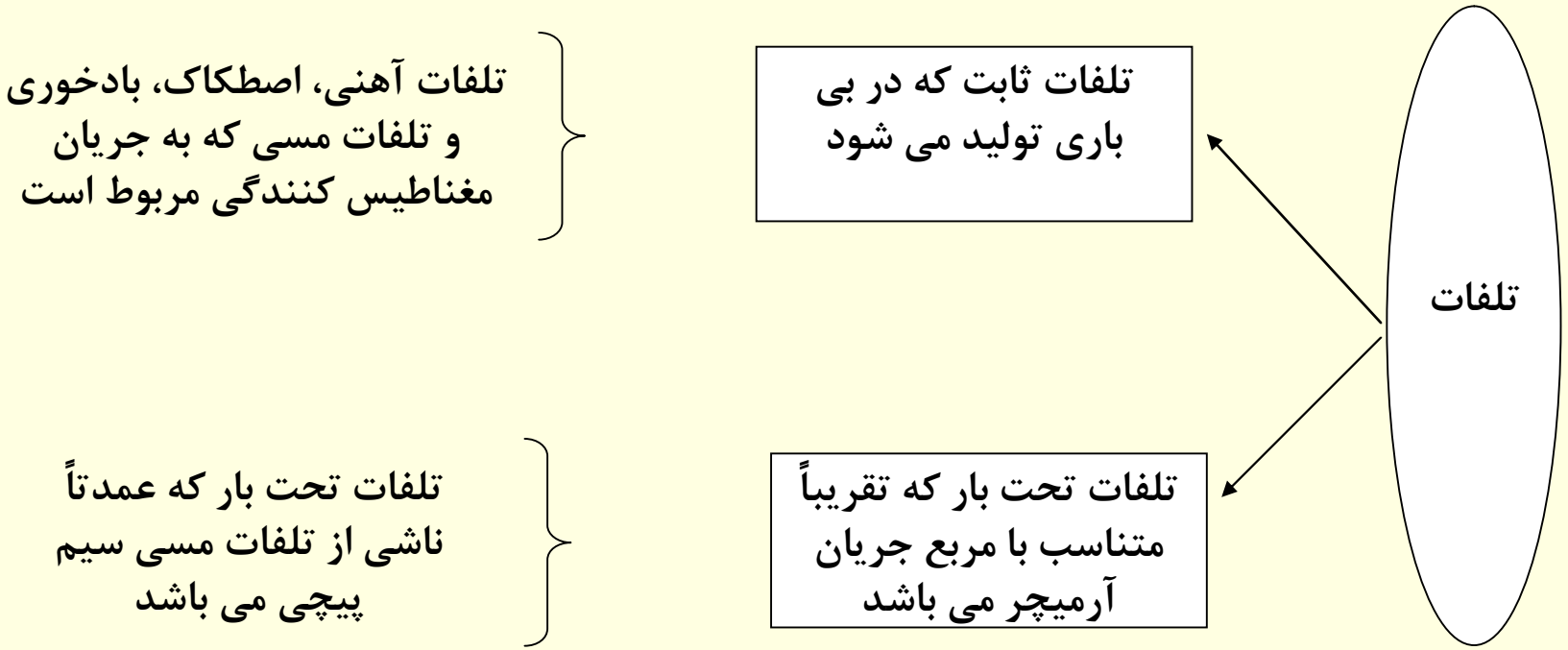
بنام خدا

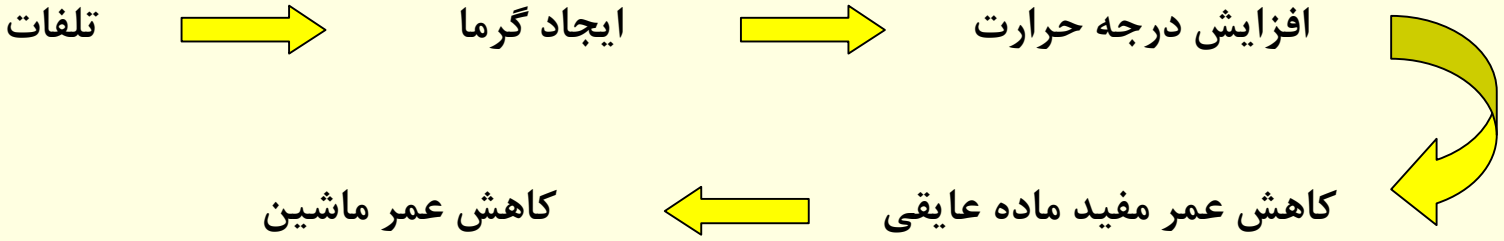
طراحی ماشینهای الکتریکی
بخش دوم –گرما و خنک سازی

گرما و خنک سازی



دانشگاه علم و صنعت ایران

گرما و خنک سازی



رابطه عمر مفید بعضی از مواد آلی کلاس A با حرارت را می توان به صورت زیر بیان نمود :

$$t = Ke^{-\alpha\theta}$$

t عمر مفید ماده برحسب سال

q دمای نقطه کار برحسب درجه سانتی گراد

a و K مقادیر ثابت

گرما و خنک سازی

معمولا مقدار K، $۷/۱۵\times۱۰^{-۴}$ سال و a برای کلاس A، 0/08 می باشد.

در دمای بین 100 تا 105 درجه سانتی گراد ⟵ برای ۱۶ تا ۲۴ سال

دمای کارکرد 115 درجه سانتی گراد ⟵ در حدود هفت سال

افزایش دمای بیش از اندازه، علاوه بر کاهش عمر مفید سیستم عایقی، ممکن است اجزاء مکانیکی ماشین را نیز شدیداً تحت تاثیر قرار دهد. برای مثال، ممکن است کموتاتور دندانه های هندسی منظم خود را از دست بدهد، اتصالات لحیم شده بین کموتاتور و اطراف سیم پیچ آرمیچر بشکند، یاتاقانها از بین بروند، و غیره.

گرما و خنک سازی

افزایش دما :

• دمای یک قسمت معین از ماشین الکتریکی نه تنها به تلفاتی که در آن قسمت ایجاد می شود بستگی دارد بلکه به دمای محیط، یا به عبارت دیگر به دمای فضای خنک سازی نیز بستگی دارد.اختلاف بین این دو مقدار افزایش دما نامیده می شود.

• در استانداردهای مختلف توضیحات مفصلی در مورد روشهای اندازه گیری دما ارائه شده است. در مورد ماشینهای الکتریکی کوچک، افزایش دمای سیم پیچی معمولاً با توجه به افزایش مقاومت آن تعیین می گردد (روش مقاومت)

• برای ماشینهای با توان نامی تا 600 وات، استفاده از دما سنج ها یا ترموکوپل نیز برای اندازه گیری دمای سیم پیچها مجاز می باشد (روش دما سنج)

گرما و خنک سازی

• محدوده افزایش دما برای کلاسهای مختلف ماشینها بوسیله استانداردهای ملی مختلف و استاندارد بین المللی (IEC شماره 34) تعیین گردیده است. این محدودیتها نه فقط برای سیم پیچی‌ها، بلکه برای سایر بخشهای ماشین که عموماً عایق بندی نشده اند نیز تعیین می گردد.

• اغلب استانداردها، از جمله IEC و NEMA دمای 40 درجه سانتی گراد را به عنوان مقدار مبنا برای دمای محیط در نظر می گیرند.

• در صورتی که دمای محیط بیشتر از 40 درجه سانتی گراد باشد، محدوده مجاز افزایش دما متناسب با آن کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، در استاندارد IEC برای ماشینهایی که در دمای محیطی کمتر از مقدار مبنا یعنی 40 درجه سانتی گراد کار می کنند، اجازه تصحیح درجه (حد مجاز) در مقابل هر درجه کاهش دمای محیط تا سقف 10 درجه سانتی گراد را داده است.

• محدوده افزایش دما برای موتورهایی که درزیر آب به کار می روند، براساس دمای سیال خنک کننده اندازه گیری می شود. اگر دمای سیال خنک کننده 30 درجه سانتی گراد یا کمتر از آن باشد، 10 درجه سانتی گراد به محدوده افزایش دما (محاسبه شده برای ماشینهای خنک شونده با هوا) افزوده می شود.

دانشگاه علم وصنعت ایران

گرما و خنک سازی

انواع کارکردها و ظرفیتها

حداکثر ظرفیت پیوسته (MCR) : عبارتست از باری که ماشین می تواند برای مدت زمان نامحدود تحمل کند بدون آنکه شرایط غیر عادی ایجاد شود.

ظرفیت کوتاه مدت (STR) : عبارتست از باری که ماشین پس از راه اندازی در دمای محیط می تواند در مدت زمان کوتاه مثلا10دقیقه تحمل کند بدون آنکه شرایط غیر عادی در آن ایجاد شود

ظرفیت پیوسته معادل (ECR) : عبارتست از بار و شرایطی که ماشین تحت آن بتواند بدون اینکه دمای هیچ قسمت از آن، از مقادیر تعیین شده تجاوز نماید، در شرایط معمول کار کند.

ظرفیت نوع کار (DTR) : عبارتست از شرایط بارگذاری در ماشینی که بتواند نیازهای کاری ماشین در حالت معمول را مطابق با یکی از انواع کارکردهای استاندارد برآورده نماید.

گرما و خنک سازی

انواع کارکردهای استاندارد

- کارکرد پیوسته (نوع S1)
- کارکرد کوتاه مدت (نوع S2)
- کارکرد دوره ای (نوع S3)
- کارکرد دوره ای با راه اندازی (نوع S4)
- کارکرد دوره ای با ترمز الکتریکی (نوع S5)
- کارکرد پیوسته دوره ای (نوع S6)
- کارکرد پیوسته دوره ای با ترمز الکتریکی (نوع S7)
- کارکرد پیوسته دوره ای همراه با تغییرات سرعت-گشتاور مربوطه (نوع S8)
- کارکرد با بار غیر دوره ای همراه با تغییرات سرعت (نوع S9)

گرما و خنک سازی

سیستمهای خنک کاری و انواع محفظه ها:

- وظیفه محفظه حفاظت در برابر عوامل و اثرات مضر می باشد و ارتباط تنگاتنگی با موضوع خنک کاری و تهویه در ماشینهای الکتریکی آن دارد.

- معمولاً هر چه میزان حفاظت فراهم شده بوسیله محفظه ماشین بیشتر باشد، سیستم خنک کاری اش پیچیده تر خواهد بود.

روشهای خنک کاری

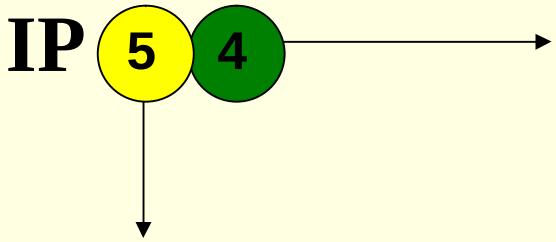
خنک کاری مستقیم
هوای محیط در تماس مستقیم با منابع گرما (سیم پیچ و هسته) می باشد

خنک کاری غیر مستقیم
هدایت گرما به محفظه کاملاً بسته و سپس بوسیله همرفت یا بوسیله یک مدار خنک کننده داخلی از سطح محفظه به هوای محیط

گرما و خنک سازی

نامگذاری محفظه ها:

برای تعیین نوع محفظه به کار گرفته شده در یک ماشین الکتریکی بر طبق استانداردهای بین المللی (IEC 34-5) از ترکیب حروف IP همراه با دو رقم استفاده می گردد.



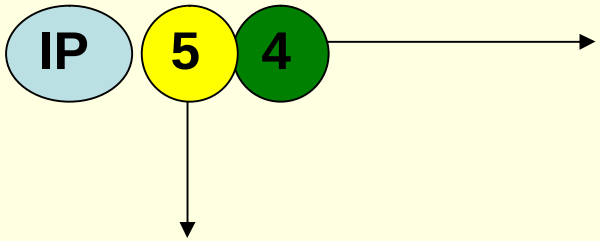
بیانگر درجه حفاظت در برابر نفوذ زیان آور آب است. از صفربرای ماشینهای حفاظت نشده تا 8 برای ماشینهایی که جهت کار مداوم در زیر آب مناسب هستند

بیانگر درجه حفاظت در برابر نفوذ ذرات جامد بین صفر و 5 متغیر است که این دو عدد به ترتیب مبین ماشینهای حفاظت نشده و ماشینهای حفاظت شده در برابر گرد و غبار می باشد.

گرما و خنک سازی

در بعضی موارد به دنبال این دو رقم یکی از حروف S یا M می آید. پسوندهای S و M نشان می دهند که درجه حفاظت، مربوط به حالت سکون ماشین (S) یا عملکرد آن (M) می باشد. اگر همراه با عدد IP هیچ حرفی نیامده باشد، درجه حفاظت مربوط به شرایط کار عادی ماشین میباشد.

انواع محفظه های کاملاً بسته عبارتند از: IP54، IP55، IP56، IP57، IP58 به ترتیب برای ماشینهای حفاظت شده در برابر پاشش آب ، در برابر فشار زیاد آب ، در برابر آبهای متلاطم ، در برابر اثر فرو رفتن در آب و در برابر فرورفتگی مداوم در زیر آب

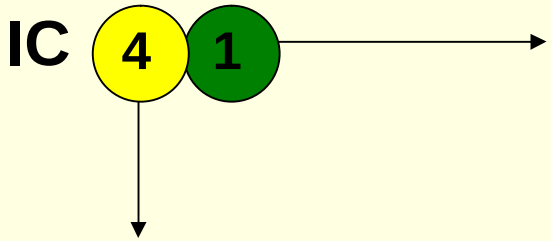


بسته به ابعاد سوراخها، سه محفظه از نوع محافظت شده مشخص شده اند: IP21، IP31 و IP41 به ترتیب برای ماشینهای حفاظت شده در برابر اشیاء جامد بزرگتر از 12، 2/5 و 1 میلیمتر
ماشینهای کاملاً بسته طوری ساخته می شوند که هوای محصور شده هیچ ارتباطی با هوای محیط نداشته باشد. .

گرما و خنک سازی

روشهای خنک سازی ماشینهای الکتریکی:

براساس استاندارد بین المللی (IEC 34-6)، توصیف روش مورد استفاده در خنک سازی ماشینهای الکتریکی از طریق هوا توسط حروف IC همراه با دو عدد دنبال آن صورت میگیرد :



عدد اول آرایش مدار خنک سازی را مشخص میکند. این عدد بین 0 تا 9 تغییر می کند که 0 برای حالت گردش آزاد هوا و 9 هنگامی که یک مبدل گرمایی جداگانه نصب شده است، مورد استفاده قرار می گیرد.

عدد دوم نحوه تأمین انرژی جهت به گردش درآوردن هوای خنک را نشان می دهد. این عدد از 0 برای همرفت آزاد (که در آن برای به گردش درآوردن هوای خنک، انرژی صرف نمی شود) تا 8 برای حالت جابجا سازی نسبی (نظیر وقتی که موتور، یک فن را می‌گرداند و از طریق جریان ایجاد شده توسط فن، خنک می شود) تغییر می کند

گرما و خنک سازی

برای مثال، IC00 به ماشینی اشاره دارد که با گردش آزاد هوا خنک می شود (صفر اول) و حرکت هوا بر اساس اختلاف دما یا همرفت آزاد صورت می گیرد. نمونه هایی از روشهای خنک سازی که معمولتر میباشند عبارتند از:

IC01 یا IC0 تهویه عادی

IC11 یا IC1 تهویه از طریق مجرا و کانال ایجاد شده در ماشین

IC41 یا IC4 ماشین خنک شده با فن محصور

IC05 تهویه عادی همراه با فن تغذیه مجزا

IC17 تهویه از طریق مجرا و کانال ایجاد شده در ماشین همراه با فن تغذیه مجزا

IC48 خنک سازی سطح ماشین با جریان هوا

گرما و خنک سازی

خنک سازی و روشهای آن:

- اغلب ماشینهای الکتریکی کوچک با هوا خنک می شوند. هدف سیستم خنک سازی آن است که حجم هوای لازم برای عبور از ماشین را با حداقل تلفات بادخوری فراهم نموده و به سمت گرمترین قسمتها هدایت کند.
- در ماشینهای معمول دمای هوای خروجی 18 تا 27 درجه سانتیگراد بالاتر از دمای هوای ورودی می باشد. بر همین اساس، به ازای هر کیلو وات تلفات در ماشین، بین 0/033 تا 0/05 متر مکعب بر ثانیه (یا 2 تا 3 متر مکعب بر دقیقه) هوای خنک کننده مورد نیاز می باشد.

خنک سازی طبیعی: ماشینهای خنک شده به صورت طبیعی، سیستم تهویه خاصی ندارند و معمولاً از نوع محفظه باز هستند. این روش خنک سازی برای بعضی از موتورهای کوچک کسری از اسب بخار مناسب می باشد، چرا که مشکلات مربوط به گرما در این موتورها خیلی قابل توجه نیست.

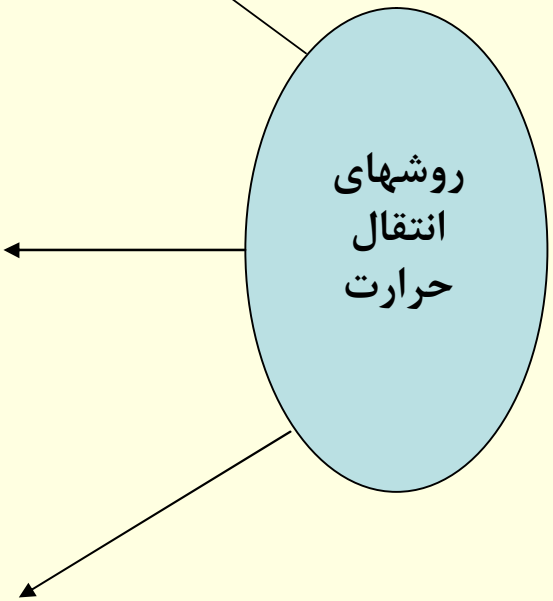
خود خنک سازی داخلی : در این حالت، خنک سازی بوسیله یک فن که جزئی از بخش گردان ماشین بوده و روی محور آن نصب گردیده، افزایش می یابد. بسته به جهت جریان هوا، دو نوع تهویه پدید می آید: تهویه مکشی (یا تخلیه ای) و تهویه اجباری

گرما و خنک سازی

جریان هوا در ماشینهای الکتریکی کوچک، به صورت محوری است (جریان شعاعی در ماشینهای بزرگ و متوسط وقتی که مجراهای خنک سازی ایجاد شده باشد به کار می رود). مجراهای محوری یا فقط در روتور به کار می روند (جریان تک محوری)، یا هم در روتور و هم در استاتور (جریان دو محوری) مورد استفاده قرار می گیرند.

خود تهویه خارجی : این نوع خنک سازی در ماشینهای کاملاً بسته که در آنها بخشهای فعال و عامل ایجاد تلفات، به هوای محیط بیرون دسترسی ندارند، مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، کل گرمای بوجود آمده در چنین ماشینی فقط می تواند از سطح خارجی محفظه ماشین انتقال داده شود. جهت افزایش نرخ جریان گرما از بخشهای داخلی ماشین به سطح خارجی آن، هوای داخل ماشین باید به کمک یک فن داخلی به گردش درآید. در بعضی از سیستم ها، محفظه ماشین بوسیله یک فن که در پشت درپوش های انتهایی نصب شده است خنک می گردد. این شیوه از خنک سازی، خنک سازی بیرونی اجباری نامیده می شود.

گرما و خنک سازی



هدایت : انتقال گرما از طریق هدایت در ماشینهای الکتریکی عمدتاً در مواد جامد (مس، فولاد و عایق) صورت می گیرد

همرفت : انتقال گرما در هوا، و سایر سیالات اساساً به روش همرفت می باشد.

تابش : معمولاً انتقال حرارت از طریق تابش در ماشینهای الکتریکی اهمیت چندانی ندارد

گرما و خنک سازی

انتقال حرارت از طریق هدایت:

تحت شرایط ماندگار، هدایت گرما در جامدات بوسیله دو قانون، به طور کامل تشریح می‌شود. از آنجا که اصل بقاء انرژی باید حفظ شود، قانون اول این است که دیورژانس شار میدان گرمایی با منابع گرما در یک ناحیه برابر است :

$$\nabla . y = w$$

به طوری که y بردار شار گرماست که نشان دهنده نرخ انتقال حرارت در واحد سطح و درجهت قائم بر سطح بوده و W چگالی منبع گرما می باشد.

قانون انتقال حرارت از طریق هدایت نشان می دهد که شار گرما در هر نقطه از یک ناحیه همگن، با گرادیان دما در آن نقطه متناسب است.

گرما و خنک سازی

، بنابراین:

$$\psi = -\lambda \nabla \theta$$

به طوری که l ضریب هدایت حرارتی است و q دما می باشد. در رابطه فوق علامت منفی برای برآورده شدن قانون دوم ترمودینامیک اضافه گردیده است که معنای آن این است که گرما از نقاط با دمای بالاتر به نقاط با دمای پایین تر، انتقال می یابد.

برای محدوده دماهایی که معمولاً در ماشینهای الکتریکی کوچک با آن مواجهیم می توان مقدار l را ثابت در نظر گرفت. با جاگذاری مقدار y و یادآوری این نکته که دیورژانس گرادیان برابر است با ∇^2 ، معادله پواسن زیر را بدست می آوریم:

$$\nabla^2 q = -\frac{w}{l}$$

گرما و خنک سازی

با دقت در رابطه فوق می توان دریافت که چنانچه در معادله فوق q با پتانسیل الکتریکی V ، W با چگالی بار الکتریکی r و l با ثابت دی الکتریک e جایگزین شود، معادله دیفرانسیل مربوط به میدان الکتروستاتیکی بدست می آید. شباهتهای بین شار گرمای هدایتی و مسائل میدان الکتروستاتیکی می تواند در جهت ساده سازی محاسبات شار گرما مورد استفاده قرار گیرد.

$$\nabla^2 V = -\frac{r}{e}$$

به عنوان مثالی ساده، مسئله ای از انتقال حرارت تک بعدی را بررسی می کنیم. برای این مسئله، معادله به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\psi = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

دانشگاه علم وصنعت ایران

گرما و خنک سازی

دو سطح موازی با دماهای q_1 و q_2 درجه سانتی گراد (مثلاً یک طرف کلاف سیم پیچ و جداره شیار)، هر یک با مساحت A (متر مربع) را در نظر می گیریم. مقدار گرمای هدایت شده از محیط بین این دو سطح (عایق شیار) برابر است با:

$$Q = \psi A = \frac{\lambda A}{\delta}(\theta_1 - \theta_2)$$

به طوری که: Q گرمای منتقل شده از طریق هدایت برحسب W است، l ضریب هدایت حرارتی محیط واسط برحسب $W/m^{\circ}C$ بوده و d فاصله بین سطوح (ضخامت عایق) برحسب m می باشد. معادله ممکن است به صورتی مشابه با قانون اهم در یک مدار الکتریکی، به شکل زیر بازنویسی شود:

$$Q = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_{th}} = \frac{\Delta\theta}{R_{th}} \quad , \quad R_{th} = \frac{\delta}{\lambda A}$$

گرما و خنک سازی

مفهوم مقاومت گرمایی ممکن است برای اجسام استوانه ای شکل نیز به کار برده شود، که در این صورت مقاومت گرمایی به شکل زیر محاسبه می شود:

$$R_{th} = \frac{Ln\left(r_o / r_i\right)}{2\pi\lambda L}$$

که r_o و r_i به ترتیب شعاعهای داخلی و خارجی می باشند، L طول محوری استوانه و l ضریب هدایت حرارتی آن است. ضریب هدایت حرارتی بعضی از مواد در جدول مربوطه ارائه شده است. برای مثال، اگر تلفات 0/5 وات در یک سیم پیچ از میان 100 میلی متر مربع عایق کلاس A که 0/5 میلی متر ضخامت دارد منتقل شود، افت دما در عایق برابر است با:

$$\Delta\theta = \frac{Q\delta}{\lambda A} = \frac{۰/۵\times۰/۵\times۱۰^{-۳}}{۰/۱۲\times۱۰۰\times۱۰^{-۶}} = ۲۰/۸^{\circ}C$$

دانشگاه علم وصنعت ایران

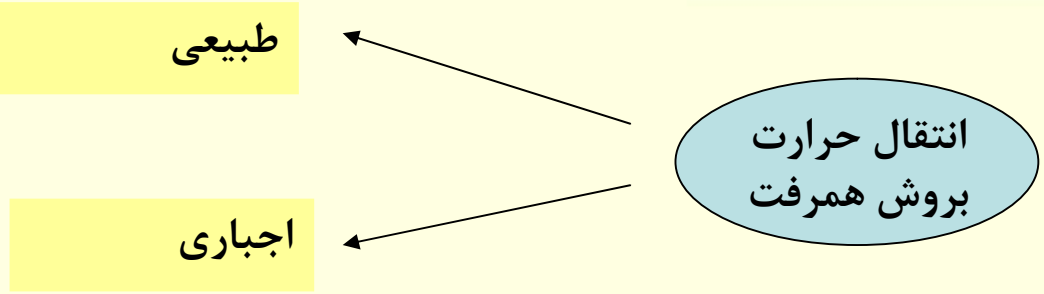
گرما و خنک سازی

- باید توجه داشت که عوامل مختلفی وجود دارند که دقت محاسبات جریان گرما در ماشینهای الکتریکی را تحت تاثیر قرار می دهند.
- برای مثال، نوع شرایط مرزی و نحوه تماس در نقاط مختلف سطح مشترک بین دو ماده، تاثیر قابل توجهی روی مقادیر محاسبه شدهٔ گرادیان دما دارند.

جدول ضریب هدایت حرارتی برخی مواد

ماده	مس	آلومینیوم	فولاد الکتریکی	برنز	میکا	هوا در 20°	عایق کلاس A	عایق کلاس B
$l\ (\frac{W}{m^{\circ}C})$	385	205	46-20	100	0/36	0/025	0/12	0/2 تا 0/0015

گرما و خنک سازی



همرفت طبیعی به این صورت پدید می آید که در اثر کاهش تراکم هوای نزدیک به یک جسم گرم، این هوا به بالا رفته و هوای سردتر جایگزین آن می گردد، هوای سرد مجدداً گرم شده و بالا می رود و این سیکل تکرار می گردد. خنک سازی سطح کموتاتور در یک ماشین نوع باز و پراکنده سازی گرما در ماشینهای خنک شده به طور طبیعی نمونه هایی از این نوع همرفت می باشد. گرمای پراکنده شده به روش همرفت طبیعی را می توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q = hA(\theta_s - \theta_a)$$

به طوری که **h** ضریب انتقال حرارت همرفت برحسب $W/m^{2^0}C$ ، **A** مساحت سطح پراکنده کننده گرما برحسب متر مربع ، q_a و q_s به ترتیب، دمای سطح پراکنده کننده و دمای محیط می باشند.

گرما و خنک سازی

- تعیین ضریب انتقال حرارت همرفت (h) و در نتیجه، مقدار گرمای پراکنده شده به روش همرفت، کار مشکلی می باشد.

- علت این امر آن است که ضریب انتقال حرارت همرفت تابعی از چند متغیر می باشد از جمله:

۱. اختلاف دمای بین بدنه گرم شده و سیال خنک کننده
۲. شکل و جهت دهی سطح گرم شده
۳. خواص فیزیکی سیال خنک کننده

- مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفت به ترتیب برای استوانه های افقی با قطر ۵۰ میلیمتر در هوا و با قطر ۲۰ میلیمتر در آب به طور تخمینی عبارتند از: ۶/۵ و ۸۹۰

- از آنجا که جزئیات ساختاری ماشینهای مختلف متفاوت می باشد، ارائه مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفت عملی نمی باشد. با این وجود برای شکلهای هندسی ساده، ضرایب انتقال حرارت همرفت آزاد را می توان بوسیله فرمول ارائه شده در مراجع مربوطه محاسبه نمود.

دانشگاه علم و صنعت ایران

گرما و خنک سازی

- در اکثر ماشینهای مدرن انتقال گرما به روش مصنوعی یا اجباری و یا با گردش سیال خنک کننده صورت می گیرد.

- محاسبه اتلاف گرما به روش همرفت اجباری بسیار پیچیده است، حتی از حالت همرفت آزاد نیز مشکل تر می باشد. چرا که ضرایب انتقال حرارت همرفت اجباری، علاوه بر عواملی که در بالا بدان اشاره شد، به سرعت هوا و به این امر که جریان هوا لایه ای یا متلاطم باشد نیز بستگی دارد.

- بنابراین برای محاسبه افزایش انتقال حرارت وقتی که تهویه از روی سطوح باز صورت می گیرد، از فرمولهای تجربی استفاده می شود.

- یکی از ساده‌ترین فرمولها به صورت زیر می باشد:

$$\bar{h} = h\left(1 + C_a \upsilon^n\right)$$

که $\bar{h}$ و **h** به ترتیب، ضرایب انتقال حرارت از سطح تهویه شده و همرفت طبیعی، C_a ثابت تجربی، υ سرعت هوا نسبت به سطح خنک شده (**m/s**) بوده و **n** ثابتی است که مقدارش بین 0/5 و 1 می باشد.

گرما و خنک سازی

- اگر جریان هوا بر روی کل سطح یکسان باشد، براساس اطلاعات تجربی C_a حدود 1/3 می باشد. وقتی که جریان هوا یکسان نیست، ضریب C_a به مقداری کمتر از 1 افت می کند.

- معادله مربوطه را می توان به راحتی به صورت زیر نوشت:

$$Q = \frac{\Delta\theta}{۱/\bar{h}A} = \frac{\Delta\theta}{R_C} \quad , \quad R_C = \frac{۱}{\bar{h}A}$$

- R_C مقاومت حرارتی همرفت است.

- این امر موجب می شود تا بتوان ساختار مدل یک مدار فشرده برای فرآیند همرفت حرارت در ماشین را پی ریزی نمود که به راحتی با مبدل هدایت گرما جفت و جور می شود (واحدهای R_C و R_{th} هر دو $^0C/W$ می باشد).

گرما و خنک سازی

مدلهای انتقال حرارت:

مدلهای گرمایی موجود در ماشینهای الکتریکی را می توان به سه گروه دسته بندی نمود:

۱. **مدلهایی که براساس حل عددی معادلات جریان گرما می باشند،**

۲. **مدلهای پارامتر فشرده**

۳. **مدلهایی که شکل هندسی ماشین را به صورت استوانه‌های هم مرکز مورد بررسی قرار می دهند (مدلهای پوسته ای).**

دانشگاه علم و صنعت ایران

گرما و خنک سازی

۱. **مدلهای مبتنی بر حل عددی میدان:**

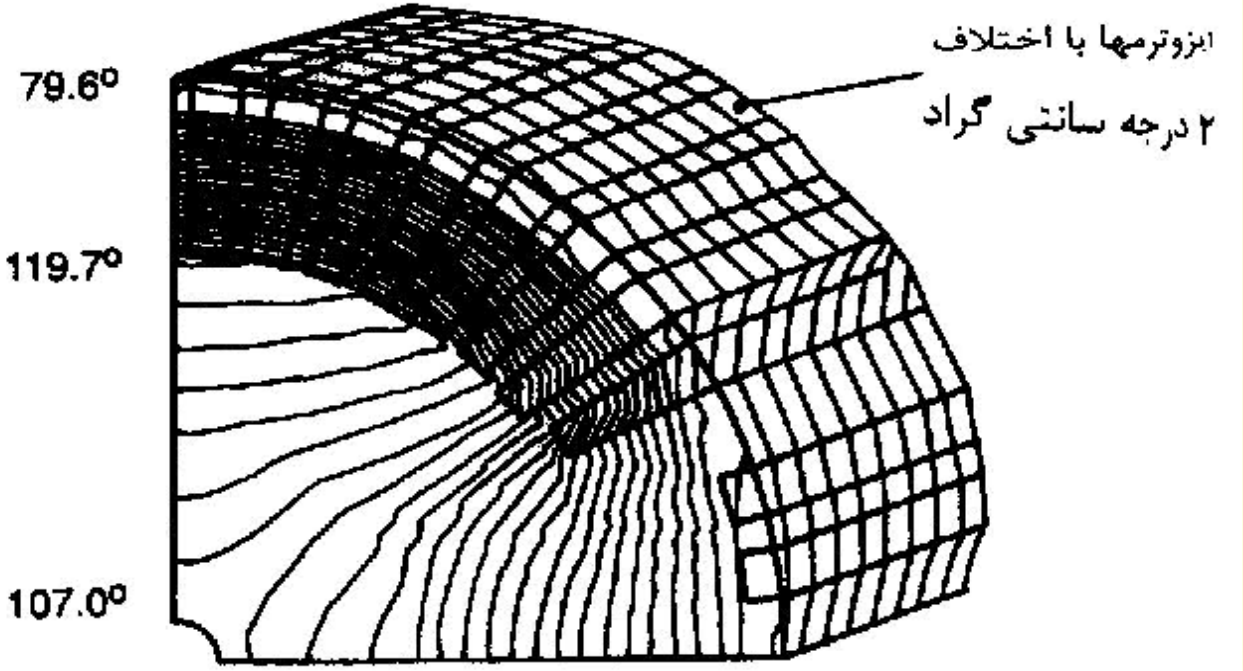
- از لحاظ قدمت، روش اختلاف محدود نسبت به روش اجزاء محدود دارای تقدم است. برای مثال، Richert کاربرد روش اختلاف محدود را برای محاسبه توزیع دما در ماشینهای الکتریکی، در سال 1969 تشریح نمود.

- متعاقبا Armor و Chari مدل اجزاء محدود سه بعدی را برای مطالعه توزیع دما در یک توربین ژنراتور مورد استفاده قرار دادند. در این روش، شکل هندسی دقیق شیارها و نیز وابستگی هدایت حرارتی به دما را (که وقتی خنک سازی با هیدروژن به کار می رود، نمی تواند ثابت باشد) در نظر گرفته شد.

- . روش اجزاء محدود برای حل معادله دیفرانسیل انتقال گرما در شکل قطبی سیلندری، با استفاده از مش بندی شامل اجزاء منحنی شکل که دقیقاً با شکل شیارها منطبق شده اند به کار رفت. تحلیل گذرا نیز توسط Armor انجام شد.

گرما و خنک سازی

- شکل 2-4 ایزوترمها (درجه حرارت یکسان) رابرای روتوری دو قطب نشان می دهد .



شکل ۲-۴ ایزوترمها در توربوژنراتور دو قطبی [2.9].

گرما و خنک سازی

- اگر چه این مدلها، مدلی دو بعدی هستند اما با این حال جالب توجه است که بین دمای اندازه گیری شده و دمای محاسبه شده سیم پیچی استاتور، همچنانکه در شکل 2-5 مشاهده می شود، اختلاف بسیار کمی بدست می آید.

گرما و خنک سازی

2. مدلهای پارامتر فشرده:

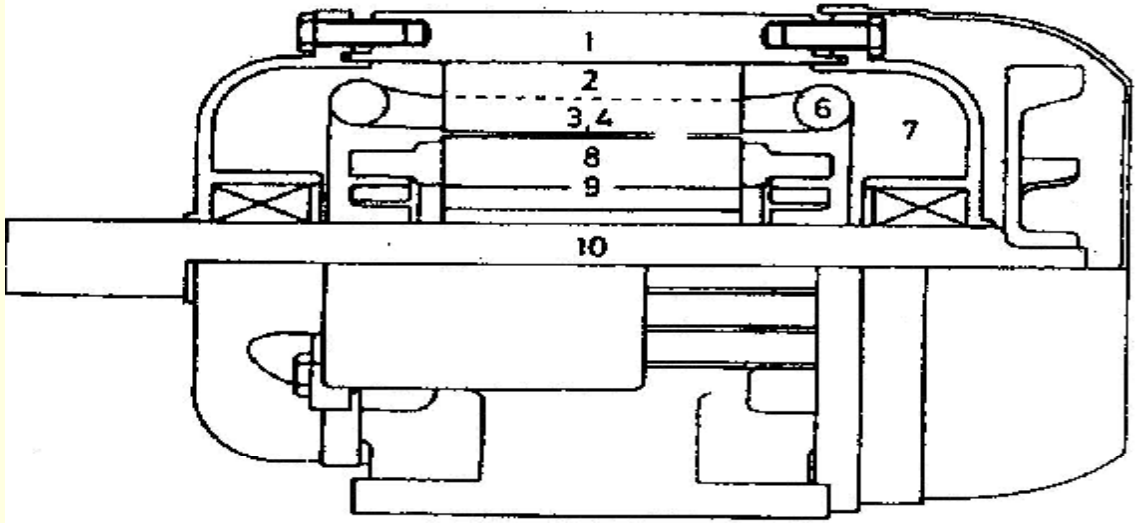
این مدلها از مفهوم مقاومت گرمایی که در معادلات هدایت و همرفت گرما بیان گردید، استفاده می کنند. در این مدلها، سیستمی متشکل از عناصر مدار فشرده مورد استفاده قرار میگیرد. برای مثال، روتور به 8 ناحیه تقسیم شده و مدار معادل گرمایی آن شامل 8 گره میشود.

معادلات گرمایی برای هر گره شامل منبع گرمایی قابل شناسایی، عبارت ذخیره گرما متناسب با ظرفیت گرمایی عنصر (در حالت گذرا)، عبارت هدایت گرمایی که بیانگر فرآیند هدایت گرماست و در اکثر موارد، عبارتی که بیانگر انتقال حرارت سطح به هوای خنک کننده است، می باشد.

اگر مقادیر دقیق ضرایب هدایت گرمایی مواد مختلف و نیز ضرایب انتقال حرارت سطوح تهویه شده در دست باشد، این ساختار ساده قاعدتاً منجر به نتایج دقیقی می شود.

مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفت بین بدنه و هوای خارجی مستقیماً از طریق آزمایشات تعیین شده اند. ضرایب انتقال حرارت همرفت آزاد و اجباری به ترتیب از آزمایش روتور قفل شده و آزمایش بار ثابت مشخص میشوند.

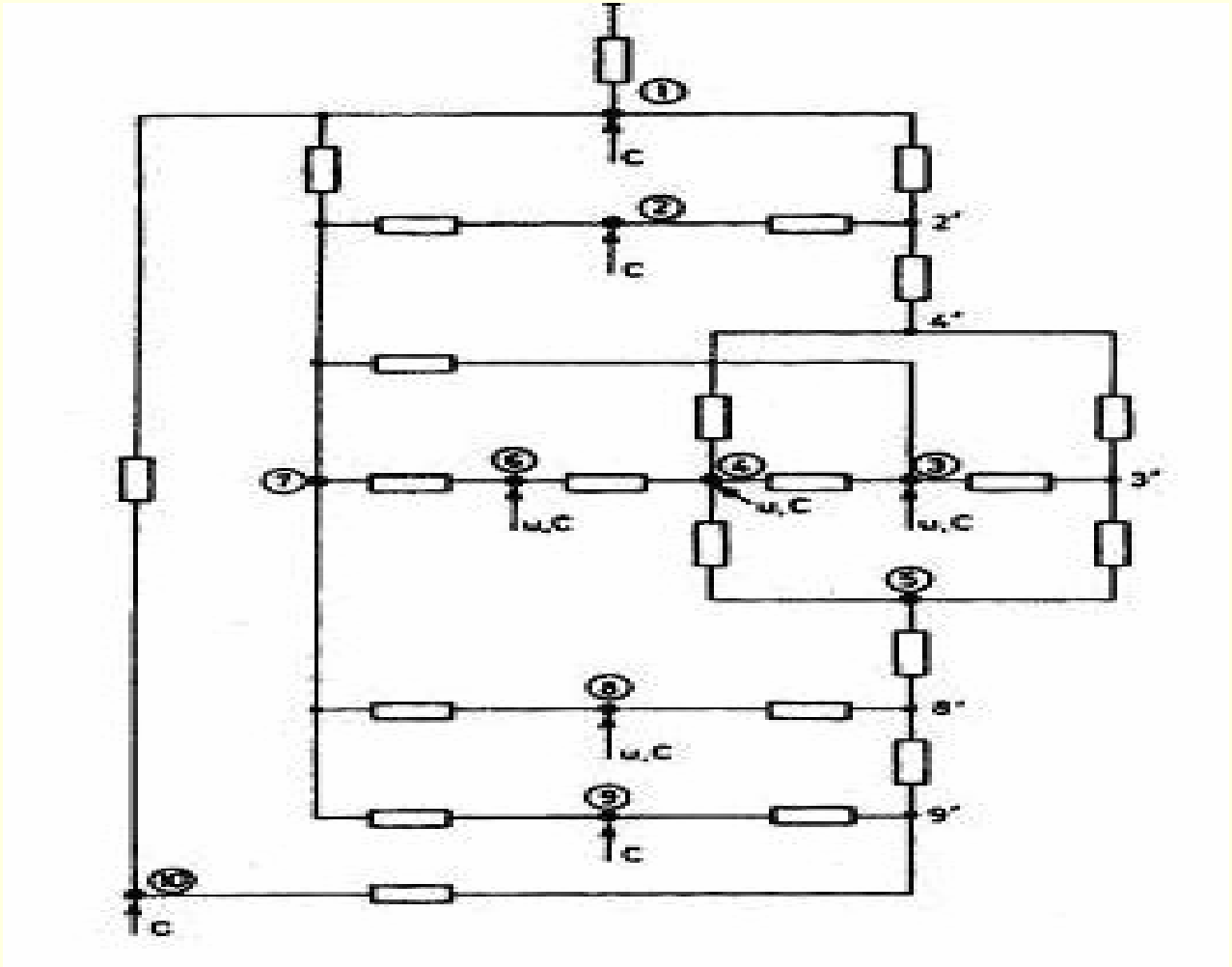
گرما و خنک سازی



1 قاب
2 استاتور
3 دندانه های استاتور
4 سیم پیچی استاتور
5 فاصله هوایی
6 اتصال انتهایی
7 هوای داخل درپوش
8 سیم پیچی روتور
9 آهن روتور
10 شفت (محور)

شکل ۲-۶ نواحی حرارتی یک ماشین القایی [2.12].

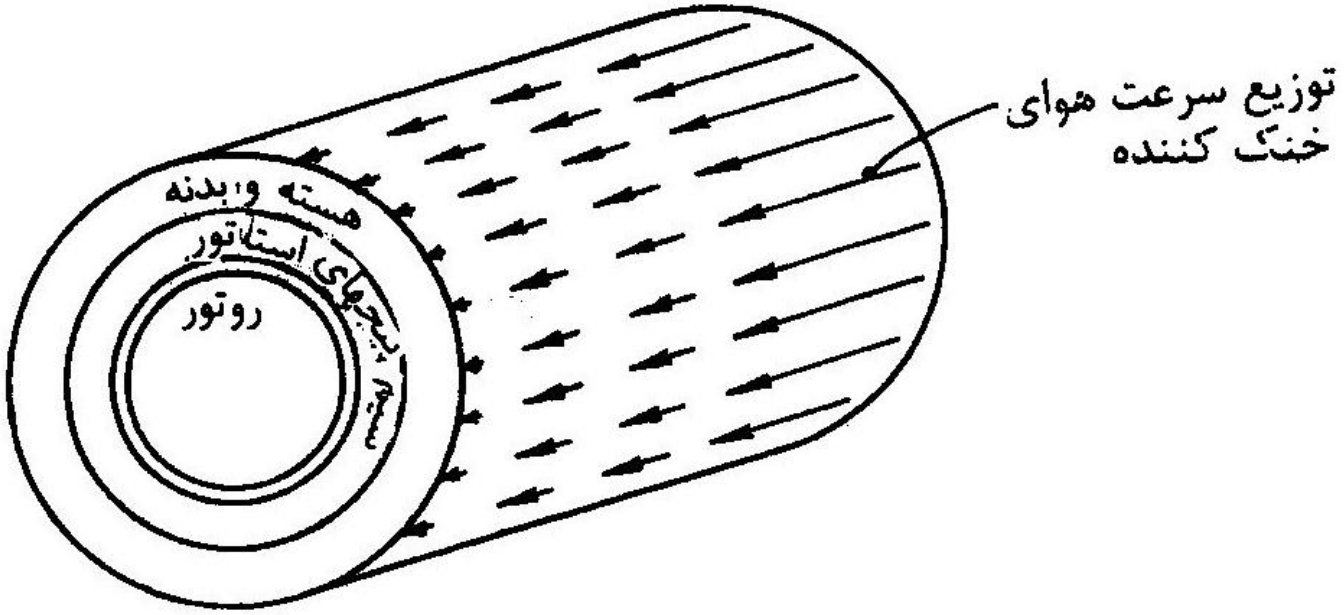
گرما و خنک سازی



گرما و خنک سازی

3. مدلهای پوسته ای:

در مدل پوسته ای، ماشین طوری در نظر گرفته می شود که گویا از پوسته های استوانه ای هم مرکز با خواص حرارتی مختلف ساخته شده است.



شکل ۲-۸ مدل پوسته ای انتقال حرارت در یک ماشین القایی.

گرما و خنک سازی

این روش فقط برای کلاس معینی از ماشینها که برجستگی هندسی در آنها وجود ندارد (نظیر موتورهای القایی و موتورهای dc بدون جاروبک از نوع آهنرباهای نصب شده روی سطح موتور) قابل استفاده می باشد.

نتایج حاصله نشان می دهد که دماهای محاسبه شده و اندازه گیری شده به خوبی با یکدیگر تطابق دارند . تغییر درجه حرارت برحسب موقعیت محوری و در حالت پایدار، برای یکی از موتورهای تحلیل شده در جدول ارائه شده است .

ناحیه	Z=0	Z=0.25L	Z=0.5L	Z=0.75L	Z=L
روتور	۸۴/۹ (۸۷/۰)	۸۶/۸	۸۸/٤	۸۸/۹	۸۸(۸۹)
استاتور	۷۱/۹ (٦۷/٥)	۷۰/۸(٦۷/٥)	۷۰/۳(٦۷/٥)	۷۰/۸(٦۷/٥)	۷۱/۹(٦۷/٥)
بدنه	۲۲/٥ (۱۹/۰)	۲۷/٥ (۲٤/۰)	۳٤/۰ (۳٥/۰)	٤۳(٤۱)	۳۷(۳٥)

گرما و خنک سازی

اطلاعات داده شده در جدول نشان می دهند که خطای محاسبات در ناحیه بدنه دارای بیشترین مقدار است (ماکزیموم 15 درصد). شاید این امر تنها بدین علت است که بیشترین تردید مربوط به شرایط مرزی موجود، در بدنه ماشین می باشد. مقادیر دمای محاسبه شده (و اندازه گیری شده) در ناحیه استاتور تقارن جالبی را نسبت به سطح شعاعی مرکزی موتور نشان می دهند. در مورد روتور می توان انتظار داشت که بین دو انتهای سرد و گرم، خصوصاً وقتی که دماهای روتور دارای یک شیب است، گرادیان دما بوجود آید.

گرما و خنک سازی

حل مسائل انتقال حرارت:

- مدل حرارتی امکان پیش بینی توزیع دما در سرتاسر ماشین تحت شرایط عملکرد خاص را فراهم می آورد. اما طراح عموماً علاقه مند به داشتن اطلاعات حرارتی در برخی بخش ها از قبیل افزایش دمای سیم پیچی ها می باشد.

- پی ریزی مدل حرارتی به عنوان توصیفی از وضعیت حرارتی و فرآیند های موجود در ماشین واقعی شامل سه مرحله مشخص یعنی:تعیین مدل فیزیکی، مدل ریاضی و مدل عددی می‌باشد.

- نقطه شروع کار ارئه مدل فیزیکی است که در چنین مدلی باید کوشید تا حد امکان و بدون حذف برخی از اجزائ مهم ماشین، مسئله را ساده نمود. به عنوان مثال، می توان مجموعه ورقها را به شکل یکپارچه در نظر گرفت. مهمترین فرض، در خصوص ماهیت جریان هوا در فاصله هوایی می باشد (لایه ای یا متلاطم).

- مدل ریاضی، تعبیری قرار دادی از قوانین فیزیکی مبتنی بر فرضهای ساده شونده است. برای مثال اگر جریان هوا در فاصله هوایی به صورت لایه ای باشد، انتقال حرارت در کل فاصله هوایی، براساس روش هدایت بوده و معادله دیفرانسیل حاصل که بخشی از مدل ریاضی است، باید منعکس کننده این مطلب باشد.

گرما و خنک سازی

- به روشهای حل معادلات دیفرانسیل حرارت، مدلهای عددی اطلاق می شود.در بسیاری از موارد، مدلهای عددی روی کامپیوترها اجرا می شوند.

- در حالت کلی صرف زمان و تلاش در جهت توسعه مدلهای ریاضی و فیزیکی پیشرفته، مدل عددی نسبتاً ساده ای را برای حل نیاز خواهد داشت. مثلاً برای ایجاد مدل پارامتر فشرده دقیق یک ماشین، در مقایسه با بهره گیری از نرم افزار اجزاء محدود برای حل معادلات دیفرانسیل جریان گرما در فضای سه بعدی، زمان بیشتری لازم است. با این وجود، نیازهای سخت افزاری و نرم افزاری دو مدل عددی، کاملاً متفاوت می باشد.

- در یک مدل پوسته ای فرض بر آن است که ماشین متشکل از استوانه هایی هم مرکز است، که این فرض در اکثر موارد خطاهایی را بدنبال خواهد داشت. با این حال، ممکن است برای معادلات، راه حلی تحلیلی بدست آید که این امر خطاهای مربوط به راه حل های عددی را حذف می کند. با این وصف، طراحان براساس ابزاری که در اختیار دارند و نیز پیچیدگی آرایش خنک سازی به کار رفته در ماشین راجع به مدل مورد استفاده، تصمیم می گیرند.

گرما و خنک سازی

داده های انتقال حرارت:

1- انتقال حرارت در فاصله هوایی:

نحوه انتقال حرارت در فاصله هوایی به این امر بستگی دارد که آیا جریان هوا لایه ای است یا متلاطم و این مسئله به نوبه خود به طول شعاعی فاصله هوایی، سرعت روتور و نسبت شعاع روتور به طول فاصله هوایی بستگی دارد.

برای تعیین نوع و گذر جریان هوا از حالت لایه ای به حالت متلاطم در مراجع معیاری ارائه شده است. هنگامی که شرط ذیل برقرار باشد، در فاصله هوایی فقط جریان لایه ای وجود دارد:

$$R_e \le ۴۱/۱ \sqrt{\frac{r_۱}{l_g}} \quad , \quad R_e = \frac{l_g \upsilon}{V}$$

که R_e عدد Reynolds در فاصله هوایی است، $r_۱$ شعاع روتور برحسب m، l_g طول شعاعی فاصله هوایی برحسب m، υ سرعت خارجی روتور برحسب m/s و v غلظت جنبشی هوا برحسب $m^۲/s$ می باشد.

گرما و خنک سازی

ضریب سطحی فاصله هوایی را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$h = \frac{N_{Nu}\lambda}{l_g}$$

که λ ضریب هدایت حرارتی هوا برحسب $w/m^{o}C$ و N_{NU} که بدون دیمانسیون است عدد Nusselt می باشد. عدد Nusselt در مرجع $[2.16]$ به صورت زیر داده شده است:

$$N_{NU} = ۲/۲ \qquad R_e \le ۴۱/۱$$

$$N_{NU} = ۰/۲۳R_e^{۰/۶۳}P_r^{۰/۲۳} \qquad ۴۱/۱ \le R_e \le ۱۰۰$$

که P_r عدد Prandtl بوده و به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_r = \frac{C_p v}{\lambda}$$

به طوری که C_p گرمای ویژه هوا بر حسب $KJ/kg^{o}c$ می باشد.

گرما و خنک سازی

2- انتقال حرارت در مجراها:

- در طراحی ماشین الکتریکی جهت بهبود خنک سازی آن می توان مجراهای محوری و یا شعاعی را مورد استفاده قرار داد. البته، به کارگیری مجراهای شعاعی در ماشینهای کوچک چندان معمول نیست.

- در مورد انتقال حرارت در حفره ها یا مجراها اطلاعات معمولاً به شکل گرافیکی یا به صورت روابط تجربی ارائه شده اند.

گرما و خنک سازی

3- پراکنده سازی گرما از سطح ماشین:

• می توان سطح پراکنده کننده گرما در ماشین الکتریکی را بدون افزایش ابعاد ماشین، با به کارگیری پره هایی روی سطح خارجی قاب ماشین افزایش داد.

• پره های مورد استفاده معمولاً دارای مقاطع مستطیل شکل هستند اما بعضی مواقع پره های ذوزنقه ای شکل یا مقاطع مخروطی نیز مورد استفاده قرار می گیرند.

• نحوه انتقال حرارت بین یک قاب پره دار و محیط اطراف آن را می توان به رسانایی در داخل پره و همرفت (و در حالت کلی بهمراه تابش) بین پره ها و هوای محیط، تقسیم نمود.

گرما و خنک سازی

4- مقاومت اتصال قاب-هسته استاتور:

وقتی که دو سطح برای تشکیل یک سطح مشترک روی هم قرار می گیرند، معمولاً ناحیه اتصال حقیقی جامد به جامد بین آنها کسر کوچکی از ناحیه اتصال ظاهری است. هنگامی که تغییرات دمای یکنواختی در امتداد اجزاء متصل به هم اعمال می گردد، تأثیر سطح تماس بر فرآیند جریان گرما، به صورت عدم پیوستگی دمایی ظاهر می شود.

خطوط شار گرمایی تمایل دارند تا در نقاط اتصال حقیقی دو جسم جامد همگرا شوند زیرا این مسیر به صورت قابل توجهی دارای مقاومت کمتری نسبت به نواحی دیگر اتصال می باشد.

مقاومت اتصال در برابر انتقال حرارت، به صورت نسبت افت دما در سطح مشترک، تقسیم بر شار حرارتی عبوری از آن تعریف می شود. به بیان ریاضی :

$$R_{co} = \frac{۱}{h_{co}} = \frac{\Delta\theta}{\psi}$$

که R_{co} مقاومت حرارتي اتصال برحسب $\left(m^{۲}{}^{o}c/w\right)$ ، h_{co} رسانايي حرارتي اتصال برحسب $w/m^{۲}{}^{o}c$ ، $\Delta\theta$ افت دما از اين طرف تا آن طرف سطح مشترك برحسب $\left({}^{o}c\right)$ و ψ چگالي شار حرارتي بين سطحي برحسب $\left(w/m^{۲}\right)$ مي باشند

گرما و خنک سازی

بررسی ها نشان می دهد که در فشار اتصال بین 0/35 تا 0/7 نیوتن بر میلیمتر مربع (50-100 Psi)، مقادیر مقاومت حرارتی اتصال حدود 80-30 درصد در سطوح زنگ خورده، بزرگتر از مقادیر سطوح پاکیزه مشابه می باشد و این مطلب در رنج وسیعی از فشارهای نگهدارنده صادق است ، این امر مسئله بسیار مهمی است که باید به خاطر سپرده شود، چرا که سازندگان ماشین های الکتریکی معمولاً هسته های ساخته شده را، پیش از آنکه روی قابها نصب شوند، در مدت زمان نسبتاً طولانی در انبار نگهداری می کنند.

هم چنین محقق شده است که پرداختن سطح هسته، مقاومت حرارتی اتصال را بین 18 تا 35 درصد کاهش می دهد و این کاهش، تقریباً مستقل از فشار نگهدارنده می باشد . البته این تأثیر، چندان مهم نیست که مرحله پردازش اضافی در تولید را توجیه کند

گرما و خنک سازی

جدول 2-3 مقادیر مقاومت اتصال $\left(R_{co} \times ۱۰^{۴}\right)$ با فشار نگهدارنده $۰/۲۸ N/mm^{۲} (۴۰ Psi)$

فشار تماس $\left(N/mm^{۲}\right)$	سطح تمیز زنگ زده و خورده شده پرداخت شده		
۰/۰	۲۴/۵	۳۷/۳	۲۰/۱
۰/۷	۱۵/۱	۲۸/۳	۱۲/۴

جدول 2-3 مقادیر مقاومت اتصال $\left(R_{co} \times ۱۰^{۴}\right)$ با فشار نگهدارنده $۰/۵۶ N/mm^{۲} (۸۰ Psi)$

فشار تماس $\left(N/mm^{۲}\right)$	سطح تمیز زنگ زده و خورده شده پرداخت شده		
۰/۰	۱۹/۲	۲۰/۱	۱۲/۷
۰/۷ (۱۰۰ Psi)	۱۳/۶	۱۸/۸	۸/۵

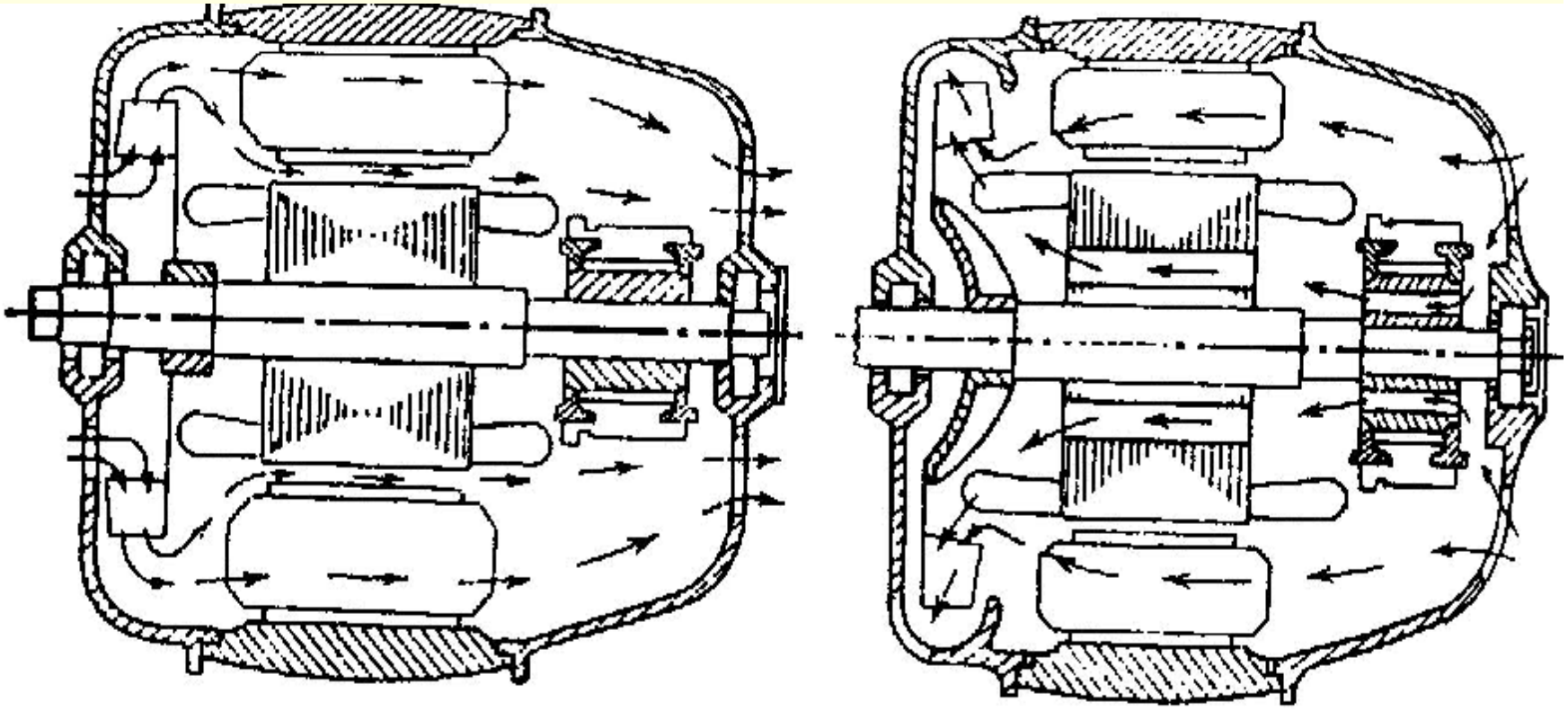
دانشگاه علم وصنعت ایران

گرما و خنک سازی

5- ضریب هدایت حرارتی مواد جامد:

اطلاعات مربوط به ضریب هدایت حرارتی سیم پیچی، مواد جامد و هسته مورق معمولاً در بسیاری از کتابهای مربوط به موضوع کلی انتقال حرارت قابل است. اطلاعات مربوط به اکثر موادی که یک طراح ماشین الکتریکی با آن سر و کار دارد پیش تر در همین فصل (جدول 2-1) ارائه شده است.

گرما و خنک سازی



شکل ۲-۱ تهویه تخلیه ای (سمت چپ) و تهویه اجباری (سمت راست)