

# Vliv magnetického pole Halbachovy soustavy na chování elektrod v kapalině

Jakub Jaroš <jakub.jaros@tul.cz>, Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.

Průtokoměr je měřicí zařízení, bez kterého si těžko dovedeme představit celou řadu technologií. Jedním z mnoha typů je indukční průtokoměr měřící průtok indukováním elektrického napětí z rychlosti proudění tekutiny a přítomného magnetického pole. Střídavé magnetické pole je generováno dvěma cívkami na vnějším obalu průtokoměru. Netrvalo dlouho a zrodila se myšlenka menší energetické náročnosti, tedy nahrazení cívek magnety. Již třetím rokem se věnuji výzkumu použití neměnného magnetického pole a materiálu elektrod. Veškeré předpoklady nejprve ověřuji v simulačním programu Comsol Multiphysics. V letošní diplomové práci se mi podařilo sestavit průtokoměrné čidlo, které dle všech předpokladů bude možné pro měření průtoku použít.

**Klíčová slova:** Halbachova soustava magnetů, průtokoměr, indukované napětí, Comsol

## Úvod

Prvním z úkolů bylo vytvoření modelu Halbachovy soustavy pro potrubí průměru 40 mm v Comsolu. Ta slibuje lineární vnitřní magnetické pole a minimální vyzařování do okolí, kde by z pohledu EMC platilo za rušení. Po vývoji vhodných parametrů soustavy bylo zapotřebí její prototyp vyrobit. Pro splnění posledního úkolu, zjištění vlivu pole na chování elektrod v kapalině, musel být zapojen kompletní oběhový systém. Zde je předpoklad existence zeta potenciálu, který ztěžuje měření napětí na elektrodách. Jedná se o elektrokinetický potenciál na styku elektrod a kapaliny. Součástí posledního úkolu je i porovnání různých materiálů elektrod. Některé z nich jsou vůči účinkům nežádoucího potenciálu imunní. Doposud není kvůli elektrochemickému potenciálu známý žádný takto řešený a funkční průtokoměr. S příchodem skleného karbonu (glassy carbon) by se ale vše mohlo změnit. Tato práce se nevěnuje elektronice vyhodnocující měřené napětí.

## Metodika

Pokud teď nebudeme řešit typ magnetického pole, používaný princip indukčního průtokoměru je velmi jednoduchý. Potrubím protéká tekutina rychlostí  $\vec{v}$ . Kolmo na směr proudění působí magnetická indukce  $\vec{B}$ . Pokud dáme do rovnosti elektrickou a magnetickou složku Lorentzovy síly (1) můžeme odvodit vztah pro intenzitu magnetického pole.

$$Q \cdot \vec{E} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

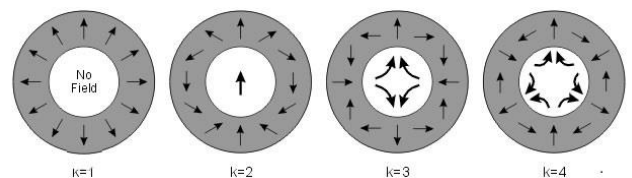
Ta vzniká jako následek předchozích dvou veličin a její směr je na ně též kolmý (2).

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Po integraci intenzity přes vzdálenost mezi elektrodami dostaneme hodnotu elektrického napětí v daném okamžiku (3).

$$U = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

Tato teorie platí i při záměně cívek za magnety. Pro co největší rozdíl mezi žádaným signálem a šumem je dobré mít co nejsilnější, nehomogennější a nejlineárnější magnetické pole. Právě tyto všechny parametry splňují některá uspořádání kruhové Halbachovy soustavy. Magnety poskládané v kruhu jsou magnetizovány definovaným směrem (Obrázek 1).



Obrázek 1: Soustava s  $N = 12$  a různými  $k$

Parametrem pro zjištění úhlů magnetizace je  $k$ . To se volí z celých čísel od 1 do 4. Podle vzorce (4) je možné vypočítat rozdílový úhel magnetizace dvou magnetů ze znalosti celkového počtu magnetů  $N$ . Musí být také splněna podmínka celočíselného dělení pro vztah  $\frac{N}{k}$ .

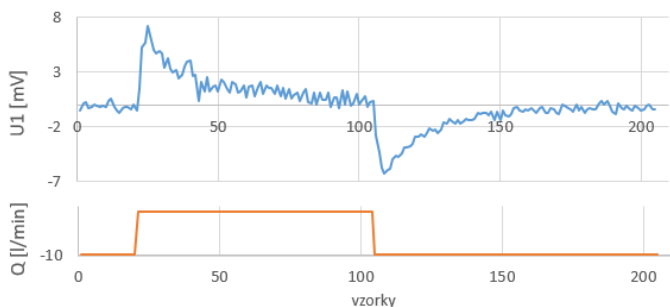
$$\alpha = k \cdot (360/N) \quad (4)$$

## Výsledky a diskuze

První Halbachovu soustavu jsem namodeloval s  $N = 16$  a zkoumal vliv různých  $k$ , respektive ověřoval obrázek 1. Bohužel jsem ji byl donucen přemodelovat a sestavit z krychlových magnetů s hranou 20 mm a s  $N = 12$ . Parametr  $k$  byl zvolen rovný dvěma pro lineární pole. Ve středu byla odsimulovaná indukce 71 mT a velmi dobrá linearita. U přechozí soustavy s tvarovými magnety bez vzduchových mezer a menším poloměrem byla nasimulována hodnota 150 mT.

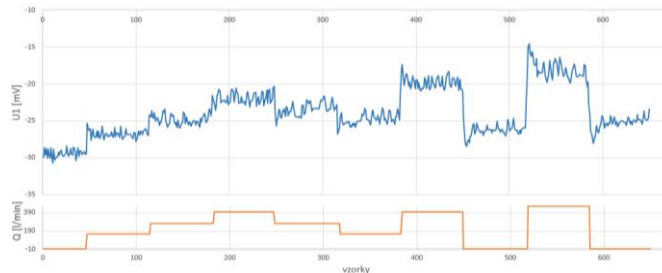
Následně jsem soustavu vyrobil. Držák magnetů byl vytištěn na školní 3D tiskárně. S Ing. Miroslavem Novákem, Ph.D. také došlo k jejímu přeměření a byla konstatována dostatečná homogenita i linearita. Ve středu bylo pouze 50 mT. Nutno podotknout, že jsem neudělal tak přesnou korelaci mezi modelem a zakoupenými magnety jako v bakalářské práci.

Pro přeměření byla využita průtokoměrná linka v laboratoři Ing. Lubomíra Slavíkova, Ph.D. Měřicí ústředna a zaznamenávací program v LabVIEW byly k dispozici z jiných měření s průtokoměry. Začal jsem tedy připojením jednoho čidla a paládiových elektrod. Následné měření ukázalo skvělý výsledek. Napětí na elektrodách opravdu reagovalo na změnu průtoku (Obrázek 2). Reakce jsou však velmi pomalé.



Obrázek 2: Graf naměřeného napětí na elektrodách při zapnutí a vypnutí oběhového čerpadla

Poté následovaly další pokusy, ve kterých jsem měl problémy s nesprávným uzemněním. Dále jsem měřil opakovatelnost měření na stejné skoky průtoku. Když jsem měl jistotu, že napětí na elektrodách vyhovuje, pustil jsem se do měření napětí na elektrodách různých materiálů, což má návaznost na ročníkový projekt z minulého roku. Nejvhodnější průběh měly elektrody ze skelného karbonu, případně z platiny. Jako finální měření jsem tedy použil právě ty karbonové a provedl delší měření s více skoky (Obrázek 3).



Obrázek 3: Měření s elektrodami ze skelného karbonu

## Závěr

K prvnímu bodu zadání mě velice mrzí, že se nepodařilo i přes dostatečnou časovou rezervu najít výrobce zakázkové Halbachovy soustavy. Silnější magnetické pole by napomohlo k ještě lepším výsledkům. Celkově se dle mého názoru povedlo velmi dobře odladit konečné čidlo. Model v Comsolu se ukázal jako věrný. Veškeré výstupy, většinou v podobě grafů, vycházely dle předpokladu. Doufám, že se tématu nějaký student ujme a zvládne realizovat i funkční měřicí obvody.

## Poděkování

Děkuji grantu SGS a realizačnímu týmu, jmenovitě Ing. Lukáši Matějů a Ing. Janu Hybšovi za organizaci konference a velmi štedrou odměnu pro zúčastněné studenty. Dále bych rád opět poděkoval Ing. Lubomíru Slavíkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce. Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci 2020.

## Reference

- [1] Brief Introduction of Halbach Array. Magnet-SDM [online]. [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.magnet-sdm.com/2018/10/30/halbach-array/>
- [2] Halbach Array Magnets. MPCO Magnetic Products [online]. [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.mpcomagnetics.com/magnetic-components/halbacharray-magnets/>
- [3] JAROŠ, Jakub. Studium permanentních magnetů. Liberec, 2018. Bakalářská. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
- [4] JAROŠ, Jakub. Model chování kapaliny v elektromagnetickém poli. Liberec, 2019. Ročníková. Technická univerzita v Liberci, FM. Vedoucí práce Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.