

Spektrální vlastnosti kruhových piezokeramických rezonátorů

Vypracoval: doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc., MFF UK

Recenzovaná práce rozebírá v 5 kapitolách se 4 přílohami spektrální vlastnosti válcových rezonátorů s kruhovou základnou průměru $2a$ a tloušťky (výšky) $2b$ s obecnou hodnotou bezrozměrového parametru $\alpha = a/b$ podle obr. 1.1, z homogenní piezoelektrické keramiky, v lineární aproximaci, beze ztrát mechanických, dielektrických či piezoelektrických.

Kapitola 1 uvádí do problematiky. Zavádí základní pojmy v oblasti piezoelektrických kruhových rezonátorů a zdůvodňuje zájem o prosté kmity (podélné a radiální) vystihujících dostatečně přesně nejčastější aplikace. Úvahy jsou doloženy bohatou citací článků teoretických i praktických měření.

Kapitola 2 rozebírá základní typy módů přicházejících v úvahu a formuluje základní předpoklady a jejich lineární vyjádření rovnicemi. Elektromagnetické pole v prostředí je popsáno kvazistacionárně vzhledem k podstatně nižší rychlosti šíření mechanických vln oproti vlnám elektromagnetickým (cca 4 až 5 řádů). Není proto nutno ani uvažovat magnetické pole a vazba mezi tenzorem elastického napětí T_{ij} a vektorem elektrické indukce D_i na jedné straně, a tenzorem elastického posunutí S_{kl} a vektorem elektrické intenzity E_k na straně druhé je dána lineárními tenzory příslušných řádů. Nakonec popisuje vlastnosti piezoelektrických rezonátorů pomocí náhradních lineárních modelů elektrickými obvody.

Kapitola 3 rozebírá v případech prostých kmitů kruhového rezonátoru analytické modely a jim odpovídající parametry náhradních lineárních elektrických obvodů, v případech vázaných módů pak příslušné rozvoje a stanovuje úplný systém aproximačních vztahů pro vázané kmity (3.83 a 3.90). Poté přináší srovnání výsledků jednotlivých metod a naměřených hodnot.

Kapitola 4 rozebírá spektrální vlastnosti, tj. závislosti modálních parametrů na základním parametru $\alpha = a/b$ popisujícím tvar kruhového válcového rezonátoru se standardním buzením (piné elektrody na čelních kruhových plochách). Rozebírá charakteristické typy disperze a průběhy frekvenčního spektra. Demonstruje, rozebírá a obrazy ilustruje pět typických módů kmitů.

Kapitola 5 podrobněji rozebírá specifika aplikací tlustých i tenkých disků v závislosti na typu užitého módu.

Závěr shrnuje výsledky práce a je doplněn bohatou literaturou (96 položek).

Přílohy A až D připomínají zápis základních rovnic lineární teorie v užitých vztažných soustavách, vyjádření základních parametrů pro jednotlivé módy a číselné hodnoty materiálových konstant potřebných v této oblasti.

Po **obsahové** stránce konstatuji, že práce dobře pokrývá problematiku stanovenou svým názvem. Přináší vedle řešení i názorná zobrazení formou grafů velmi kvalitně provedených. Může proto velmi dobře sloužit jako odrazový můstek pro řešení nejrůznějších konkrétních úloh v praktických aplikacích, i pro případné další teoretické rozbory v této oblasti.

Po **formální** stránce oceňuji, že práce je výjimečně pečlivě napsána. Má velmi dobrý sloh i rozvržení, působí i příjemně graficky a překlepů je minimálně. Všiml jsem si jen str. 18,1. řádek shora (18¹)

množství, 12^{15} přesmyknuto kvazistacionární, 12^{21} tenzorové, 75^{20} elektrických (má být elektrickým).

Více námitek mám z hlediska terminologie. Autor používá termínů

- *vlnové číslo* (namísto *vlnočet*, mj. dobře se „rýmující“ s *kmitočet*);
- archaické elektrické *posunutí* (namísto elektrická *indukce*).

Oba vznikly zřejmě převzetím a doslovným překladem z angličtiny; i tam však Angličanům norma IEC 80000 předepisuje termíny

- *wavenumber* namísto dvojslovného *wave number* (jedno slovo by mělo potlačit vazbu na termín *number*, číslo, platný jen pro bezrozměrovou veličinu, např. Reynolds number), a
- *electric flux density* namísto starého *displacement*, posunutí, kterým se rozumělo posunutí éteru coby nositele elektromagnetického pole pod vlivem vnějšího *napětí* na éter působícího).

Dále, parametr *k* je *bezrozměrový* (tj. má neutrální rozměr, obvykle značený 1), nikoli *bezrozměrný* (to je např. bod, mající počet rozměrů 0).

Konečně, nadpis sloupce v tabulce typu $c_{\lambda\mu}^E [10^{10} \text{ Pa}]$ je nelogický. V konkrétním zápisu $Q = \{Q\}[Q]$ veličiny *Q* znamená $\{Q\}$ číselnou hodnotu a $[Q]$ jednotku, takže zápis $[10^{10} \text{ Pa}]$ nedává smysl; je totiž $[Q] = 10^{10} \text{ Pa}$. Protože však je zřejmě $\{Q\} = Q/[Q]$, zní správný název sloupce $c_{\lambda\mu}^E / 10^{10} \text{ Pa}$, případně pro jistotu s užitím obyčejných závorek $c_{\lambda\mu}^E / (10^{10} \text{ Pa})$. Není to složitější (přibýlo jen lomítko, a hranaté závorky byly nahrazeny kulatými), a především to má logiku. U bezrozměrových veličin není ovšem potřeba psát např. *k* / 1. stačí prostě *k*, protože jde skutečně o číslo. (U Reynoldsova čísla by bylo nejspíš rozumné použít jako nadpis třeba $Ry / 10^5$.)

Striktně vzato, u mříže by se mělo mluvit spíše o chvění (její těžiště se nepohybuje) než o kmitech (kmitají jednotlivé částice mříže), ale to je spíš téma pro diskuzi na zcela jiných místech. Autor má také v poznámce pod čarou na str. 11 právně pochybnost o vhodnosti názvu „(vyšší) harmonická“ pro necelistvý násobek základní frekvence; pokud je mi známo, hudební akustici (z HAMU) by nedoporučovali název typu „aliquóta“ vystihující právě onu celistvost násobku a uvažovali ve svém oboru o obecném označení „tónové složky“ zahrnující jak *harmonické* = alikvótní pro celočíselné násobky základní frekvence, tak i složky *inharmonické* (neceločíselné násobky základní frekvence).

Toto vše jsou ovšem jen záležitosti zcela podružné a nezmenšující odbornou hodnotu práce.

Závěrem konstatuji, že předložená práce splňuje všechny požadavky kladené na habilitační práci.

Doporučuji pokračovat v habilitačním řízení její obhajobou před vědeckou radou fakulty mechatroniky.

Doc. Jan Obdržálek

V Praze, 2020-02-16

Ústav teoretické fyziky

Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy