

indukované napětí U_i . To nám umožňuje měřit napětí U_i , které má význam elektromotorického napětí a jehož přímé měření není možné. Obě napětí však mají opačnou polaritu (vysvětlení viz čl. 2.2). To je ve vztahu

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

vyjádřeno znaménkem minus.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce v uvedeném tvaru udává *střední hodnotu* indukovaného elektromotorického napětí za velmi malou dobu Δt . Je to vyjádření zákona v *diferenčním tvaru*. Má-li výraz $\Delta \Phi / \Delta t$ pro neomezeně se zmenšující dobu Δt určitou mezní hodnotu

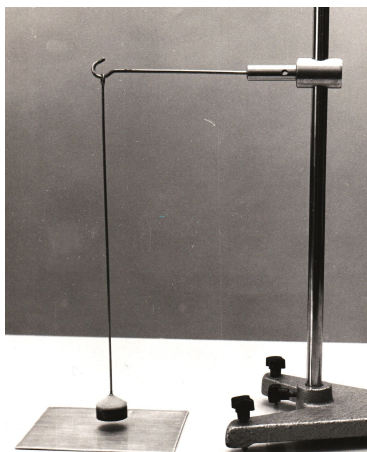
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{d\Phi}{dt},$$

pak je okamžitá hodnota indukovaného elektromotorického napětí U_i dána derivací magnetického indukčního toku podle času, tedy v *diferenciálním tvaru*

$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

R6.2 Indukované proudy ve vodičích

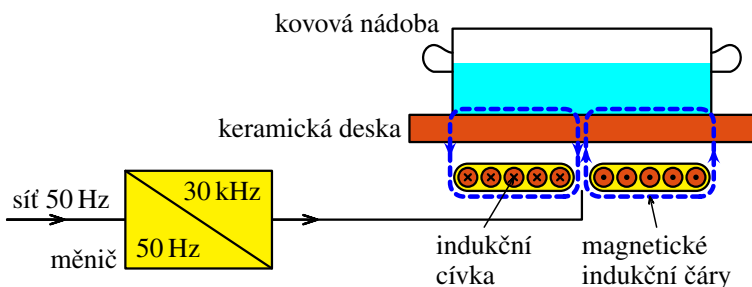
V čl. 6.3 jsme se zabývali vznikem indukovaného proudu v uzavřeném obvodu tvořeném jedním závitem vodiče, popř. cívkou. Indukovaný proud vzniká také ve vodičích, které mají tvar desky, hranolu apod. Přesvědčíme se o tom jednoduchým pokusem, jehož uspořádání je patrné z obr. R6-2. Tyčinka opatřená na konci feritovým magnetem tvoří kyvadlo, které kmitá s poměrně malým tlumením. Když na stůl pod kyvadlo položíme hliníkovou desku, kmitání velmi rychle ustane. Energie kmitavého pohybu kyvadla se přeměnila v energii indukovaných proudů v hliníkové desce.



R6-2 Demonstrace vzniku indukovaných proudů ve vodivé desce

Indukované proudy v plošných vodičích si můžeme představit v podobě miniaturních vírů, které svými účinky působí proti magnetickému poli vytvářenému kyvadlem a brzdí jeho pohyb. Tyto proudy označujeme jako **vířivé proudy**. Jejich objevitelem je francouzský fyzik LÉON FOUCAULT (čti fukó; 1819–1868) a říkáme jim také *Foucaultovy* [fukótovy] *proudy*.

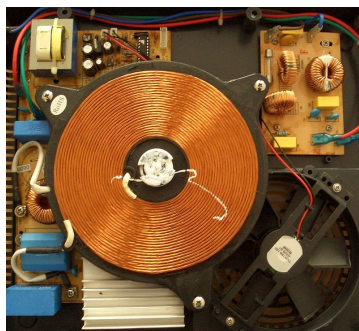
Vířivé proudy se využívají v technické praxi. Příkladem může být *indukční vařič*, který představuje energeticky úsporný spotřebič pro tepelnou úpravu potravin. Schematický náčrt vařiče je na obr. R6-3. Základní součástí je plochá cívka z měděného drátu, umístěná pod keramickou deskou. Nádoba k vaření



R6-3 Princip indukčního vařiče

musí být z vodivého materiálu a je postavena na desce. Cívkou prochází časově proměnný proud a jeho magnetické pole budí v materiálu dna nádoby vířivé proudy, kterými se nádoba zahřívá. Kdyby cívka byla napájena střídavým proudem z elektrické sítě, který má frekvenci 50 Hz, ohřev by byl nedostatečný. Zvětšení intenzity vířivých proudů se dosáhne tak, že v tzv. měniči je pomocí elektronických obvodů proud o frekvenci 50 Hz periodicky přerušován. Přerušování proudu probíhá s podstatně vyšší frekvencí (30 kHz), což vede ke zvětšení indukovaných proudů. K vaření na indukčním vařiči se používají nádoby z feromagnetického materiálu s větší plochou hysterezní smyčky. Tak se získá další teplo jako důsledek magnetizace materiálu nádoby. Na obr. R6-4 je pohled na cívku indukčního vařiče.

Indukční ohřev je příkladem praktického využití Lenzova zákona (čl. 6.3) a Jouleova zákona (čl. 2.8). Od ohřevu



R6-4 Vnitřní část indukčního vařiče

topnou spirálou u běžných vaříčů se indukční ohřev liší tím, že probíhá jen v materiálu nádoby, zatímco jak cívka vaříče, tak keramická deska se přímo nezahřívají. Keramická deska se však postupně zahřeje dotykem s nádobou. U indukčního vaříče se dosahuje až dvojnásobné účinnosti přeměny elektrické energie na teplo (až 90 %), než u vaříče s topnou spirálou.

Významné je využití indukčního ohřevu v technické praxi např. k tavení kovů, kalení ocelových výrobků nebo lisování za tepla. K indukčnímu ohřevu se používají vysokofrekvenční generátory o výkonu řádově 10^2 kW a frekvenci proudu 50 kHz až 500 kHz. Indukční cívka má jen několik závitů a je vyrobena z měděné trubky, kterou protéká chladicí voda. V dutině cívky se vytváří rychle se měnící magnetické pole a výrobek se indukčními proudy zahřeje na vysokou teplotu (obr. R6-5).



R6-5 Indukční ohřev

Indukční vířivé proudy se uplatňují i v jiných souvislostech, např. v konstrukci *indukční brzdy*, která se používá zejména v elektrických dopravních prostředcích (tramvaje, elektrické lokomotivy aj.). Brzdu tvoří kovový kotouč rotující v magnetickém poli elektromagnetu. V kotouči brzdy se indukují vířivé proudy, kterými se kotouč zahřívá na úkor mechanické energie jeho rotačního pohybu. Brzdný účinek lze regulovat velikostí proudu v elektromagnetu. Teplo je z kotouče odváděno do okolního vzduchu, popř. je kotouč chlazen nuceným oběhem vzduchu. Pokud se kotouč otáčí malou rychlostí, je brzdný účinek malý. Roste však s druhou mocninou rychlosti, takže při velké rychlosti je brzdný účinek velmi výrazný.

Úlohy

- 1 Jaký je rozdíl mezi indukčním ohřevem a ohřevem v mikrovlnné troubě?
- 2 Materiál nádob pro vaření na indukčním vařiči nesmí mít příliš malou rezistivitu (např. měď). Vysvětlete.
- 3 Proč k indukčnímu ohřevu přispívá také jev hystereze feromagnetického materiálu, ze kterého je vyrobena nádoba na vaření?
- 4 Oblíbeným prostředkem pro udržení tělesné kondice je rotoped. Zátěž při cvičení na rotopedu se řídí pomocí magnetického brzdného systému nebo indukční brzdou. Na internetu najdete popis principu těchto systémů. Vyložte z fyzikálního hlediska rozdíl mezi nimi a způsob regulace zátěže.

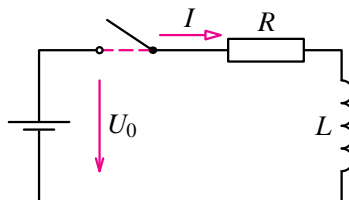
R6.3 Elektrický obvod s cívkou a kondenzátorem

Jestliže elektrický obvod s cívkou nebo kondenzátorem připojíme ke zdroji elektrického napětí, jehož hodnota je konstantní, nezačne obvodem procházet ihned ustálený elektrický proud jako v případě obvodu s rezistorem. Ustálený stav nastane až po určité době, během níž probíhá tzv. *přechodný děj*. V obvodu s cívkou proud narůstá postupně, až se ustálí na hodnotě, která odpovídá odporu cívky, popř. celého obvodu. Naopak v obvodu s kondenzátorem se kondenzátor v průběhu přechodného děje postupně nabíjí, přičemž se nabíjecí proud zmenšuje a klesne na nulu v okamžiku, kdy je kondenzátor nabit na hodnotu připojeného zdroje napětí.

Popíšeme si děje v obvodu s cívkou a s kondenzátorem podrobněji.

Přechodný děj v obvodu s cívkou

Přechodný děj v obvodu s cívkou ukážeme pokusem podle obr. R6-6. Obvod tvoří cívka s indukčností L , s níž je sériově spojen rezistor o odporu R (může to být odpor vinutí cívky). V okamžiku, kdy je obvod připojen ke zdroji napětí U_0 , začíná cívkou procházet proud a v okolí závitů cívky vzniká magnetické pole. To podle Lenzova zákona



R6-6 Demonstrace přechodného děje v cívkě