

II. Piezoelektrické motory – regulace a řízení

prof. Václav Černý, CSc.

1. Úvod

Piezoelektrické motory (tzv. piezomotory) mají pro malé pohony množství cenných vlastností, např. velkou hustotu výkonu (W/kg), jsou kompaktní a tvarově adaptibilní. Zároveň ale tyto motory představují mnoho

O principu rotačního piezomotoru s postupnou vlnou se dočetli čtenáři časopisu ELEKTRO již v roce 1991[2], možnosti jeho použití jsou uvedeny v [3].

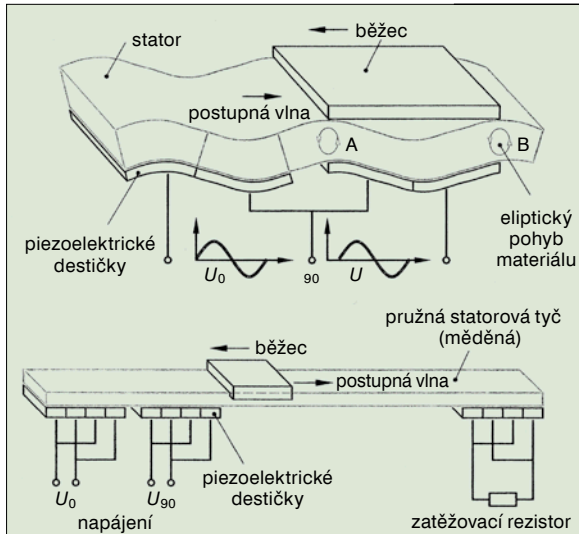
Princip piezomotoru lze snadno vysvětlit na jeho lineární variantě (obr. 1). Pohyblivá část motoru („běžec“) se pohybuje po

elektrické energie na mechanickou, vzniklými kmity se podél statorové tyče vytvoří mechanické kmity a postupná vlna, po které se v důsledku tření pohybuje běžec. Destičky jsou buzeny ze střídavého ultrazvukového zdroje ($f = 30$ až 50 kHz), proto se tyto motory někdy označují jako „ultrazvukové motory“. (Ultrazvukové motory pracují někdy na frekvencích od 20 kHz do 70 kHz – pozn. redakce.)

Měrný výkon piezomotoru je sice pětikrát až desítkrát vyšší než u tradičních motorů, ale jen tehdy, je-li napájecí frekvence shodná s rezonanční frekvencí motoru f_0 (obr. 2).

Rezananční frekvence f_0 je ovšem závislá na parametrech motoru, zejména na geometrických rozměrech statorového pásu a jeho modulu pružnosti, přičemž oba tyto **parametry motoru jsou závislé na teplotě** – je proto nutné rezonanční frekvenci f_0 stále přizpůsobovat skutečné teplotě, takže napájecí zdroj je nutné doplnit **regulátorem frekvence**.

Třetí síla je ale rovněž závislá na teplotě, což se projevuje zejména změnou rychlosti. Je tedy nutný další pomocný člen, tj. regulátor optimální rychlosti.



Obr. 1. Lineární piezomotor ve dvoufázové úpravě; běžec se pohybuje po vlnici se statorové podložce jako surfovací prkno

problémů: důležité provozní parametry, jako např. optimální pracovní frekvence a optimální součinitel mechanického tření, jsou silně závislé na teplotě. Je proto třeba vybavit je spolehlivou regulací, která umožní plné využití jejich předností.

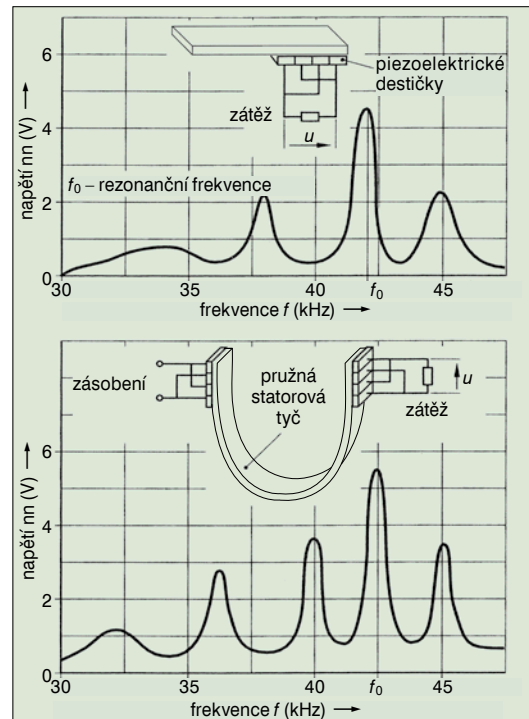
Piezoelektrické motory jsou velmi vhodné např. pro pohon malých robotů s přesnou regulací polohy a pro pružné automatické nastavení optických přístrojů (tzv. autofokus).

U těchto zařízení se vyžaduje:

- kompaktní provedení,
- tvarová adaptibilita,
- velký moment při malých otáčkách (rychlostech),
- malá hlučnost,
- velký přídržný moment,
- velká hustota výkonu (W/kg).

2. Princip piezomotoru

V roce 1880 objevil P. Curie (Pierre Curie, 1859–1906, francouzský fyzik a matematik, objevitel piezoelektrického jevu – pozn. red.), že některé nesymetrické krystaly vykazují v důsledku mechanických deformací v určitém směru elektrickou polarizaci. Tento jev je vratný, takže při přiložení napětí vznikají působením elektrického pole uvnitř krystalu mechanické deformace. Jsou-li vlastní kmity statoru a periodický přívod elektrické energie vhodně sladěny, vzniknou v krystalu stojaté kmity.

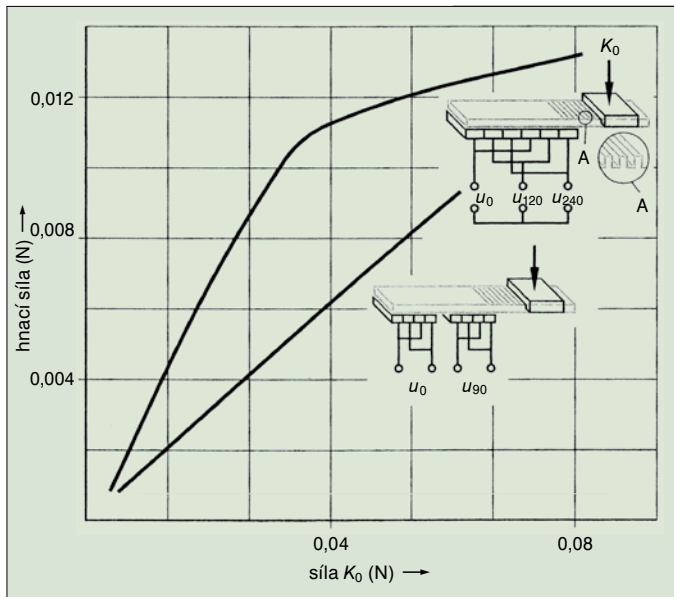


Obr. 2. Závislost napětí U na rezonanční frekvenci f , U je napětí na zatěžovacím rezistoru; v horní části je přímý lineární motor, v dolní části lineární motor ve tvaru „U“

vlnící se statorové tyči jako „surfovací prkno“ po příbojových vlnách. Stator lineárního piezomotoru je tvořen pružným měděným pásem, k jehož spodní straně jsou přilepeny piezoelektrické destičky. Zde nastává přeměna

3. Konstrukční provedení [1]

Dvoufázový piezomotor (obr. 1) má dvě oddělené skupiny piezoelektrických destiček, jedna skupina je napájena napětím U_0 , druhá



Obr. 3. Hnací síla F trojfázového a dvoufázového lineárního piezomotoru v závislosti na přitlačné síle F_0 ; nahoře vpravo je naznačeno trojfázové uspořádání lineárního piezomotoru, pod ním uspořádání dvoufázové

napětím U_{90} , tj. napětím posunutým o 90° . Vlna postupuje v podélném směru statorového pásu, přičemž jednotlivé částice materiálu v místech A, resp. B, vykonávají eliptický pohyb. Je-li běžec přitlačován vhodnou silou na podložku, vznikne třecí síla a běžec se uvede do pohybu (stejně jako surfovací prkno). Pohyb se uskuteční ve směru proti postupné ultrazvukové vlně.

Na konci statorového pásu je zapojen zatěžovací obvod se čtyřmi piezoelektrickými destičkami a společným zatěžovacím rezistorem R . Jeho úkolem je omezit vznik odrazových vln na konci statorového pásu.

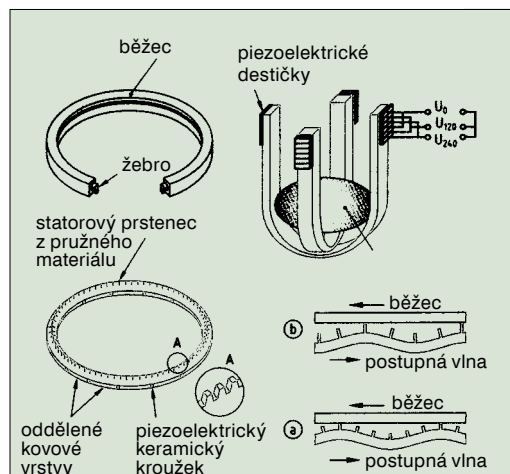
Trojfázový piezomotor (obr. 3 nahoře vpravo) má tři oddělené skupiny piezoelektrických destiček napájené z trojfázového symetrického zdroje. Jednotlivá fázová napětí U_0 , U_{120} a U_{240} jsou vzájemně posunuta o 120° . Zatěžovací obvod (není zakreslen) musí mít rovněž šest oddělených piezoelektrických destiček.

Trojfázové uspořádání napomáhá v lineární oblasti ve srovnání s dvojfázovým uspořádáním vyvodit více než dvojnásobnou hnací sílu a má také výhodnější dynamické vlastnosti.

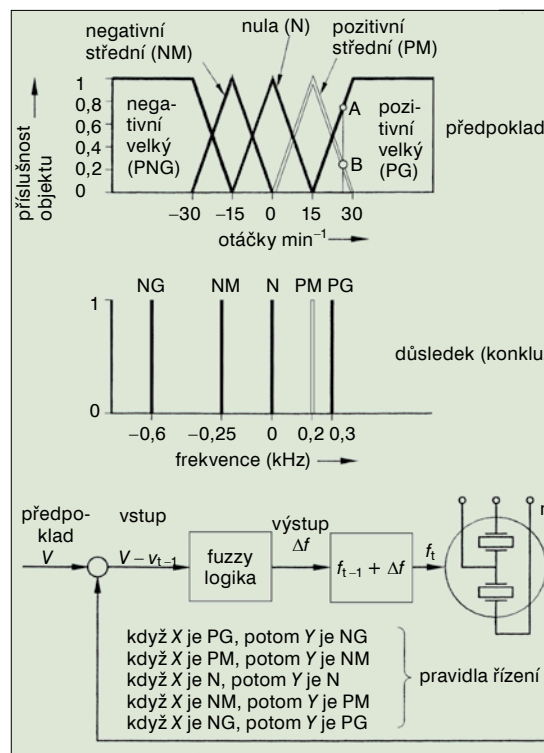
4. Piezomotor s více stupni volnosti (obr. 4)

Řada mechanismů pro pohon a nastavení polohy pracuje s více stupni mechanické volnosti. Jejich působení obvykle zajišťuje soustava několika točivých strojů. V [4] je např. popsán reluktanční motor se dvěma stupni volnosti a sférický motor se třemi stupni volnosti podle francouzského patentu. Všechny tyto stroje jsou ovšem velmi složité a nevhodné pro sériovou výrobu malých pohonů.

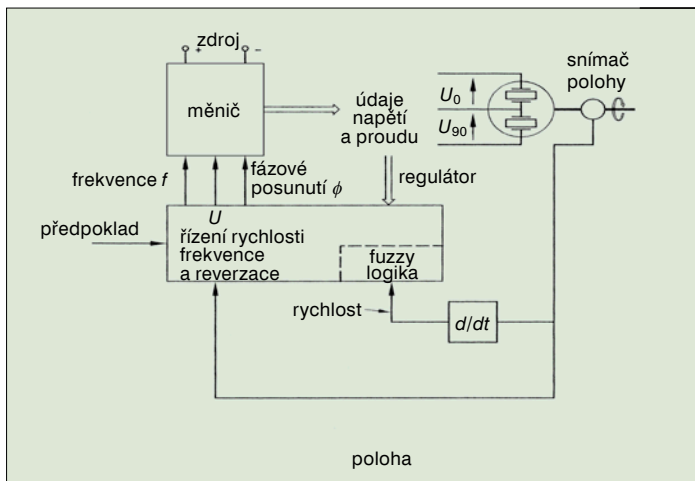
Podařilo se však vyvinout piezomotor s více stupni volnosti, který má pro malé robotizované pohony velmi výhodné vlastnosti – např. japonská firma Canon zvolila pro ovládání systému „autofokus“ prstencový



Obr. 4. Rozložené části rotačního piezomotoru se dvěma stupni volnosti; vlevo je prstencový piezomotor, vpravo nahoře dvojitý lineární piezomotor tvaru „U“ s rotorem ve tvaru kruhového vrchlíku; vpravo dole (a b) je naznačen pohyb rotoru prstencového piezomotoru po postupné vlně statorového prstence



Obr. 5. Princip fuzzy regulace piezomotoru; v dolní části je regulační schéma dvoufázového piezomotoru



Obr. 6. Blokovo schéma řízení piezomotoru s fuzzy regulátorem; řízení se uskutečňuje prostřednictvím frekvence f , napětí U a fázového posuvu ϕ

nota Y je negativní velká (NG), takže $\Delta f = -0,6$ kHz a korigovaná frekvence $f_t = 40 - 0,6 = 39,4$ kHz.

Na obr. 6 je blokovo schéma fuzzy regulátoru, který zajišťuje regulaci rychlosti, frekvence a reverzaci prostřednictvím charakteristických veličin frekvence f , napětí U a fázového posuvu ϕ . Měření polohy se odvozuje z údajů snímače úhlového natočení, otáčky z derivačního členu.

Měření prokázala, že popsany fuzzy regulátor umožňuje pružnou a rychlou regulaci piezomotoru.

5. Závěr

Piezomotory mají mnoho předností, zejména velkou hustotu výkonu (W/kg) a kompaktní provedení, vyžadují však komplexní regulaci v závislosti na teplotě a otáčkách. Relativně jednoduchá regulace založená na fuzzy logice dovoluje využít všechny přednosti pohonů s piezomotory. Takovéto systémy se již nyní uplatňují v mnoha náročných pohonech, zejména malých robotizovaných systémech. Jednoduchost fuzzy regulátoru a snadná sériová výroba jsou zárukou technického i ekonomického úspěchu těchto pohonů.

Literatura:

- [1] TEODORESCU, D. H.: *Leistungsfähigkeit von Ultraschallmotoren*. Elektrotechnik (Švýcarsko), 1999, č. 5, s. 59–63.
- [2] ČERNÝ, V.: *Piezomotor s postupnou vlnou*. ELEKTRO, 1991, č. 9, s. 224–225.
- [3] SCHÖNER, H. P.: *Piezoelectric Motors and Their Applications*. ETEP, 1992, č. 6, s. 367–371.
- [4] ČERNÝ, V.: *Elektrické stroje se dvěma a třemi stupni volnosti*. Elektrotechnický obzor, 1985, č. 11, s. 659–660.

kolmých osách. Jestliže se dva piezomotory uvedené na obr. 4 spojí v jeden, získá se rotační pohon se dvěma stupni volnosti. Takovýto motor tedy může zajistit velmi komplikované pohyby, které se v robotizovaných automatech vyžadují.

Samozřejmě i zde lze všechny tyto přednosti využít jen tehdy, jestliže je zajištěna dynamická stabilita a nezávislost na změnách teploty pomocí pružné a rychlé regulace.

5. Způsob regulace

Pro regulaci piezomotorů se velmi dobře hodí regulátory, které pracují na principu fuzzy logiky.

Fuzzy logika vyjadřuje vlastnosti objektu, tj. příslušnost objektu do určité třídy hodnotami ležícími mezi 0 a 1. Platí zde:

- 0 – objekt s určitostí nepatří do této třídy,
- 0,2 – asi stěží,
- 0,5 – možná, snad,
- 0,8 – pravděpodobně,
- 1 – určitě ano.

Aplikace fuzzy logiky dovoluje navrhnout dosti jednoduchou strukturu regulace piezomotoru (obr. 5); např. při naznačených otáčkách 25 min^{-1} přísluší tato hodnota otáček k hodnotám pozitivním velkým (PG) třídou 0,8 (bod A – pravděpodobně ano) a k hodnotám pozitivním středním (PM) třídou 0,2 (bod B – stěží, sotva ano). Z naznačených vyhodnocovacích křivek získá systém první, „neostré“ vyhodnocení a může stanovit závěr (např. je-li vstup X PG, výstup Y bude NG atd.).

V regulačním schématu v dolní části obr. 5 je V předpokládaná rychlost, v_t měřená rychlost, Δf vyžadovaná změna frekvence a f_t korigovaná hodnota napájecí frekvence.

Je-li např. požadovaná rychlost otáček 80 min^{-1} a naměřená hodnota 30 min^{-1} , je hodnota $X = 50 \text{ min}^{-1}$, tzn. že X patří k hodnotám pozitivním velkým (PG) a hod-