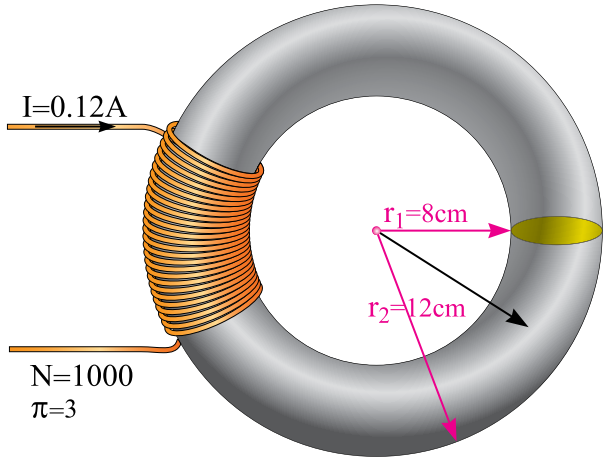


شکل ۳۹ ـ ۱

۱ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد دیامغناطیس

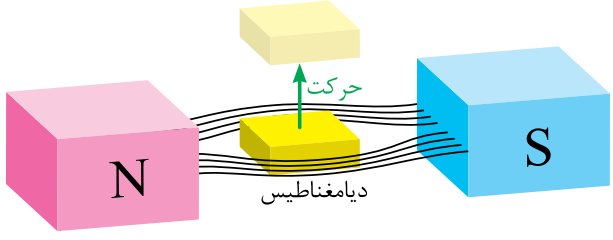
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد دیامغناطیس کمی کم‌تر از یک می‌باشد. جیوه، نقره، قلع و آب از این مواد هستند.

در مـواد دیامغناطیـس مولکول‌هـای مغناطیسـی بوجود نمی‌آید. هنگامی که مواد دیامغناطیس در میدان مغناطیسـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۰ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ فوران مغناطیسی را از خود عبور نمی‌دهند.

ـ میدان مغناطیسی را غیر یکنواخت می‌کنند.

ـ از طرف میدان مغناطیسی دفع می‌شوند.



شکل ۴۰ ـ ۱

۲ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد پارامغناطیس

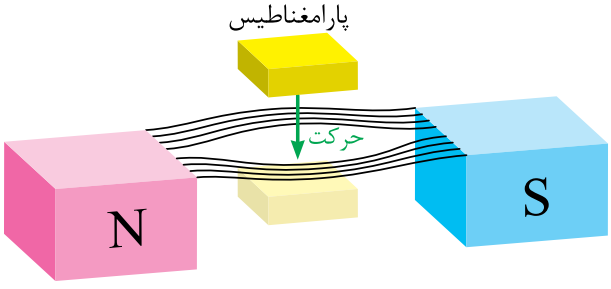
ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد پارامغناطیس کمی از یک بیش‌تر است. آلومینیم، هوا و پلاتین از این مواد هستند.

مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی دارنـد؛ هنگامـی کـه مـواد پارامغناطیـس در میدان مغناطیسـی آهن‌ربای قوی مطابق شکل (۴۱ ـ ۱) قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌هـای مغناطیسـی آن‌ها می‌کوشـند تا در جهت میدان مغناطیسی منظم شوند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسـی کشـیده می‌شوند. عامل این حرکت نیروی جاذبه بین مولکول‌های مغناطیسی این مواد و میدان مغناطیسی است.

ـ بـه آهن‌ربا تبدیل می‌شـوند و با خـروج از میدان مغناطیسـی، خاصیـت آهن‌ربایـی خـود را از دسـت می‌دهند.



شکل ۴۱ ـ ۱

۳ ـ ۱۶ ـ ۱ ـ مواد فرومغناطیسی

ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی μ_r مواد فرومغناطیس بین ۲۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ اسـت. آهن و آلیاژهای آن از این مواد هستند.

مواد فرومغناطیسـی مولکول‌های مغناطیسی بسیار قـوی دارند. هنگامی که مـواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی آهن‌ربای قوی قرار می‌گیرند:

ـ مولکول‌هـای مغناطیسـی آن‌هـا در جهت میدان مغناطیسی منظم می‌شوند و به بالاترین درجه هم‌سویی می‌رسند.

ـ به طرف ناحیه قوی میدان مغناطیسـی کشـیده می‌شوند و جذب قطب‌ها می‌شوند.

ـ بـه آهن‌ربا تبدیل می‌شـوند و با خـروج از میدان مغناطیسـی، خاصیـت آهن‌ربایـی خـود را از دسـت نمی‌دهند.

اگر دمای مواد فرومغناطیس از یک مقدار معین که دمای «کوری[1]» نامیده می‌شـود بالاتر برود هم‌سـویی مولکول‌هـای مغناطیسـی از بیـن مـی‌رود و این مواد پارامغناطیس می‌شوند.[2]

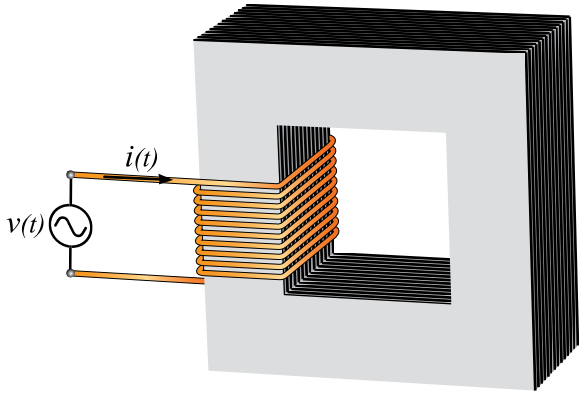
در جدول (۱ ـ ۱) ضریب نفوذ مغناطیسـی نسـبی μ_r چند نمونه از مواد در ناحیه اشـباع نشده با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند.

مواد فرومغناطیس		مواد پارامغناطیس		مواد دیامغناطیس	
ماده	μ_r	ماده	μ_r	ماده	μ_r
آهن بدون آلیاژ	تا ۶۰۰۰	هوا	۱/۰۰۰۰۰۰۴	جیوه	۰/۹۹۹۷۵
فولاد الکتریکی	تا ۶۵۰۰	اکسیژن	۱/۰۰۰۰۰۰۳	نقره	۰/۹۹۹۹۸۱
آهن نیکل آلیاژ	۳۰۰۰۰۰	آلومینیم	۱/۰۰۰۰۲۲	قلع	۰/۹۹۹۸۸
فریت مغناطیسی	۱۰۰۰۰	پلاتین	۱/۰۰۰۳۶	آب	۰/۸۹۹۹۱

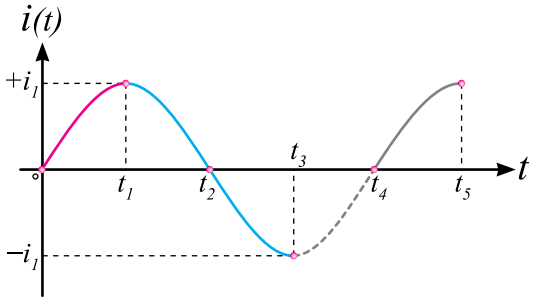
جدول ۱ ـ ۱

۱۷ ـ ۱ ـ حلقه هسیترزیس

سـیم‌پیچی با هسـته فرومغناطیـس متصل به یک منبع متناوب سینوسـی در شکل (۴۲ ـ ۱) نشان داده شده اسـت، که از آن جریان الکتریکی متناوب $i(t)$ به شکل موج (۴۳ ـ ۱) می‌گذرد.



شکل ۴۲ ـ ۱

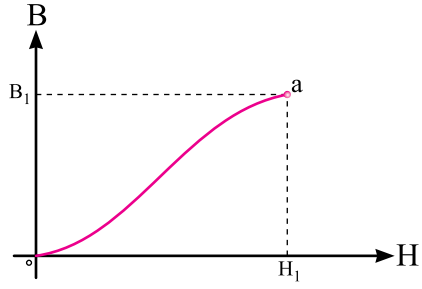


شکل ۴۳ ـ ۱

با فرض این‌که هسته در ابتدا مغناطیس نشده است، شـدت میدان H توسـط جریان الکتریکی $i(t)$ که به آرامی افزایش می‌یابد، زیاد می‌شـود؛ لذا چگالی فوران مغناطیسـی B هسته مطابق منحنی مغناطیسی oa در شـکل (۴۴ ـ ۱) تغییر خواهد کـرد. B_1 چگالی فوران مغناطیسـی نقطه a مربوط به شدت میدان مغناطیسی H_1 متناظر با i_1 است.

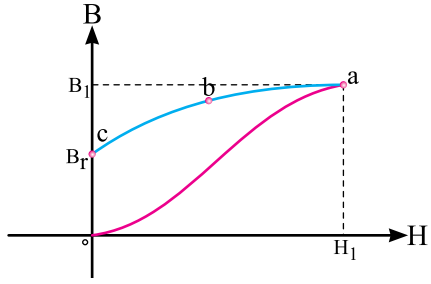
۱. Curie

۲. برای آهن دمای کوری ۱۰۴۳ درجه کلوین است.



شکل ۴۴ ـ ۱

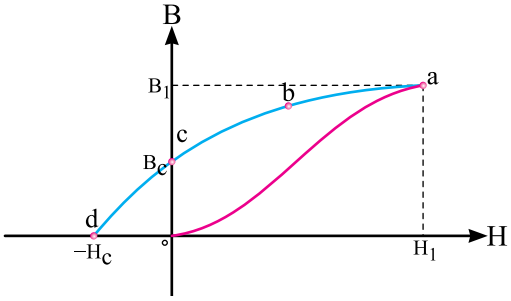
بعد از زمان t_1 جریان الکتریکی $i(t)$ رو به کاهش می‌گذارد و متناظر با آن شدت میدان مغناطیسی H نیز کاهش می‌یابد و منحنی مغناطیسی مسیر abc را مطابق شکل (۴۵ ـ ۱) دنبال خواهد کرد.



شکل ۴۵ ـ ۱

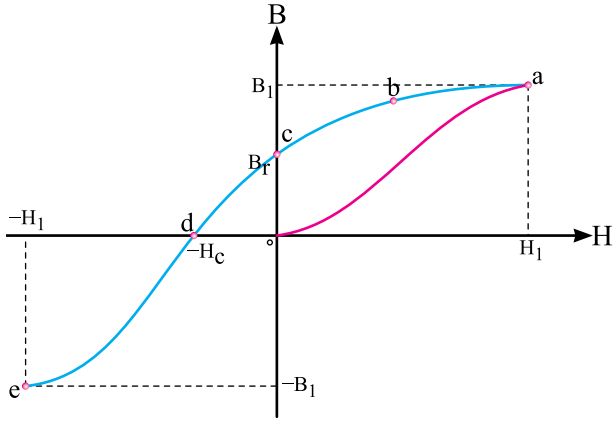
با صفر شدن جریان در t_2، شدت میدان مغناطیس H صفر می‌شود اما چگالی فوران مغناطیسی هسته به B_r می‌رسد. چگالی فوران مغناطیسی B_r، «پس‌ماند» هسته نامیده می‌شود.

بعد از زمان t_2 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ سیم‌پیچ معکوس می‌شود؛ لذا شدت میدان مغناطیسی H وارونه می‌گردد. چگالی فوران مغناطیسی B_r در هسته کاهش می‌یابد و در مقداری از H مثلاً $-H_c$ از میان خواهد رفت و صفر می‌شود. شدت میدان مغناطیسی $-H_c$ که پس‌ماند هسته B_r را از بین می‌برد، « شدت میدان مغناطیسی خنثی کننده[1]» نامیده می‌شود. شکل (۴۶ ـ ۱)



شکل ۴۶ ـ ۱

با افزایش شدت میدان مغناطیسی H در جهت وارونه، چگالی فوران مغناطیسی B هسته مطابق منحنی de در شکل (۴۷ ـ ۱) تغییر خواهد کرد.

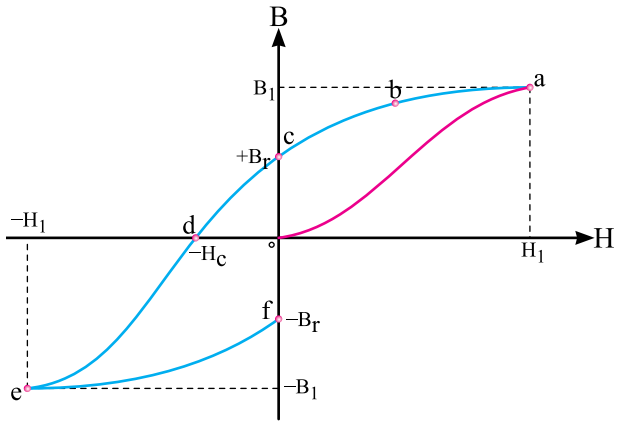


شکل ۴۷ ـ ۱

چگالی فوران مغناطیسی $-B_1$ در نقطه e مربوط به شدت میدان مغناطیسی $-H_1$ متناظر با $-i_1$ است.

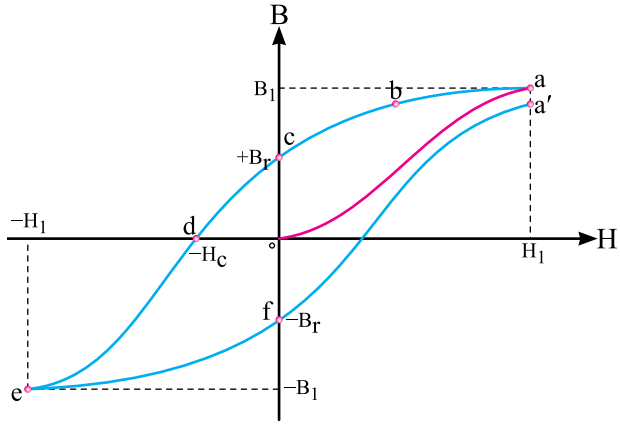
بعد از زمان t_3 با تغییر جریان الکتریکی $i(t)$ شدت میدان مغناطیسی H تغییر خواهد کرد و منحنی B-H مسیر ef را مطابق شکل (۴۸ ـ ۱) دنبال خواهد کرد. تا با صفر شدن جریان الکتریکی در t_4، شدت میدان مغناطیسی H صفر می‌شود و چگالی فوران مغناطیسی به $-B_r$ می‌رسد.

۱. Coercive Force



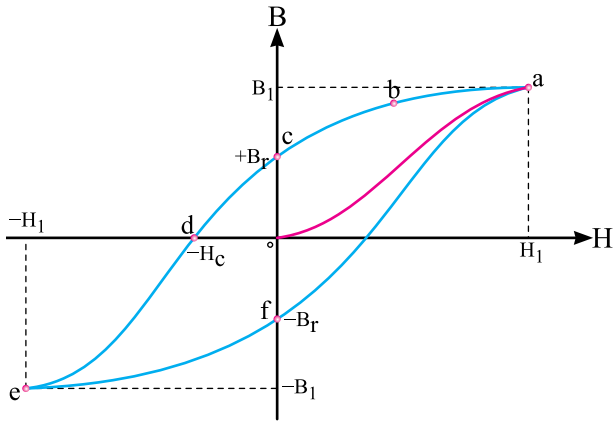
شکل ۴۸ ـ ۱

بعد از زمان t_4 جهت جریان الکتریکی $i(t)$ در سیم‌پیچ معکوس می‌شود و شدت میدان مغناطیسی H نیز وارونه می‌گردد و افزایش می‌یابد در این صورت منحنی B-H مسیر fga را طی خواهد کرد. شکل (۱ ـ ۴۹)



شکل ۴۹ ـ ۱

باید دانست حلقه منحنی مغناطیسی بسته نمی‌شود و پس از چند سیکل مغناطیس شدن هسته حلقه تقریباً بسته می‌شود. این شکل به «حلقه پس‌ماند» یا «حلقه هیسترزیس[1]» معروف است. شکل (۱ ـ ۵۰)



شکل ۵۰ ـ ۱

حلقه پس‌ماند یا هیسترزیس نشان می‌دهد:

ـ رابطه بین چگالی فوران مغناطیسی B و شدت مغناطیسی H غیر خطی و چند مقداری است.

ـ اگرچه جریان الکتریکی سیم‌پیچ در نقاط C و F صفر است، اما هسته مغناطیس می‌باشد و دارای پس‌ماند مغناطیسی است.

ـ به ازای یک حلقه هیسترزیس، جهت شدت میدان مغناطیسی هسته عوض می‌شود؛ لذا مولکول‌های مغناطیسی هسته می‌گردند و جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند.

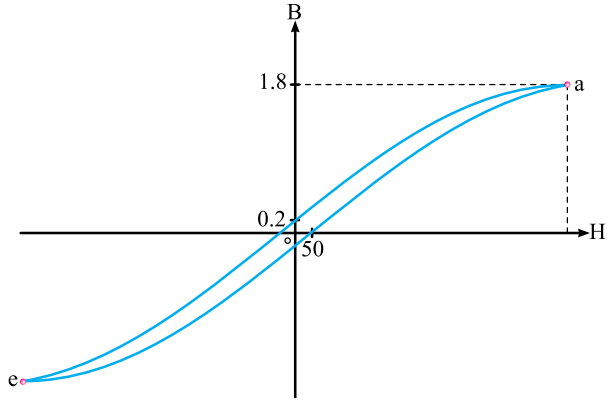
به ازای هر سیکل جریان الکتریکی سیم‌پیچ، یک بار حلقه هیسترزیس تکرار می‌شود. بنابراین در هر ثانیه تعداد حلقه‌های هیسترزیس با فرکانس جریان سیم‌پیچ برابر خواهد شد. بدین ترتیب متناسب با فرکانس جریان سیم‌پیچ، جهت میدان مغناطیسی در هسته تغییر می‌کند. مقدار انرژی که در یک ثانیه صرف تغییر جهت میدان مغناطیسی در هسته می‌شود را «تلفات هیسترزیس» تعریف می‌کنند. تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود و تابع فرکانس جریان الکتریکی

۱. Hystersis Loop

سیم‌پیچ است و متناسب با مساحت حلقه هیسترزیس می‌باشد. بدیهی است در جریان الکتریکی مستقیم هسته تلفات هیسترزیس ندارد. چرا؟

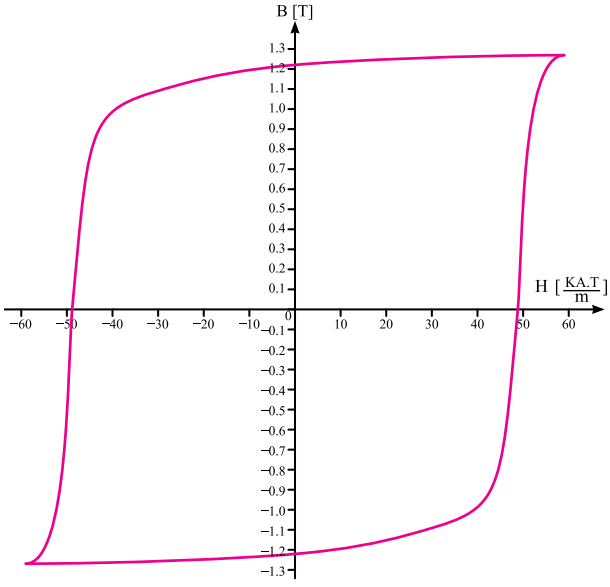
در ماشین‌های الکتریکی، ترانسفورمرها و آهن‌رباهای موقتی جنس هسته از مواد فرومغناطیسی موسوم به «آهن نرم[1]» انتخاب می‌شود.

چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در آهن نرم بسیار کم است لذا تلفات هیسترزیس در آن‌ها کاهش می‌یابد. حلقه هیسترزیس آهن نرم وسیع نیست و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً کوچکی دارند. شکل (۵۱ ـ ۱).



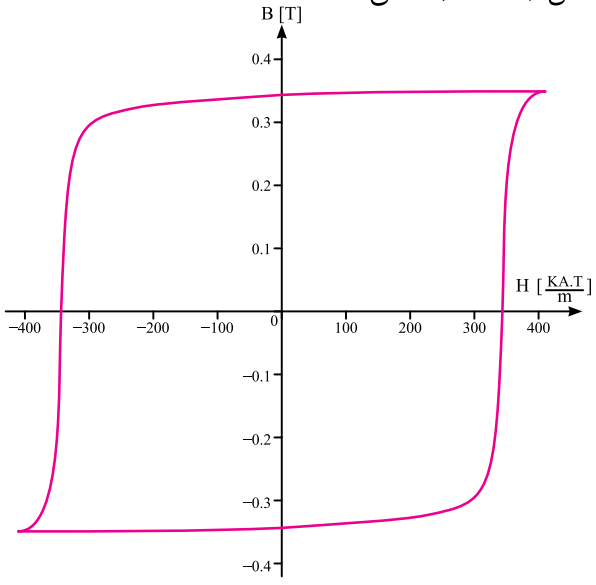
شکل ۵۱ ـ ۱

در آهن‌رباهای دایم[2] جنس هسته غالباً آلیاژی از آهن، نیکل و کبالت موسوم به «آهن سخت»[3] انتخاب می‌شود. یک دسته از این آلیاژها «النیکو»[4] است که چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r آن‌ها بسیار زیاد می‌باشد. حلقه هیتسرزیس آهن سخت وسیع است و شدت میدان خنثی‌کننده H_c نسبتاً بزرگی دارند. حلقه هیسترزیس الینکو ۵ در شکل (۵۲ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۲ ـ ۱

در مدارهای مغناطیسی که در فرکانس‌های رادیویی و مخابراتی کار می‌کنند، جنس هسته از مواد فرومغناطیس سرامیکی موسوم به « فریت[5]» انتخاب می‌شود. فریت از ترکیب اکسید آهن و پودرهای کربنات باریم یا استرونسیوم ساخته می‌شود. چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند B_r در فریت کم‌تر از النیکو است اما شدت میدان خنثی‌کننده H_c در فریت بیش‌تر از النیکو می‌باشد. حلقه هیسترزیس فریت استرونسیوم در شکل (۵۳ ـ ۱) نشان داده شده است.



شکل ۵۳ ـ ۱

۱. Soft Iron ۲. Permanent Magnet ۳. Hard Iran ۴. Alnico ۵. Ferrite

پرسش ۵ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی مواد فرومغناطیسی بین ..... تا ..... است.

۲ ـ در ماشین‌های الکتریکی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۳ ـ در آهن‌رباهای ..... جنس هسته از ..... انتخاب می‌شود.

۴ ـ در مدارهای مغناطیسی مخابراتی جنس هسته از ..... موسوم به ..... انتخاب می‌شود.

۵ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس ..... است.

۶ ـ ضریب نفوذ مغناطیسی نسبی مواد پارامغناطیس ..... است.

۷ ـ تلفات هیسترزیس تابع ..... و ..... سیم‌پیچ است.

پرسش‌های صحیح غلط

۱ ـ در مواد دیامغناطیس مولکول‌های مغناطیسی به‌وجود نمی‌آیند.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ مواد پارامغناطیس، مولکول‌های مغناطیسی ضعیفی ندارند.

صحیح ☐ غلط ☐

۳ ـ تلفات هیسترزیس به‌صورت حرارت در هسته ظاهر می‌شود.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ رفتار مواد پارامغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۲ ـ رفتار مواد فرومغناطیس در میدان مغناطیسی را شرح دهید.

۳ ـ چند نمونه از مواد دیا، پارا و فرومغناطیس را نام ببرید.

۴ ـ دمای کوری را تعریف کنید.

۵ ـ شدت میدان خنثی‌کننده را تعریف کنید.

۶ ـ چگالی فوران مغناطیسی پس‌ماند را تعریف کنید.

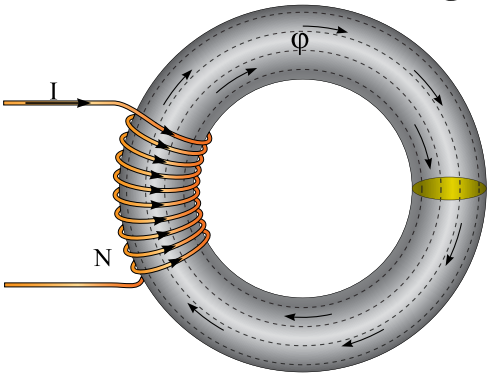
۷ ـ تلفات هیسترزیس را تعریف کنید.

۸ ـ ویژگی‌های مغناطیسی آهن سخت را بنویسید.

۹ ـ حلقه هیسترزیس در مواد مغناطیسی را با یک‌دیگر مقایسه کنید.

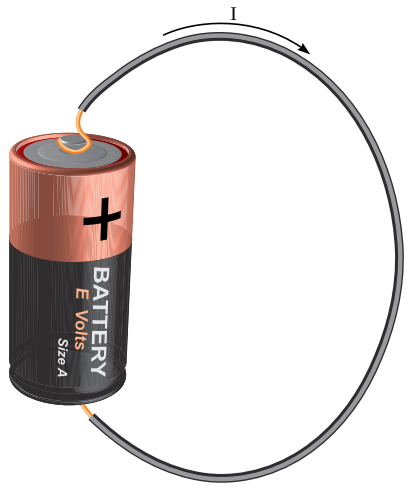
۱۸ ـ ۱ ـ مدارهای مغناطیسی

در شکل (۵۴ ـ ۱) شدت جریان الکتریکی I سیم‌پیچی در هسته فرومغناطیس فوران مغناطیسی φ جاری می‌کند.



شکل ۵۴ ـ ۱ مدار مغناطیسی

این پدیده از بعضی‌جهات مشابه جریان الکتریکی است که یک باتری در هادی جاری می‌کند. شکل(۵۵ ـ ۱)



شکل ۵۵ ـ ۱ مدار الکتریکی

همان‌طور که اتصال هادی به باتری، مسیر بسته‌ای برای جاری شدن جریان فراهم می‌کند را «مدار الکتریکی[۱]» می‌نامند، مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود «مدار مغناطیسی[۲]» نامیده می‌شود.

وجه تشابه مدار مغناطیسی شکل (۵۴ ـ ۱) با مدار الکتریکی شکل (۵۵ ـ ۱) عبارت است از:

ـ «نیروی محرکه الکتریکی[۳]» باتری E عامل جاری شدن جریان الکتریکی در هادی است و «نیروی محرکه مغناطیسی[۴]» سیم‌پیچ θ عامل جاری شدن فوران مغناطیسی در هسته است. بنابراین عملکرد نیروی محرکه مغناطیسی و نیروی محرکه الکتریکی شبیه به یک‌دیگر است؛ یعنی:

θ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ E مدار الکتریکی

ـ جریان الکتریکی I، در هادیِ مدار الکتریکی جاری می‌شود و فوران مغناطیسی φ در هسته مدار مغناطیسی جاری می‌شود. بنابراین رفتار فوران مغناطیسی و جریان الکتریکی نیز شبیه به یک‌دیگر است؛ یعنی:

φ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ I مدار الکتریکی

ـ هادی در مدار الکتریکی مسیری برای عبور جریان الکتریکی است و از خود در مقابل عبور جریان الکتریکی «مقاوت الکتریکی[۵]» نشان می‌دهد و هسته در مدار مغناطیسی نیز مسیری برای عبور فوران مغناطیسی است و از خود در مقابل عبور فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی[۶]» نشان می‌دهد. بنابراین مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R}$ و مقاومت الکتریکی R شبیه به یک‌دیگر می‌باشد؛ یعنی:

$\mathcal{R}$ مدار مغناطیسی $\xleftarrow{\text{مشابه}}$ R مدار الکتریکی

بین کمیت‌های ولتاژ، جریان و مقاومت در یک مدار الکتریکی قانون اُهم رابطه (۱۴ ـ ۱) را ارایه کرده است:

$$R = \frac{E}{I} \qquad (۱ - ۱۴)$$

با توجه به شباهت‌های میان کمیت‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌توان قانون اهم را برای یک مدار مغناطیسی به‌صورت رابطه (۱۵ ـ ۱) نوشت:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \qquad (۱ - ۱۵)$$

در این رابطه:

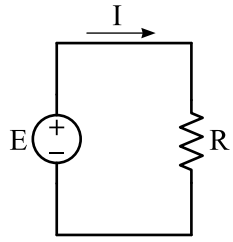
θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب [A.T]

φ فوران مغناطیسی هسته بر حسب [wb]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.T}{wb}\right]$

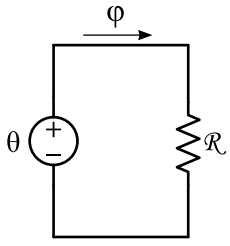
۱. Electric Circuits
۲. Magnetic Circuit
۳. Electro Motive Force (EMF)
۴. Magneto Motive Force(MMF)
۵. Resistance
۶. Reluctance

برای مدار الکتریکی شـکل (۵۵ ـ ۱) مدار الکتریکی معادل شکل (۵۶ ـ ۱) ارایه شده است.



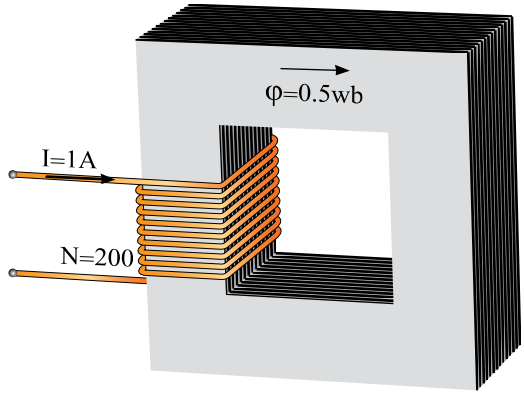
شکل ۵۶ ـ ۱

با توجه به وجه تشـابه میان مدارهای مغناطیسی با مدارهای الکتریکی می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۵۷ ـ ۱) را با تقریب مناسـبی برای مدار مغناطیسـی شکل (۵۴ ـ ۱) در نظر گرفت.



شکل ۵۷ ـ ۱

مثال ۱۵ ـ ۱ ـ فوران مغناطیسـی در هسـته شکل (۵۸ ـ ۱) برابـر ۰/۵ wb اسـت. مقاومت مغناطیسـی هسته چقدر می‌باشد؟



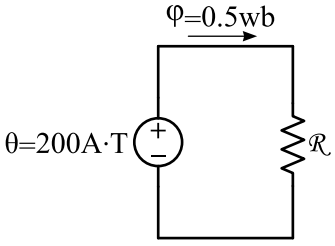
شکل ۵۸ ـ ۱

حل:

ـ نیـروی محرکه مغناطیسـی از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI = ۲۰۰ \times ۱ = ۲۰۰ \left[A.T\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل با درج مقادیر مغناطیسی بر روی آن به‌صورت شکل زیر است.



مقاومت مغناطیسـی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر اسـت با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} = \frac{۲۰۰}{۰/۵} = ۴۰۰ \left[\frac{A.T}{wb}\right]$$

برای تعیین رابطه مقاومت مغناطیسـی $\mathcal{R}$ به روش زیر عمل می‌شود:

ـ از رابطه (۳ ـ ۱) مقدار φ برابر است با:

$$B = \frac{\varphi}{A} \Rightarrow \varphi = B.A \qquad (۱ ـ ۱۶)$$

ـ از رابطه (۹ ـ ۱) مقدار B برابر است با:

$$\mu = \frac{B}{H} \Rightarrow B = \mu H \qquad (۱ ـ ۱۷)$$

ـ بـا جایگزینی مقدار μ از رابطه (۱۳ ـ ۱) در رابطه (۱۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mu = \mu_{\circ} \mu_r$$

$$B = \mu_{\circ} \mu_r .H \qquad (۱ ـ ۱۸)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۸ ـ ۱) در (۱۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\varphi = \mu_{\circ}\mu_r.H.A \qquad (۱۹ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۱۹ ـ ۱) و (۶ ـ ۱) در رابطه (۱۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \mathcal{R} = \frac{NI}{\mu_{\circ}\mu_r.H.A} \qquad (۲۰ ـ ۱)$$

ـ از رابطه رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H = \frac{NI}{\ell_C} \Rightarrow \ell_C = \frac{NI}{H} \qquad (۲۱ ـ ۱)$$

ـ با جایگزینی رابطه (۲۱ ـ ۱) در رابطه (۲۰ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu_{\circ}\mu_r A} \qquad (۲۲ ـ ۱)$$

در این رابطه:

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب [m]

μ_o ضریب نفوذ مغناطیسی خلا بر حسب $\left[\frac{wb}{A.T.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هسته بدون واحد

A سطح مقطع هسته بر حسب [m^۲]

$\mathcal{R}$ مقاومت مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.T}{wb}\right]$

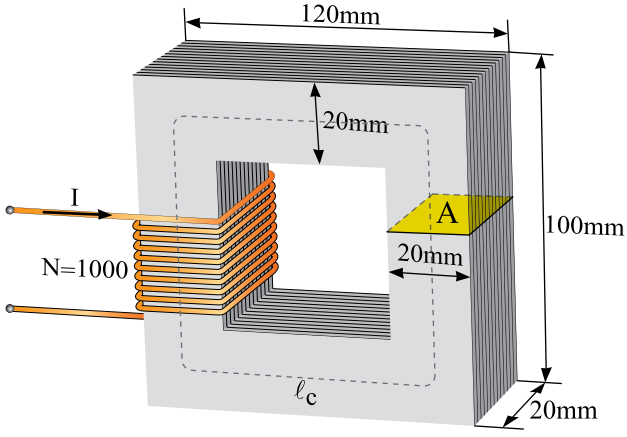
اگر حاصل $\mu_o\,\mu_r$ از رابطه (۱۳ ـ ۱) با μ نشان داده شود رابطه (۲۲ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۳ ـ ۱) در می‌آید.

$$\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$$

فعالیت

وجه تشابه رابطه مقاومت مغناطیسی $\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu.A}$ با رابطه مقاومت الکتریکی $R = \frac{\ell}{x.A}$ چیست؟

مثال ۱۶ ـ ۱ ـ اگر فوران مغناطیسی در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ ـ ۱) برابر با ۴ mwb باشد جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟ در صورتی که $\pi = ۳$ و $\mu_r = ۶۰۰۰$ باشد.



شکل ۵۹ ـ ۱

حل:

ـ محیط بیرونی هسته برابر است با:

$$\ell_۱ = (۱۲۰+۱۰۰)\times ۲ = ۴۴۰\,mm$$

ـ محیط درونی هسته برابر با:

$$\ell_۲ = (۸۰+۶۰)\times ۲ = ۲۸۰\,mm$$

ـ محیط متوسط برابر است با:

$$\ell_C = \frac{\ell_۱ + \ell_۲}{۲} = \frac{۴۴۰+۲۸۰}{۲} = ۳۶۰\,mm$$

سطح مقطع بازوی هسته A که به شکل مربع است برابر است با:

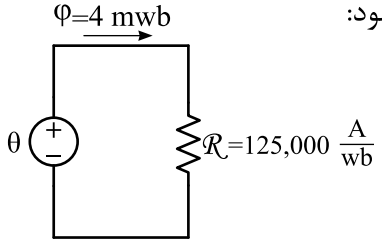
$A_C = ۲۰\times ۲۰ = ۴۰۰\,mm^۲$ سطح مقطع هسته

مقاومت مغناطیسی هسته از رابطه (۲۲ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۳۶۰\times۱۰^{-۳}}{۴\pi\times۱۰^{-۷}\times۶۰۰۰\times۴۰۰\times۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{AT}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم و مقادیر بر روی آن درج می‌شود:



ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi}$$

$$\theta = \mathcal{R}_C . \varphi = ۱۲۵۰۰۰\times۴\times۱۰^{-۳} = ۵۰۰ \left[A\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

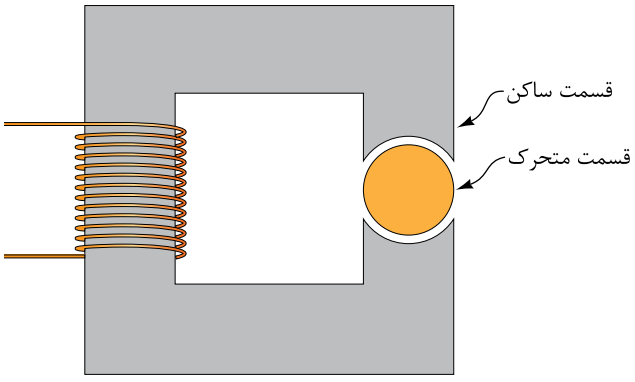
$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۰/۵ \left[A\right]$$

۱۹ ـ ۱ـ مدار مغناطیسی با شکاف هوایی

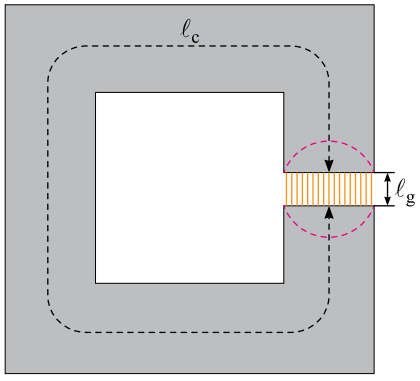
مدارهای مغناطیسی مقدمه تحلیل ماشین‌های الکتریکی اعم از ترانسفورمر و وسایل تبدیل انرژی از قبیل ژنراتورها و موتورهای الکتریکی می‌باشند.

ترانسفورمرها ساختمانی شبیه هسته فرومغناطیسی شکل (۶۰ ـ ۱) دارند. وسایل تبدیل انرژی مانند ژنراتورها و موتورهای الکتریکی که دارای اجزای متحرک می‌باشند، بین قسمت متحرک و ساکن در هسته فرومغناطیس «شکاف هوایی[۱]» ایجاد می‌شود.



شکل ۶۰ ـ ۱

اگر قسمت متحرک به دو نیمه متحرک تقسیم شود و هر یک از این نیمه‌ها به سمت قسمت ساکن سوق داده شود شکل (۶۱ ـ ۱) به‌دست می‌آید.



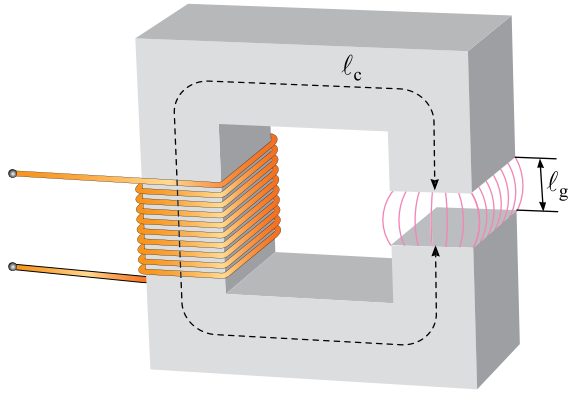
شکل ۶۱ ـ ۱

این شکل یک مدار مغناطیسی با شکاف هوایی را نشان می‌دهد که فوران مغناطیسی φ مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند.

اگر در مدار مغناطیسی طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بسیار کوچک‌تر باشد، می‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد. در صورتی‌که طول شکاف هوایی ℓ_g از ابعاد سطح مقطع هسته مغناطیسی بزرگ‌تر باشد، فوران مغناطیسی مطابق شکل (۶۲ ـ ۱) به بیرون «نشت»

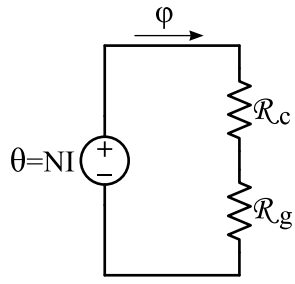
۱. Air Gap

می‌کند و سطح مقطع موثر شکاف هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته مغناطیسی دو طرف آن می‌شود، لذا نمی‌توان با روش مدار الکتریکی معادل آن را تحلیل کرد.



شکل ۶۲ ـ ۱

اکنون با فرض این‌که طول شکاف هوایی ℓ_g در شکل (۶۱ ـ ۱) به حد کافی کوچک است و چگالی فوران مغناطیسی B هسته نیز یکنواخت می‌باشد، می‌توان مدار الکتریکی معادل شکل (۶۳ ـ ۱) را برای تحلیل آن در نظر گرفت. از آنجایی که فوران مغناطیسی، مسیر هسته و شکاف هوایی را طی می‌کند لذا مقاومت مغناطیسی آن‌ها در مدار الکتریکی معادل با هم سری می‌شوند.



شکل ۶۳ ـ ۱

در شکل (۶۳ ـ ۱) مقاومت مغناطیسی هسته $\mathcal{R}_c$ از رابطه (۲۳ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R} = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۳)$$

و مقاومت مغناطیسی شکاف هوایی $\mathcal{R}_g$ از رابطه (۲۴ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} \qquad (۱ - ۲۴)$$

در این رابطه:

ℓ_g طول شکاف هوایی بر حسب [m]

$\mu_\circ = ۴\pi \times ۱۰^{-۷}$ ضریب نفوذ مغناطیسی خلاء بر حسب $\left[\frac{wb}{A.T.m}\right]$

μ_r ضریب نفوذ نسبی هوا[۱]

A سطح مقطع هسته بر حسب [$m^۲$]

$\mathcal{R}_g$ مقاومت مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.T}{wb}\right]$

قوانین سری و موازی شدن مقاومت‌های مغناطیسی همانند مقاومت‌های الکتریکی است. به‌طوری که مقاومت مغناطیسی معادل[۲]، n مقاومت مغناطیسی سری از رابطه (۲۵ ـ ۱) به‌دست می‌آید[۳]:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_۱ + \mathcal{R}_۲ + \ldots + \mathcal{R}_n \qquad (۱ - ۲۵)$$

مثال ۱۷ ـ ۱ در مدار مغناطیسی شکل (۵۹ ـ ۱) شکاف هوایی به طول ۰/۴۸ mm مطابق شکل (۶۴ ـ ۱) ایجاد شده است. با فرض این‌که طول

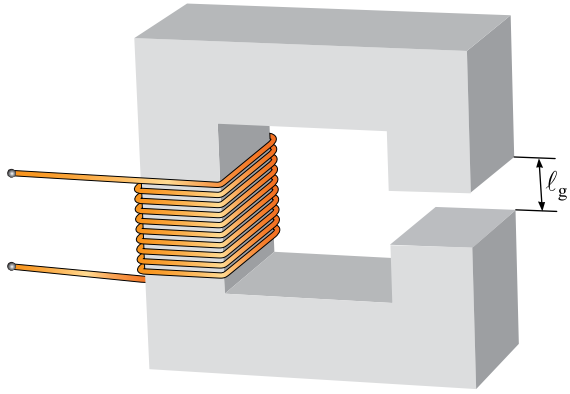
---

۱. برای سهولت در محاسبات معمولاً برای هوا μ_r برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

۲. Equal Reluctance

۳. مقاومت مغناطیسی معادل، n مقاومت مغناطیسی موازی از رابطه مقابل به‌دست می‌آید: $\mathcal{R}_{eq} = \frac{۱}{\frac{۱}{\mathcal{R}_۱} + \frac{۱}{\mathcal{R}_۲} + \ldots + \frac{۱}{\mathcal{R}_n}}$

متوسط هسته تغییر نکرده است برای داشتن فوران مغناطیسی ۴ mwb جریان سیم‌پیچ چند آمپر است؟



شکل ۶۴ ـ ۱

حل:

ـ مقاومت مغناطیسی هسته تغییر نمی‌کند و برابر است با:

$$\mathcal{R}_C = \frac{\ell_C}{\mu_\circ \mu_r A} = ۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{AT}{wb}\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بر حسب متر برابر است با:

$$\ell_g = ۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳} \left[m\right]$$

ـ طول شکاف هوایی بسیار کوچک‌تر از ابعاد سطح مقطع هسته می‌باشد؛ لذا سطح مقطع شکاف هوایی با هسته برابر است. یعنی:

$$A_g = A_C = ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶} \left[m^۲\right]$$

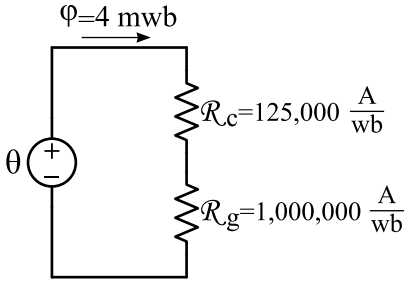
ـ برای سهولت در محاسبات ضریب نفوذ نسبی هوا برابر با: $\mu_r = ۱$

ـ مقاومت مغناطیسی هوا از رابطه (۲۴ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_g = \frac{\ell_g}{\mu_\circ \mu_r A} = \frac{۰/۴۸ \times ۱۰^{-۳}}{۴\pi \times ۱۰^{-۳} \times ۱ \times ۴۰۰ \times ۱۰^{-۶}}$$

$$= ۱۰۰۰۰۰۰ \left[\frac{A.T}{wb}\right]$$

ـ مدار الکتریکی معادل رسم می‌شود و مقادیر در آن نوشته خواهد شد:



ـ مقاومت مغناطیسی معادل از رابطه (۲۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R}_{eq} = \mathcal{R}_C + \mathcal{R}_g = ۱۲۵۰۰۰ + ۱۰۰۰۰۰۰$$

$$= ۱۱۲۵۰۰۰ \left[\frac{A.T}{wb}\right]$$

ـ نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۱۵ ـ ۱) برابر است با:

$$\mathcal{R} = \frac{\theta}{\varphi} \Rightarrow \theta = \mathcal{R}.\varphi$$

$$\theta = ۱۱۲۵۰۰۰ \times ۴ \times ۱۰^{-۳} = ۴۵۰۰ \left[A.T\right]$$

ـ جریان سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) برابر است با:

$$\theta = NI \Rightarrow I = \frac{\mathcal{F}}{N} = \frac{۴۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۴/۵ \left[A\right]$$

فعالیت

چرا با ایجاد شکاف هوایی جریان سیم‌پیچ افزایش یافته است؟

هرچند تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مفهوم مدار الکتریکی معادل غالباً نتایج رضایت بخشی دارد اما این نتایج به دلایل زیر تقریبی است:

۱ ـ در مدار مغناطیسی فرض می‌شود تمام فوران مغناطیسی در هسته محبوس است. اما جزء کوچکی از فوران مغناطیسی هسته به هوای اطراف می‌گریزد. این فوران در بیرون هسته «شار نشتی[۱]» نام دارد.

۲ ـ در محاسبه مقاومت مغناطیسی، برای هسته یک طول مسیر متوسط معین و یک سطح مقطع شخص فرض می‌شود. این فرض‌ها، مخصوصاً در مورد گوشه‌ها فرض‌های خیلی خوبی نیستند.

۳ ـ در مواد فرومغناطیسی، با تغییر شدت میدان مغناطیسی هسته، ضریب نفوذ مغناطیسی هسته تغییر می‌کند اما در مدار معادل مغناطیسی ضریب نفوذ مغناطیسی ثابت فرض شده است.

۴ ـ اگر در مسیر فوران مغناطیسی هسته، شکاف هوایی وجود داشته باشد، سطح مقطع موثر فاصله هوایی بزرگ‌تر از سطح مقطع هسته دو طرف آن است که در مدار معادل مغناطیسی سطح مقطع شکاف هوایی برابر سطح مقطع هسته فرض می‌شود.

روش‌های دیگری در تحلیل مدارهای مغناطیسی وجود دارد که به نتایج دقیق‌تری می‌انجامد. تحلیل مدارهای مغناطیسی به کمک «قانون نیروی محرکه مغناطیسی» یکی از این روش‌ها است.

پرسش ۶ ـ ۱

پرسش‌های کامل کردنی

۱ ـ مسیر بسته‌ای که فوران مغناطیسی در آن برقرار می‌شود ..... نامیده می‌شود.

۲ ـ نیروی محرکه مغناطیسی، مشابه ..... در مدار الکتریکی است.

۳ ـ مقاومت مغناطیسی مشابه..... در مدار الکتریکی است.

پرسش‌های صحیح غلط

۱ ـ هسته از خود در مقابل فوران مغناطیسی «مقاومت مغناطیسی» نشان می‌دهد.

صحیح ☐ غلط ☐

۲ ـ جریان الکتریکی مشابه نیروی محرکه مغناطیسی است.

صحیح ☐ غلط ☐

پرسش‌های تشریحی

۱ ـ مدار الکتریکی و مدار مغناطیسی را تعریف کنید؟

۲ ـ چرا نتایج تحلیل مدارهای مغناطیسی با استفاده از مدار الکتریکی معادل تقریبی است؟

تمرین ۶ ـ ۱

۱ ـ مقاومت و فوران مغناطیسی در هسته یک مدار مغناطیسی به ترتیب $۵۰۰\ \frac{A.T}{wb}$ و $۱۰\,mwb$ می‌باشد. اگر جریان سیم‌پیچ روی هسته $۲۰\,mA$ باشد تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ را به‌دست آورید.

۲ ـ بر روی یک هسته فرومغناطیسی مشابه شکل (۲۳ ـ ۱)، ۲۰۰ دور سیم پیچیده شده است. اگر جریان ۲ آمپر از سیم‌پیچ عبور کند. فوران مغناطیسی هسته را محاسبه نمایید. در صورتی که $r_۱=۳۰\,cm$، $r_۲=۴۰\,cm$

۱. Flux Leakage

و μ_r=۱۰۰۰ باشد.

۳ ـ اگر در مدار مغناطیسی تمرین ۲ شکاف هوایی به طول ۰/۵ mm ایجاد شود با فرض این‌که طول متوسط هسته تغییر نکرده باشد فوران مغناطیسی هسته را محاسبه کنید.

۴ ـ بر روی اختلاف نتایج تمرین ۲ و ۳ بحث کنید.

۲۰ ـ ۱ ـ قانون نیروی محرکه مغناطیسی

در مدارهای مغناطیسی فوران مسیر بسته هسته را طی می‌کند. طبق قانون نیروی محرکه مغناطیسی در یک مدار مغناطیسی «حاصل جمع جبری نیروهای محرکه مغناطیسی هسته، برابر نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ است».

قانون نیروی محرکه مغناطیسی با رابطه (۲۶ ـ ۱) نشان داده می‌شود:

$$\theta = \sum_{i=1}^{n} H_i . \ell_i \qquad (۱ - ۲۶)$$

در این رابطه:

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب [A.T]

H_i شدت میدان مغناطیسی قسمت i ام مدار مغناطیسی بر حسب $\left[\frac{A.T}{m}\right]$

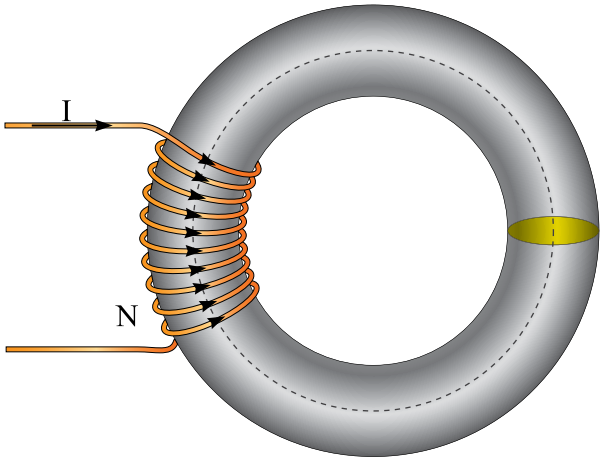
ℓ_i طول متوسط قسمت i ام مدار مغناطیسی بر حسب [m]

در حالت کلی اگر مدار مغناطیسی از n قسمت تشکیل شده باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\theta = H_1\ell_1 + H_2\ell_2 + \ldots + H_n\ell_n \qquad (۱ - ۲۷)$$

تحلیل مدارهای مغناطیسی با قانون نیروی محرکه مغناطیسی یکی از روش‌هایی است که غالباً نتایج دقیقی از آن به‌دست می‌آید.

قانون نیروی محرکه مغناطیسی برای مدار مغناطیسی شکل (۶۵ ـ ۱) به‌صورت رابطه (۲۸ ـ ۱) در می‌آید.



شکل ۶۵ ـ ۱

$$\theta = H_C . \ell_C \qquad (۱ - ۲۸)$$

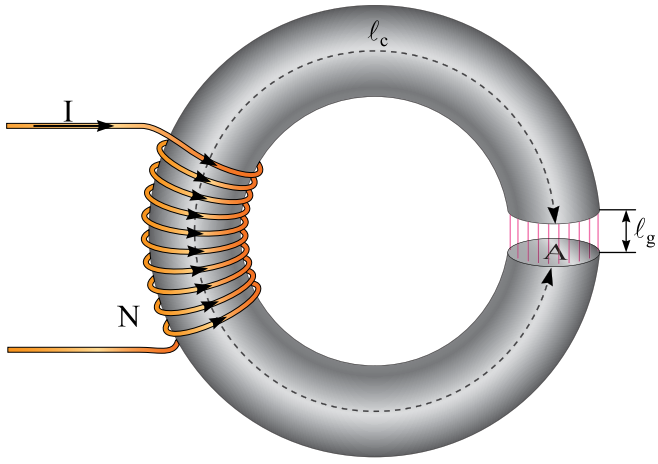
در این رابطه:

H_C شدت میدان مغناطیسی هسته بر حسب $\left[\frac{A.T}{m}\right]$

ℓ_C طول متوسط هسته بر حسب m

θ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ بر حسب [A.T]

اگر چنان‌چه هسته مدار مغناطیسی دارای شکاف هوایی به طول ℓ_g و شدت میدان مغناطیسی H_g و ماده فرومغناطیس به طول ℓ_C و شدت میدان مغناطیسی H_C مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) باشد رابطه قانون نیروی محرکه مغناطیسی به‌صورت رابطه (۲۹ ـ ۱) نوشته می‌شود.



شکل ۶۶ ـ ۱

$$\theta_{eq} = H_g \ell_g + H_C \ell_C \qquad (۱ ـ ۲۹)$$

شدت میدان مغناطیسی هسته فرومغناطیسی H_C از منحنی مغناطیسی شکل‌های (۲۷ ـ ۱) و (۲۹ ـ ۱) با توجه به جنس هسته و شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی H_g از رابطه (۱۰ ـ ۱) به‌صورت $H_g = \frac{B_\circ}{\mu_\circ}$ پس از تعیین B به‌دست می‌آیند. مقادیر ℓ_g و ℓ_C با توجه به شکل هندسی مدار مغناطیسی محاسبه می‌شوند.

مثال ۱۸ ـ ۱ مدار مغناطیسی مطابق شکل (۶۶ ـ ۱) دارای هسته فرومغناطیسی از جنس فولاد ورق به طول متوسط ℓ_C=۵۰cm و سطح مقطع A_C=۶۴cm^۲ دارای یک شکاف هوایی به‌طور ℓ_g =۱/۱mm و فوران مغناطیسی هسته $\varphi_C = ۸ mwb$ می‌باشد. جریان سیم‌پیچ را به کمک قانون نیروی محرکه مغناطیسی تعیین کنید.

حل:

فوران مغناطیسی هسته فرومغناطیسی و شکاف هوایی برابر است زیرا این دو قسمت با یک‌دیگر سری هستند.

$$\varphi = \varphi_C = \varphi_g = ۸ \left[mwb\right]$$

سطح مقطع هسته A_C با سطح مقطع شکاف هوایی A_g با هم برابر فرض می‌شوند؛ زیرا طول شکاف هوایی در مقابل سطح مقطع هسته بسیار کوچک‌تر است. چگالی فوران مغناطیسی هسته از رابطه (۳ ـ ۱) برابر است با:

$$A = A_C = A_g = ۶۴ \left[cm^۲\right]$$

$$B = \frac{\varphi}{A}$$

$$B = \frac{۸ \times ۱۰^{-۳}}{۶۴ \times ۱۰^{-۴}} = ۱/۲۵ \left[T\right]$$

با توجه به مقدار B از منحنی مغناطیسی شکل (۲۳ ـ ۱) تعداد H_C را برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$B = ۱/۲۵ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیسی}} H_C = ۸۰۰ \left[\frac{A}{m}\right]$$

با فرض این‌که هوا مشابه خلاء است، شدت میدان مغناطیسی شکاف هوایی از رابطه (۱۰ ـ ۱) برابر است با:

$$H_g = \frac{B}{\mu_\circ} = \frac{۱/۲۵}{۴\pi \times ۱۰^{-۷}} = ۱۰^۶ \left[\frac{A}{m}\right]$$

نیروی محرکه مغناطیسی از رابطه (۲۹ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

$$\theta = H_g \ell_g + H_C \ell_C$$

$$\theta = ۱۰^۶ \times ۱/۱ \times ۱۰^{-۳} + ۸۰۰ \times ۵۰ \times ۱۰^{-۲}$$

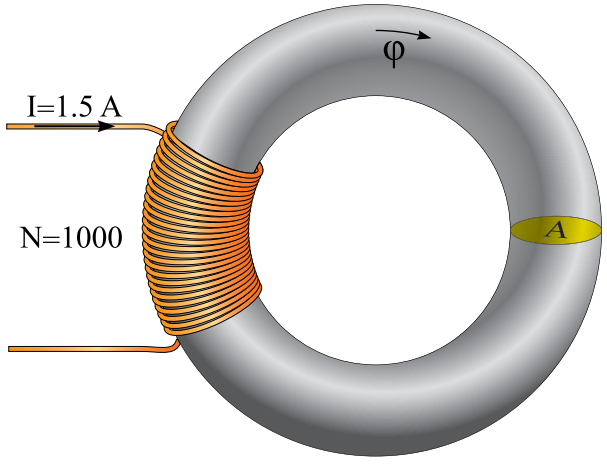
$$= ۱۵۰۰ \left[A\right]$$

از رابطه (۶ ـ ۱) شدت جریان به‌دست می‌آید.

$$\theta = NI$$

$$I = \frac{\theta}{N} = \frac{۱۵۰۰}{۱۰۰۰} = ۱/۵ \left[A\right]$$

مثال ۱۹ ـ ۱ ـ اگر در مثال ۱۸ ـ ۱ شکاف هوایی مدار مغناطیسی با به هم رساندن هسته مغناطیسی مطابق شکل (۶۷ ـ ۱) از بین برود و جریان سیم‌پیچ ثابت بماند، فوران مغناطیسی هسته چند میلی وبر می‌شود؟



شکل ۶۷ ـ ۱

حل:

ـ نیروی محرکه مغناطیسی سیم‌پیچ از رابطه (۶ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$\theta = NI = ۱۰۰۰ \times ۱/۵ = ۱۵۰۰\,[A]$$

ـ شدت میدان مغناطیسی از رابطه (۷ ـ ۱) به‌دست می‌آید:

$$H_C = \frac{\theta}{\ell_C} = \frac{۱۵۰۰}{۵۰ \times ۱۰^{-۲}} = ۳۰۰۰ \left[\frac{A}{m}\right]$$

ـ با توجه به مقدار H_C از منحنی مغناطیس شکل (۲۷ ـ ۱) مقدار B برای فولاد ورق به‌دست می‌آید:

$$H_C = ۳۰۰۰ \xrightarrow[\text{شکل (۲۷ ـ ۱)}]{\text{منحنی مغناطیس}} B = ۱/۶[T]$$

ـ فوران مغناطیسی از رابطه (۳ ـ ۱) محاسبه می‌شود:

$$B = \frac{\varphi}{A}$$

$$\varphi = B.A = ۱/۶ \times ۶۴ \times ۱۰^{-۴} = ۰/۰۱wb$$

ـ واحد فوران مغناطیسی به میلی وبر تبدیل می‌شود:

$$\frac{۱wb}{۰/۰۱} = \frac{۱۰۰mwb}{\varphi} \Rightarrow \varphi = \frac{۰/۰۱ \times ۱۰۰۰}{۱}$$

$$= ۱۰\,[mwb]$$

ـ با از بین رفتن شکاف هوایی مقاومت مغناطیسی کم‌تر می‌شود و فوران مغناطیسی هسته افزایش می‌یابد.

مدارهای مغناطیسی به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دارای حداقل فاصله شکاف هوایی یا در صورت امکان فاقد شکاف هوایی باشند تا با جریان الکتریکی کم‌تر فوران مغناطیسی بیش‌تری تولید شود.

تمرین ۷ ـ ۱

۱ ـ هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی *M-5* بدون فاصله هوایی به طول متوسط ۴۰ cm و سطح مقطع ۵۰ $cm^۲$ دارای فوران مغناطیسی ۱۰mwb می‌باشد. به روی این هسته یک سیم‌پیچ با ۴۰۰۰ حلقه قرار دارد. مطلوب است:

الف ـ شدت جریان سیم‌پیچ

ب ـ اگر یک فاصله هوایی ۱ mm در هسته ایجاد شود شدت جریان سیم‌پیچ چند آمپر خواهد شد؟ در صورتی‌که بخواهیم فوران هسته ثابت بماند.

۲ ـ یـک مدار مغناطیسـی با مقاومت مغناطیسـی $\left[\frac{A.T}{wb}\right]$ ۴۵۰۰۰ دارای فـوران مغناطیسـی ۱۰ mwb می‌باشد. اگر تعداد دور سیم‌پیچ ۱۰۰۰ و طول متوسط هسته ۹۰ cm باشد مطلوب است:

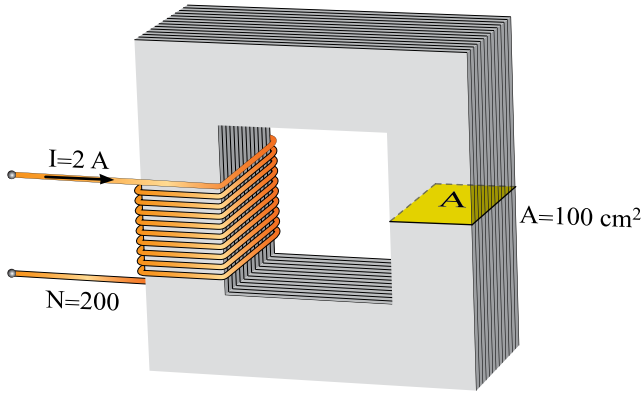
الف ـ جریان سیم‌پیچ

ب ـ شدت میدان هسته

۳ ـ در مـدار مغناطیسـی شـکل (۶۸ ـ ۱) فـوران مغناطیسی هسته ۱۰ mwb است مطلوب است:

الف ـ مقاومت مغناطیسی هسته

ب ـ اگـر یـک فاصلـه هوایی ۱/۲mm در هسـته ایجاد شـود و بخواهیم فوران هسـته همان مقدار قبلی بماند، جریان سـیم‌پیچ را چند آمپر باید افزایش دهیم. (π=۳)

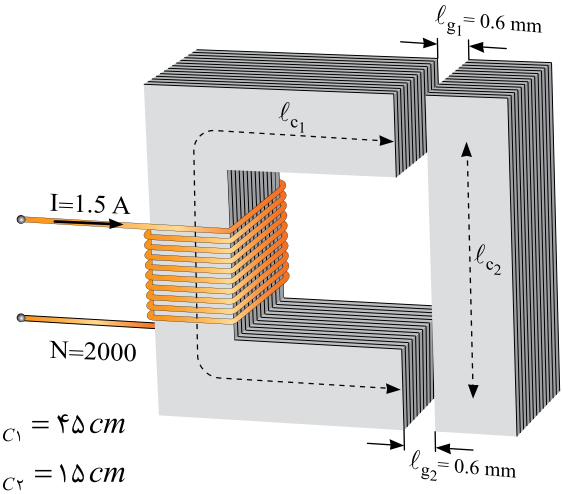


شکل ۶۸ ـ ۱

۴ ـ در مـدار مغناطیسـی شـکل (۶۹ ـ ۱) مطلوب است محاسبه:

الـف ـ مقاومـت مغناطیسـی در صورتی‌کـه فوران مغناطیسی هسته ۱۲ mwb باشد.

ب ـ ضریب نفوذ نسبی هسته



$\ell_{C_1} = ۴۵\,cm$

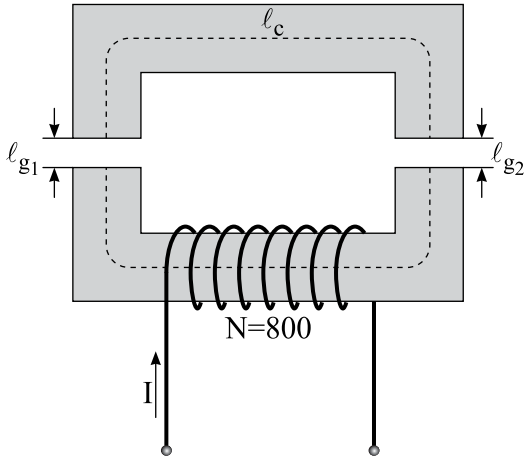
$\ell_{C_2} = ۱۵\,cm$

$A = ۵۰\,cm^۲$

$\pi = ۳$

شکل ۶۹ ـ ۱

۵ ـ یک هسته مغناطیسی از جنس فولاد الکتریکی *M-5* مطابق شکل (۷۰ ـ ۱) مفروض است. در صورتی‌که بخواهیم فوران مغناطیسی ۰/۴ mwb در هسته برقرار شود شدت جریان سیم‌پیچ باید چند آمپر باشد؟



$\ell_{g_1} = \ell_{g_2} = ۰/۵\,mm$

$A_g = A_C = ۴\,cm^۲$

$\ell_C = ۳۰\,cm$

شکل ۷۰ ـ ۱