

## Statické a dynamické modely třecí síly při modelování olopatkovaných disků se třecími vazbami

Tomáš Volín<sup>1</sup>

### 1 Úvod

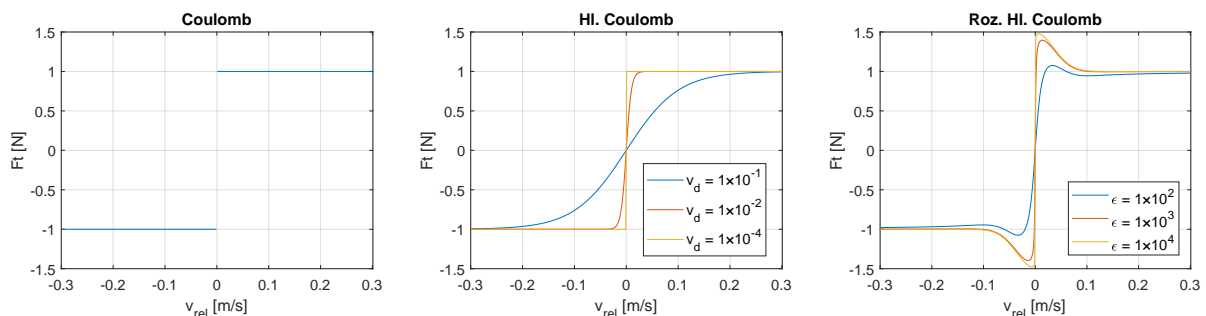
Tření je jev doprovázející pohyb mechanických systémů, který má zpravidla negativní účinek ve formě vzniku vysokých teplot a opotřebení materiálu v místech kontaktu. Mezi kontaktními plochami vznikají třecí vazby, jejichž velikost se odvíjí od velikosti třecích sil. Tyto vazby vnášejí do systémů silnou nelinearitu, která v řadě případů lépe odpovídá reálnému systému než náhradní lineární vazby.

Výzkum tření sahá až k Leonardu Da Vinci, jenž konstatoval, že třecí síla je přímo úměrná normálové síle mezi dvěma plochami. Coulomb dále zavedl první matematický model tření, popisující závislost třecí síly na relativní rychlosti. Stribeck dále našel plynulý přechod mezi tzv. statickým a dynamickým koeficientem tření. Statický koeficient tření odpovídá síle, kterou je třeba vyvinout na těleso v klidu, aby se dalo do pohybu. Dynamický koeficient odpovídá třecí síle, která působí proti směru pohybu, je-li těleso již v pohybu.

### 2 Statické a dynamické modely třecí síly

Jako statické modely tření označujeme základní, zjednodušené modely třecí síly, kdy většina z nich nepopisuje vliv ulpívání (stiction). Tento jev přímo souvisí se statickým koeficientem tření a nastává při malých relativních rychlostech a projevuje se ulpíváním kontaktních ploch, kdy nedochází k vzájemnému pohybu ploch, ačkoliv narůstá budící síla.

Dynamické třecí modely, také nazývané stavové modely, jsou komplexnější modely, které lépe odpovídají tření zejména v okolí nulové relativní rychlosti interagujících ploch. Zavádějí stavovou rovnici popisující vychýlení fiktivních štětin imaginárního kartáče v kontaktní ploše. Na obr. 1 jsou zobrazeny průběhy třecí síly pro *Coulombův*, *hladký Coulombův*

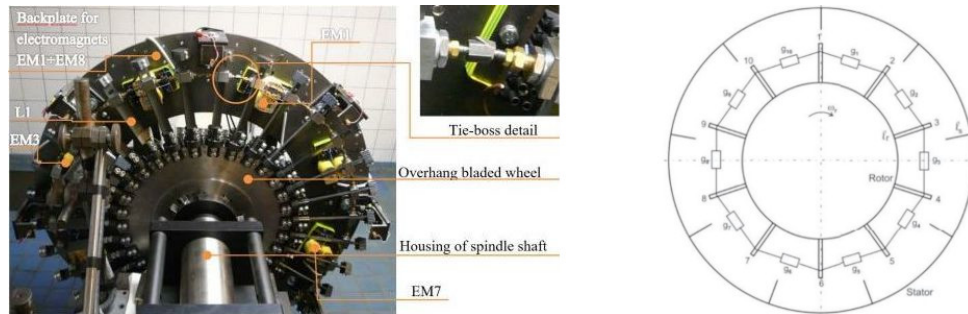


Obrázek 1: Vykreslení třecí síly

a rozšířený hladký Coulombův model. Lze zde zřetelně pozorovat vývoj matematických mo-

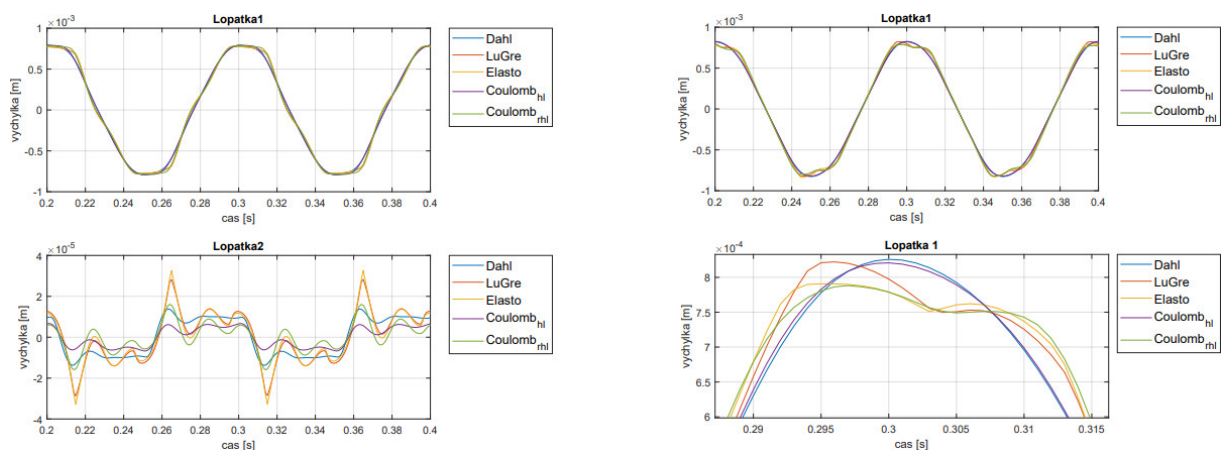
<sup>1</sup> student navazujícího studijního programu Aplikované vědy a informatika, obor Mechanika, specializace Dynamika konstrukcí a mechanika, e-mail: volint@students.zcu.cz

delů tření. Na grafu Coulombova modelu je zobrazena nespojitost tohoto modelu, která znesnadňuje numerické řešení. Hladký Coulombův model nahrazuje tuto nespojitost hladkou funkcí a rozšířený hladký Coulombův model navíc přidává Stribeckovu křivku a rozšiřuje tak model o možnost popisu ulpívání. Podklady byly čerpány ze článku [Pennestri (2016)]. Moti-



**Obrázek 2:** Fotografie olopatkovaného disku s lineárními tlumiči a schéma matematického modelu s lineárními vazbami. [Půst (2018)]

vací výzkumu třecích sil byla potřeba popisu olopatkovaného disku se třecími vazbami, viz obr. 2, a zkoumání odezvy systému na harmonické buzení lopatek při uvážení běžící vlny (running waves) a možného flutteru od proudící kapaliny [Půst (2018)]. Na obr. 3 je vlevo zobrazena



**Obrázek 3:** Odezva olopatkovaného disku při buzení jedné lopatky (vlevo) a při buzení všech lopatek s jevem běžící vlny (vpravo).

odezva 1. a 2. lopatky po vybuzení 1. lopatky. Ze spodního grafu je možné vidět reakce sousedních lopatek na vychýlení 1. lopatky a výrazně odlišné chování LuGre a Elasto-platického modelu od zbylých. Vpravo je zobrazena odezva 1. lopatky při buzení všech lopatek a vliv fázového zpoždění od běžící vlny.

## Literatura

Pennestri, E., Rossi, V., Salvini, P., Valentini, P. P. (2016) *Nonlinear Dyn Review and comparison of dry friction force models*. Volume 83, pp. 1785-1801.

Půst, L., Pešek, L., Byrtus, M. (2018) *Journal of Sound and Vibration Modelling of flutter running waves in turbine blades cascade* University of West Bohemia, Fav, Pilsen, Volume 436, pp. 286-294.