádání pohonu jako celku. Podle ní je na konstrukční uspořádání pohonu lokomotivy nahlíženo jako na soustavu skládající se ze dvou základních částí – elektrické části pohonu a mechanické části pohonu. Což je základní idea pro tvorbu matematických výpočetních modelů. V nich není opomenuta ani silová vazba kolo-kolejnice. Výsledky simulací prezentované v tomto příspěvku jsou výstupy ze simulačního programu sestaveného v prostředí Matlab SIMULINK, jehož uspořádání prezentuje obr. 1. Elektrická část respektuje uspořádání dle schématu vektorové regulace [2]. Mechanickou část představuje torzní soustava zcela odpruženého pohonu dle schématu na obr. 2. Toto schéma vychází z konstrukčního uspořádání, viz obr. 3. Hodnoty momentů setrvačnosti a torzních tuhostí aplikovaných v této soustavě jsou určeny na základě podobnosti s reálnými konstrukcemi a znalostí z praxe. Na základě zkušeností z dřívějších simulací lze prohlásit, že takto určené hodnoty mohou odpovídat skutečnému vozidlu. Kontakt kolo-kolejnice je realizován naprogramováním adhezních charakteristik dle Popovice viz obr. 4, jejichž matematická reprezentace je dle (1), kde μ_{MAX} je maximální hodnota adheze, s je poměrný skluz, b a c jsou Popovicího přizpůsobující parametry.

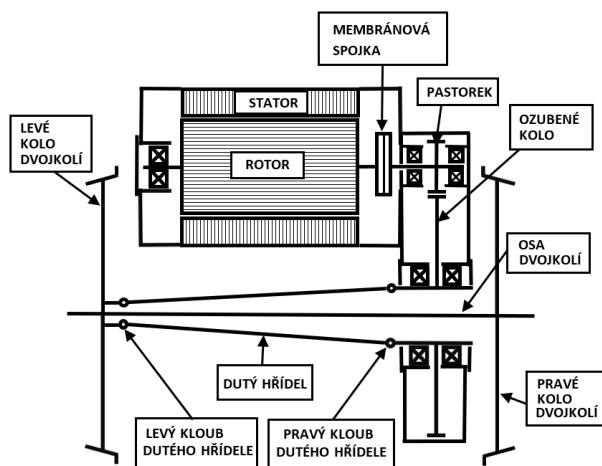
$$\mu = \mu_{MAX} e^{-\frac{(\ln(s)-b)^2}{c}} \quad (1)$$



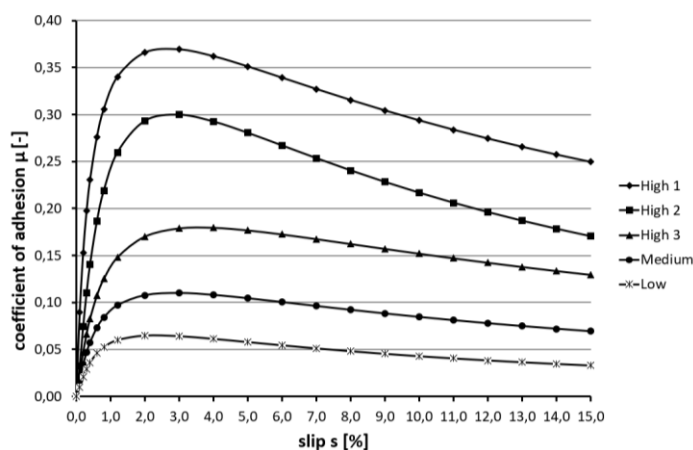
Obr. 1 Schéma uspořádání simulačního modelu [2]



Obr. 2 Schéma torzní soustavy



Obr. 3 Konstrukční uspořádání



Obr. 4 Adhezní charakteristiky [4]

Jízdní dynamika vlaku je submodel řešící soustavu analytických vztahů sloužících k určení rychlosti simulované jízdy vlaku v dle (2), která je součtem počáteční rychlosti v_0 a rychlosti integrované ze zrychlení a .

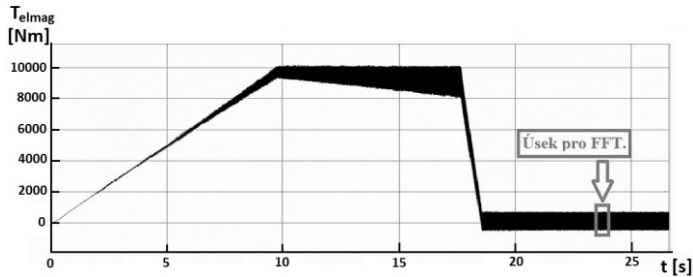
$$v = v_0 + \int_0^t a \, dt \quad (2)$$

Dalším detailům z hlediska stavby a fungování výpočetních modelů dále nebude věnována pozornost. Čtenáře lze ovšem odkázat na dřívější publikace [2, 3, 5, 6].

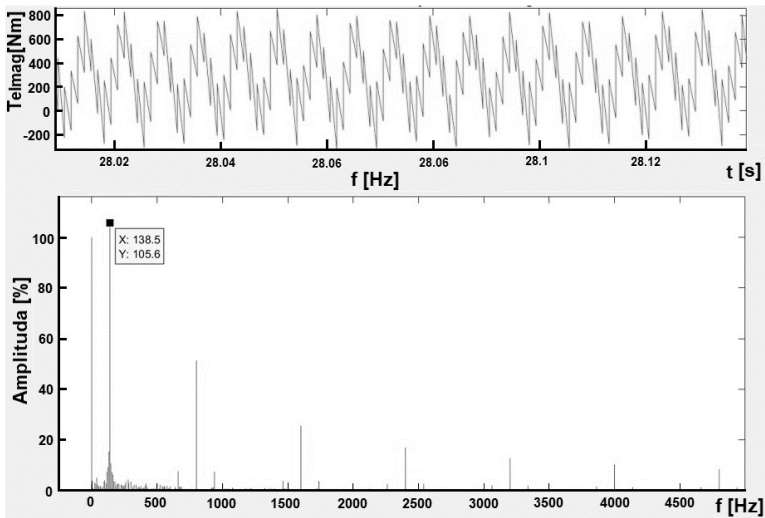
2 ZDROJE BUZENÍ A ZÁKLADNÍ IDENTIFIKACE REZONANČNÍCH STAVŮ

V rámci submodelu elektrické části je simulováno napájení asynchronního motoru ze střídače. Právě spínání polovodičových prvků frekvencí f_{PWM} ve střídači je zdrojem zvlnění statorových proudů modelu motoru a následně tedy jeho elektromagnetického momentu, který působí ve vzduchové mezeře a pohání rotor motoru. Toto zvlnění představují harmonické složky nasuperponované na jmenovitou hodnotu. Pro citlivostní analýzu uvedenou v následující kapitole jsou zásadní dříve zjištěné informace o obsahu harmonických složek elektromagnetického momentu, u kterých se

předpokládá, že jsou zdrojem buzení zkoumaného torzního kmitání a rezonančních stavů. Z průběhu elektromagnetického momentu, viz obr. 5 a jeho frekvenční analýzy, viz obr. 6, byla zjištěna přítomnost specifických harmonických složek, viz tab. 1. Při znalosti vlastních frekvencí a vlastních tvarů kmitů torzní soustavy, viz tab. 2, individuálního plně odpruženého pohonu dvojkolí podle schématu obr. 3, vypočtených pomocí základního výpočetního modelu [2], byl sestaven Campbellův diagram, viz obr. 7. Z něho je patrné, že v rámci zkoumaného rozsahu otáček existuje v torzní soustavě šest potenciálních rezonančních stavů. V následujících kapitolách bude věnována pozornost pouze rezonančním stavům III a V, které se projeví výrazněji a odpovídají vlastním tvarům kmitání č. 4 a 7 dle tab. 2.



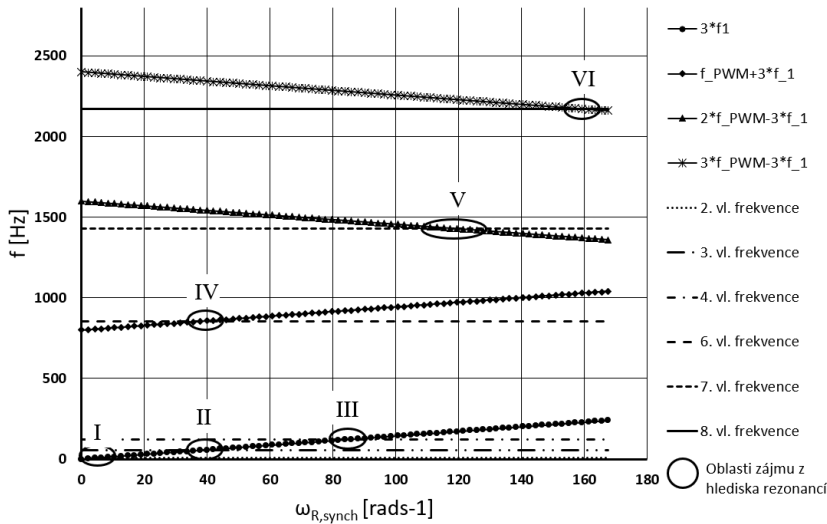
Obr. 5 Průběh elektromagnetického momentu [2]



Obr. 6 FFT elektromagnetického momentu [2]

Tab. 1 Přehled harmonických složek elektromagnetického momentu

Harmonická složka	Frekvence [Hz]	Amplitudy harmonické složky vůči jmenovité hodnotě [%]
3. násobek f_1 - 1. harmonická napájecího napětí	138	106
sudé a liché násobky spínací frekvence f_{PWM}	800 a násobky	55 až 10
postranní pásma všech násobků spínací frekvence f_{PWM}	+/-138	8 až 0



Obr. 7 Campbellův diagram

Tab. 2 Přehled vlastních tvarů a vlastních frekvencí kmitání

Vlastní tvar	Vlastní frekvence [Hz]	Dominantně kmitající hmoty
1.	0	Vlastní volná souběžná rotace
2.	6	Protiběžné torzní kmity dvojkolí vůči dutému hřídeli
3.	57	Protiběžné torzní kmity kol dvojkolí
4.	124	Protiběžné torzní kmity pastorku vůči spojce
5.	421	Protiběžné torzní kmity dvojkolí vůči dutému kloubovému hřídeli
6.	853	Protiběžné torzní kmity kloubů dutého hřídele
7.	1430	Protiběžné torzní kmity membránové spojky vůči kotvě motoru
8.	2170	Protiběžné torzní kmity pastorku vůči ozubenému kolu

3 SIMULACE REZONANČNÍCH STAVŮ

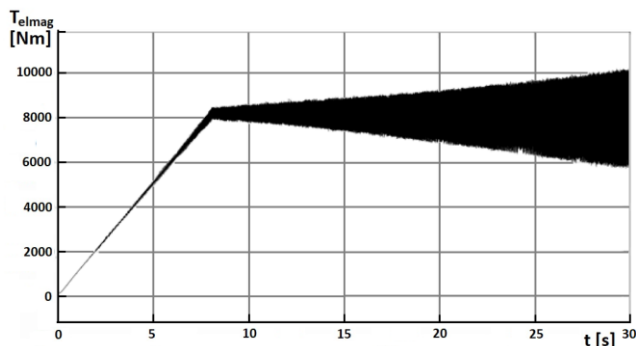
3.1 Prvotní simulace a vybudení rezonančních stavů

Při zkoumání projevů torzního kmitání a vzniku rezonančních stavů byl simulován průjezd otáčkovým spektrem s maximální hodnotou momentu. Průběh odpovídajícího elektromagnetického momentu motoru, který představuje buzení, prezentuje obr. 8. Harmonické složky elektromagnetického momentu při simulaci vybudily rezonanční kmitání na čtvrté a sedmé vlastní frekvenci – obr. 9 a 10. První rezonanční stav dle provedené FFT analýzy nastal na frekvenci 124 Hz a jeho projev je zjevný z obr. 9 i obr. 10. Průchod druhým rezonančním stavem nastal při frekvenci 1430 Hz – obr. 9.

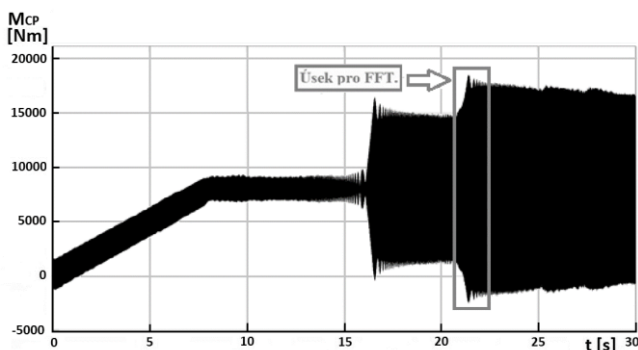
3.2 Citlivostní analýza budících složek a eliminace projevu rezonance

Simulace cílené na eliminaci projevu rezonančních stavů se opírají o zjištění funkční závislosti amplitud budících harmonických složek elektromagnetického momentu na synchronní úhlové rychlosti rotoru motoru, viz obr. 11. V rámci zkoumaného otáčkového rozsahu se ukázala nejen funkční

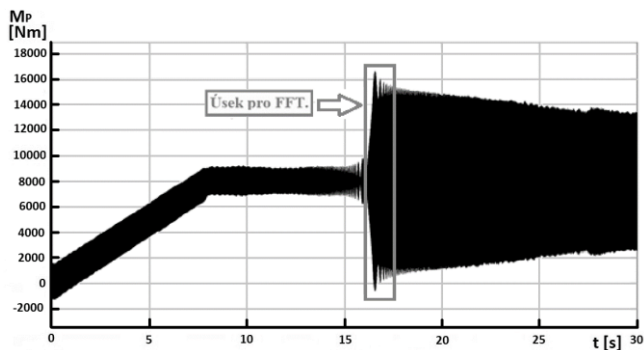
závislost amplitud, kdy s rostoucími otáčkami rotoru rostou i amplitudy harmonických složek, ale i rozdíly mezi jednotlivými složkami. Je zjevné, že největší amplitudy, a tedy i potenciál vybudit rezonanční stav, přísluší třetímu násobku první harmonické napájecího napětí f_1 . U ostatních složek, druhého a třetího násobku spínací frekvence střídače f_{PWM} a jejich postranních frekvenčních pásem, si lze dále všimnout, že v druhé polovině otáčkového rozsahu nabývají jejich amplitudy ekvivalentních hodnot větších než 1% jmenovité hodnoty elektromagnetického momentu. Zde by tedy měly mít stejný potenciál vybudit rezonanční stav. Tato zjištěná závislost umožnila dále realizovat myšlenku ladění torzní soustavy tak, aby se rezonanční stavy dle Campbellova diagramu posouvaly do nižších otáček, kde má buzení menší sílu, a byly tímto způsobem eliminovány.



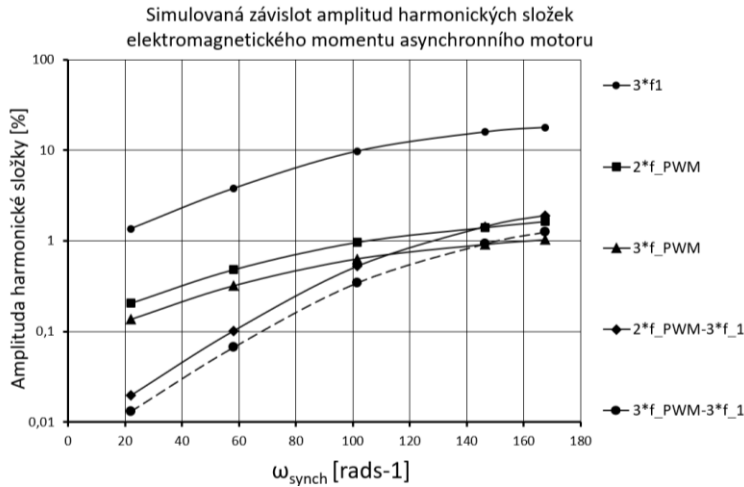
Obr. 8 Průběh elektromagnetického momentu [2]



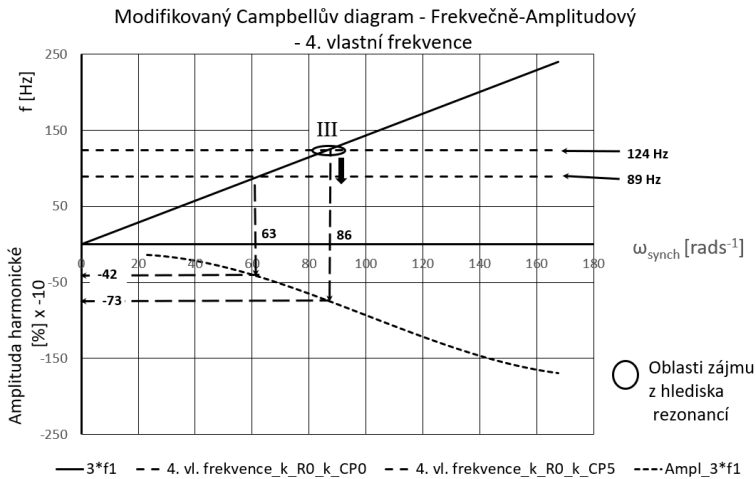
Obr. 9 Rozkmitání momentu membr. spojky



Obr. 10 Rozkmitání momentu pastorku



Obr. 11 Závislost amplitud budících složek na synchronní úhlové rychlosti rotoru motoru [2]



Obr. 12 Modifikovaný Campbellův diagram

Další simulace byly prováděny s různými variantami torzních tuhostí k_R , mezi hmotou rotoru J_R a hmotou membránové spojky J_{CP} a k_{CP} , mezi hmotou J_{CP} a hmotou pastorku J_P . Nejprve byly simulovány varianty s konstantní hodnotou k_{R0} a variantami k_{CP} dle tab. 3. Dále byly provedeny simulace s konstantní hodnotou k_{CP5} a variantami k_R dle tab. 4.

Tab. 3 Přehled variant torzních tuhostí k_{CP}

Torzní tuhost k_R	Torzní tuhosti k_{CP}	Poměr torzní tuhosti – k_{CPX} / k_{CP0} [%]	Vlastní frekvence [Hz]	
			4.	7.
k_{R0}	k_{CP0}	100	124	1430
	k_{CP1}	90	118	1429
	k_{CP2}	80	111	1427
	k_{CP3}	70	105	1426
	k_{CP4}	60	97	1425
	k_{CP5}	50	89	1424

Tab. 4 Přehled variant torzních tuhostí k_R

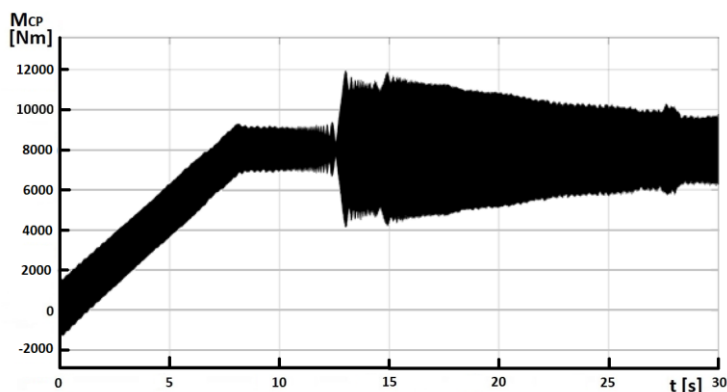
Torzní tuhost k_{CP}	Torzní tuhosti k_R	Poměr torzní tuhosti – k_{CPX} / k_{CP0} [%]	Vlastní frekvence [Hz]	
			4.	7.
k_{CP5}	k_{R0}	100	89	1424
	k_{R1}	102	89	1438
	k_{R2}	104	89	1452
	k_{R3}	106	89	1465
	k_{R4}	108	89	1479
	k_{R5}	110	89	1493

V obou případech výše prezentovaných sad výpočtů se ukázala lineární závislost čtvrté i sedmé vlastní frekvence na změně torzních tuhostí k_{CP} a k_R . Nejprve bylo snižováním hodnoty k_{CP} dosaženo snížení amplitudy vybuzeného rezonančního kmitání pastorku na čtvrté vlastní frekvenci. Dále bylo zvyšováním hodnoty k_R dosaženo postupného snížení amplitud vybuzeného rezonančního kmitání na sedmé vlastní frekvenci. V obou případech je zjevné, že došlo k výraznému poklesu amplitudy vybuzeného rezonančního kmitání. To dokládá i obr. 13, který prezentuje průběh zvlnění hnacího momentu membránové spojky při konečných hodnotách torzních tuhostí – k_{CP5} a k_{R5} .

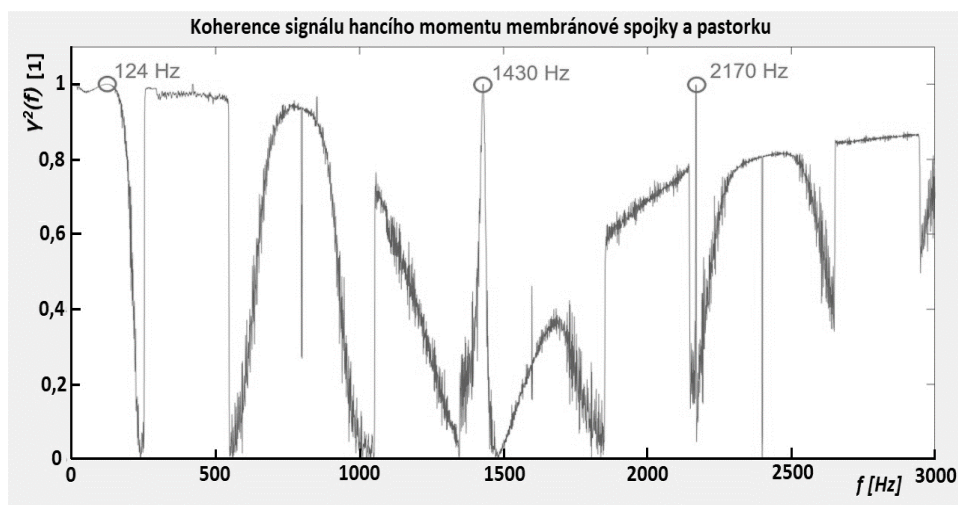
Obrázek č.13 prakticky ukazuje, že došlo k redukci rozkmitu hnacího momentu membránové spojky při průchodu rezonančním stavem. S ohledem na následující komponenty torzní soustavy, pastorek a ozubené kolo, lze předpokládat, že se tento efekt projevil i na úrovni torzního rozkmitání těchto komponent. Tento fakt lze ve frekvenční oblasti signálů příslušných hnacích momentů dokázat pomocí koherenční funkce – $\gamma^2(f)$ [7]. Tato funkce definuje míru vzájemné korelace, tedy vzájemného ovlivnění ve frekvenční oblasti, dvou veličin dle vztahu (3). Zde $x(t)$ a $y(t)$ jsou sledované veličiny, $S_{xy}(f)$ je vzájemná výkonová spektrální hustota sledovaných veličin, $S_{xx}(f)$ je výkonová spektrální hustota veličiny $x(t)$ a $S_{yy}(f)$ je výkonová spektrální hustota veličiny $y(t)$.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (3)$$

Koherenční funkce $\gamma^2(f)$ může nabývat hodnot od 0 do 1. Hodnota $\gamma^2(f) = 0$ znamená, že sledované veličiny se neovlivňují a jsou na sobě nezávislé. Naopak hodnota $\gamma^2(f) = 1$ indikuje, že se sledované veličiny $x(t)$ a $y(t)$ ovlivňují na dané frekvenci zcela, tj. 100%.



Obr. 13 Závislost amplitudy harmonické složky rezonančního stavu 7. vl. frekvence



Obr. 14 Koherenční funkce signálu hnacích momentů membránové spojky a pastorku

Příkladem si vezměme situaci, kde sledovanými veličinami jsou časové průběhy hnacího momentu membránové spojky a pastorku, viz obr. 14. Je vidět, že jsou zde jasně vyniklé hodnoty koherenční funkce rovny jedné na frekvencích, které byly již dříve identifikovány jako čtvrtá, sedmá a osmá vlastní frekvence torzního kmitání. A jím odpovídají vlastní tvary torzních kmitů, kde jsou dominantně kmitajícími hmotami právě membránová spojka a pastorek – tab. 2. Tato vzájemnost obou veličin na těchto frekvencích potvrzuje dřívější předpoklad, že eliminace projevu rezonančního kmitání na jedné z hmot ovlivní pozitivně i projev rezonance na druhé hmotě.

4 ZÁVĚR

Simulace buzení torzního kmitání prostřednictvím harmonických složek elektromagnetického momentu asynchronního motoru napájeného ze střídače napětí ukázaly velmi výrazné projevy rezonancí. Tyto mohou být nebezpečné pro dotčené komponenty pohonu z hlediska jejich přetěžování. Pro zkoumanou torzní soustavu zcela odpruženého pohonu lokomotivy byly tyto projevy vysledovány na enormním rozkmitání hnacího momentu membránové spojky a pastorku. Ze znalosti závislosti amplitud na úhlové rychlosti rotoru motoru bylo možné vyvodit citlivost vybuzečné rezonance právě na úhlové rychlosti ω_{rot} . To se potvrdilo v simulacích, kde byly měněny hodnoty torzních tuhostí k_{CP} a k_R za účelem přeladění vlastních frekvencí soustavy do nižších otáček, kde je síla buzení nižší. Hlavní úvahou směřující k možnostem optimalizování torzních tuhostí k_{CP} a k_R je fakt, že zatímco torzní tuhost hřídele je funkcí čtvrté mocniny průměru, tak průřezový modul v krutu, a též v ohybu, je funkcí třetí mocniny. V případě k_R to znamená, že největší uvažovaný nárůst o 10 % je dosažitelný zvětšením vnějšího průměru uvažované hřídele o cca 3,3 mm. V opačném směru, snižování hodnoty k_{CP} , je potřeba vzít v úvahu, že tato torzní pružina v reálné konstrukci zahrnuje torzní poddajnost membrány spojky a pastorkovou hřídel. Prostřednictvím pastorkové hřídele je uvažována možnost snížení k_{CP} až na 60 % se zachováním její dostatečné pevnosti. Další snížení k_{CP} na 50 % je předpokládáno prostřednictvím membránové spojky, což je nyní spíše teoretický předpoklad. Tímto způsobem bylo dosaženo výrazného snížení amplitud rozkmitu hnacího momentu při rezonanci.

Tento výzkum byl realizován za podpory ČVUT v Praze a souvisejícího SGS grantu – SGS20/120/OHK2/2T/12. Tato podpora je řešiteli vděčně oceňována.



Literatura

- [1] Pohonné a řídicí systémy pro lokomotivy. ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [online]. Plzeň [cit. 03.03.2021]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/trakcni-vybaveni-pro-lokomotivy>
- [2] DYBALA, V. The electromagnetically excited resonance of the pinion in fully-suspended drive of a locomotive and its sensitivity on the torsion stiffness of the rotor shaft. In: *Sborník abstraktů konference STČ*. Praha, 2021.
- [3] DYBALA, V., LIBENSKÝ, M., ŠULC, B., OSWALD, C. Slip and Adhesion in a Railway Wheelset Simulink Model Proposed for Detection Driving Conditions Via Neural Networks. In: *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada strojní*. Ostrava, 2018.
- [4] POPOVICI, R. I. *Friction in Wheel – Rail Contacts*. Enschede, The Netherlands, 2010. Ph.D. Thesis. University of Twente.
- [5] DYBALA, V. The influence of a control on a frequency composition of phase currents and an electromagnetic torque in simulations of an asynchronous motor power from an inverter. In: *Súčasný problémy v koľajových vozidlách: XXIV. medzinárodná konferencia, zborník prednášok, diel I*. Žilina: VTS pri ŽU v Žiline, 2019, 99–107. ISBN: 978-80-89276-58-5.
- [6] DYBALA, V. Simulace zvlnění elektromagnetického momentu asynchronního trakčního motoru lokomotivy napájeného ze střídače. In: *Sborník konference STČ na Strojní fakultě ČVUT v Praze*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2019. ISBN 978-80-01-06564-8.
- [7] KOLÁŘ, J. *Aplikace výpočetních metod v konstrukci kolejových vozidel*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994. 123 s. ISBN 80-01-01190-9.