



دانشکده مهندسی  
برق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

بنام خدا

بخش پنجم  
بخش پنجم

طراحی ماشینهای جریان مستقیم  
طراحی ماشینهای جریان مستقیم

دانشگاه علم و صنعت  
ایران



دانشکده مهندسی  
برق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران





## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- با توجه به بهره گیری عمومی از سیستمهای تولید، انتقال و توزیع ac به جای dc، ماشینهای dc در حال حاضر تقریباً به طور منحصر به فرد به عنوان موتور مورد استفاده قرار می گیرند..
- پیشرفت مبدلهای نیمه هادی مطمئن، اعتبار و محبوبیت موتورهای dc را در بسیاری از کاربردهای صنعتی تحت تأثیر قرار داده است. علی رغم این امر، هنوز موتورهای dc در زمینه محرکه های با سرعت متغیر مورد استفاده هستند. مواردی نظیر : غلتکهای نورد ، جرثقیل های سقفی و سایر کاربردهایی که نیازمند کنترل دقیق گشتاور و یا سرعت می باشد.
- این موتورها همچنین در وسایلی که با باتری راه اندازی می شوند (مثل قایقهای شناور ) و لیفتراکها و برای راه اندازی لوکوموتیوهای راه آهن مورد استفاده قرار می گیرند.
- موتورهای dc کوچک، بیشتر از نوع آهنرباهای دائم، به صورت گسترده در خودروها به کار می روند. مثل موتورهای استارت ، موتورهای برف پاک کن ، موتورهای بالا بر شیشه، موتورهای پروانه و موتورهای مربوط به راه اندازی سایر لوازم جانبی



دانشکده مهندسی  
برق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

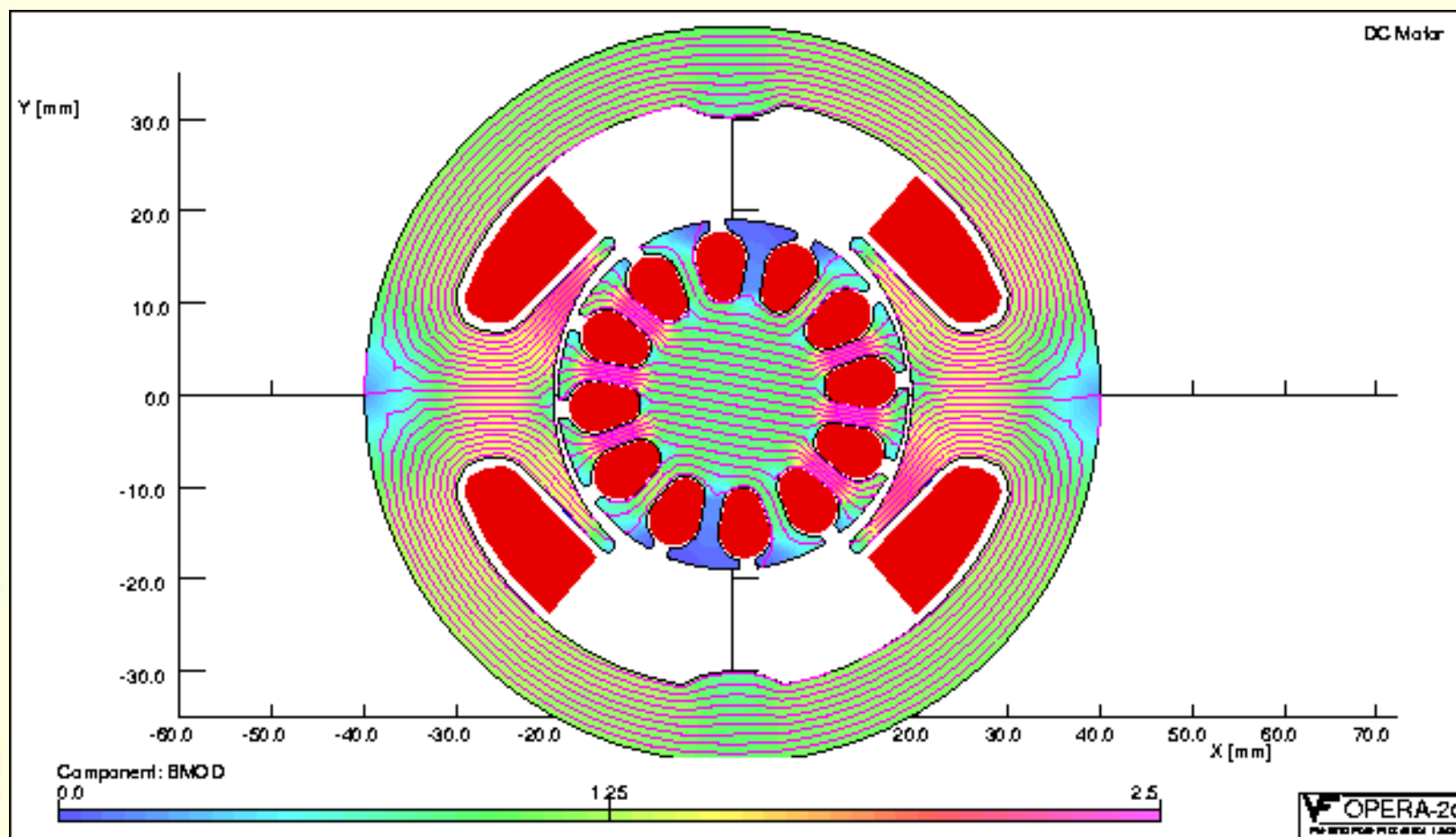




دانشگاه صنعتی  
شیراز

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



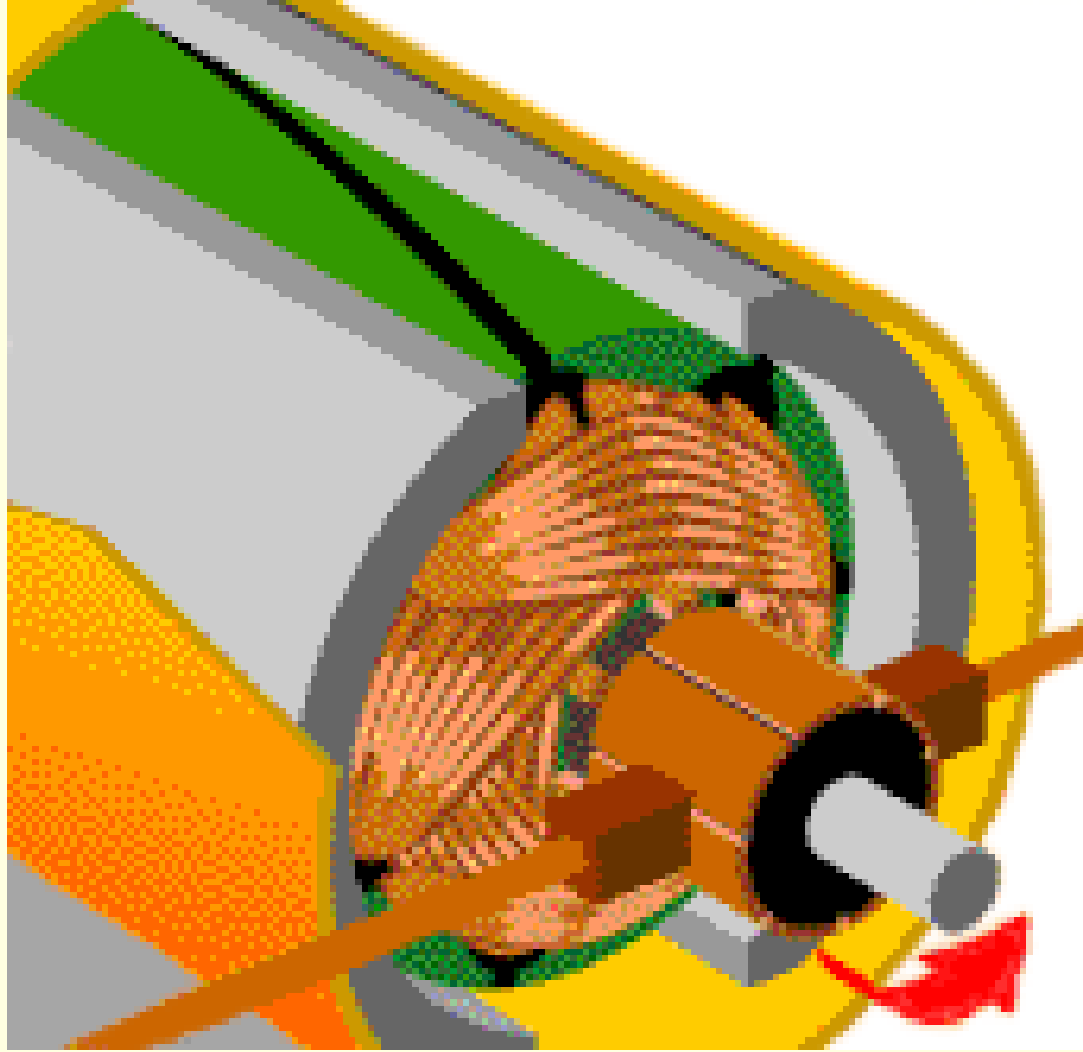


دانشکده مهندسی  
برق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



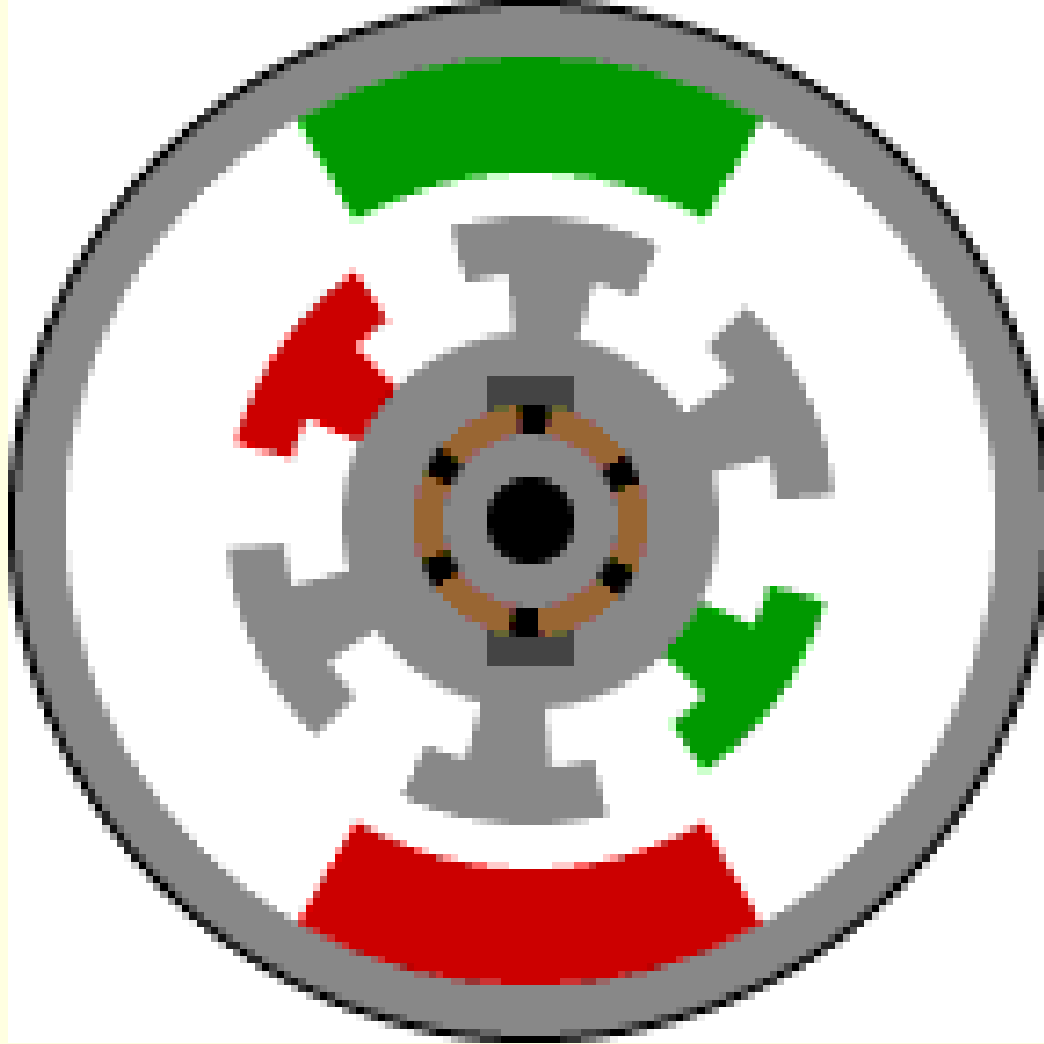


دانشکده مهندسی  
برق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



موتور DC آهنربای  
دائم

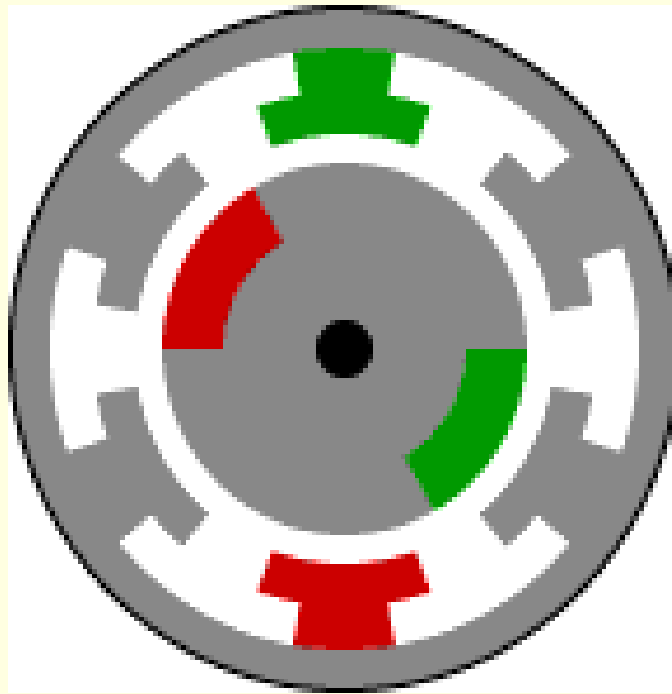


دانشگاه علم و صنعت  
ایران

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



دو روتور دو قطب و چهار قطب آهنربای دائم برای موتور  
DC بدون جاروبک



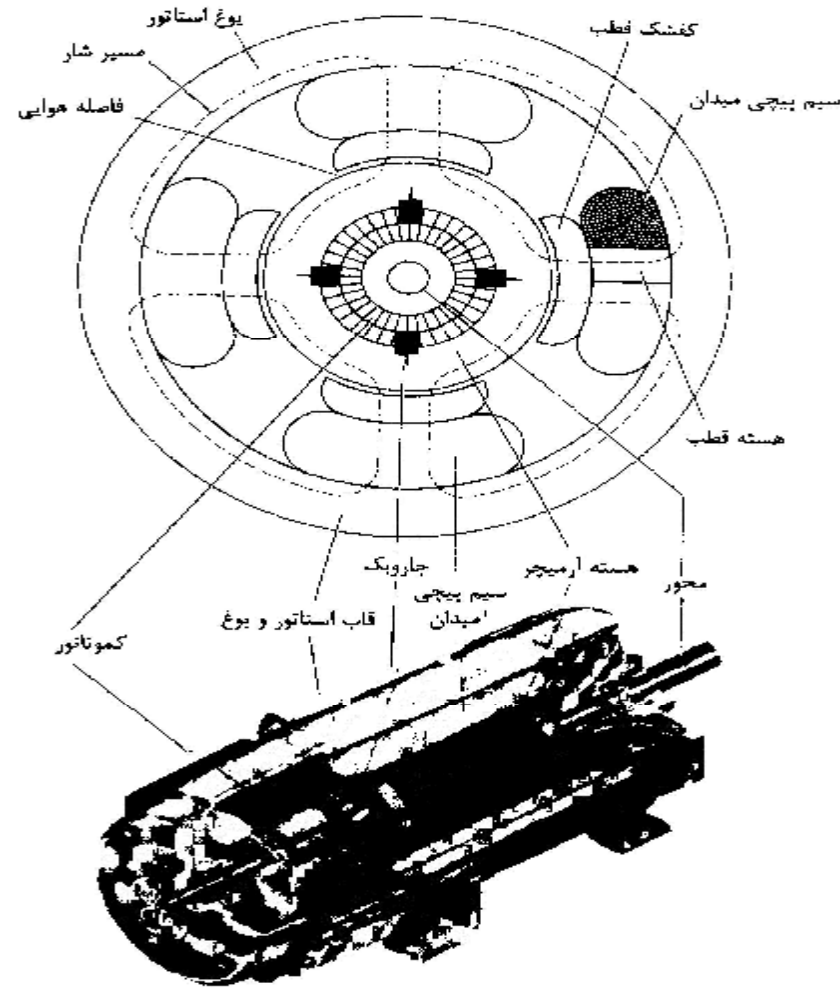
## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### جزئیات ساختاری

- به طور معمول، ماشین dc شامل سه قسمت می باشد: سیستم میدان (معمولاً شامل قطبهای اصلی، قطبهای کمکی یا کموتاسیون و سیم پیچهای جبران کننده)، آرمیچر و کموتاتور.
- سیستم میدان ماشین dc بر روی استاتور آن استقرار می یابد، در حالی که آرمیچر بر روی روتور جای داده می شود.
- قطبهای کمکی برای بهبود شرایط کموتاسیون در ماشین طراحی شده اند، این قطبها بین قطبهای اصلی قرار می گیرند.
- سیم پیچ جبران کننده نیز در پیشانی چاک خورده قطب جهت بهبود کموتاسیون، مشابه قطبهای کمکی به کار می روند. البته سیم پیچهای جبران کننده بسیار گران قیمت بوده و در موتورهای کوچک صرفاً در کاربردهای شتاب بالا و تغییر دور ناگهانی بکار میروند.



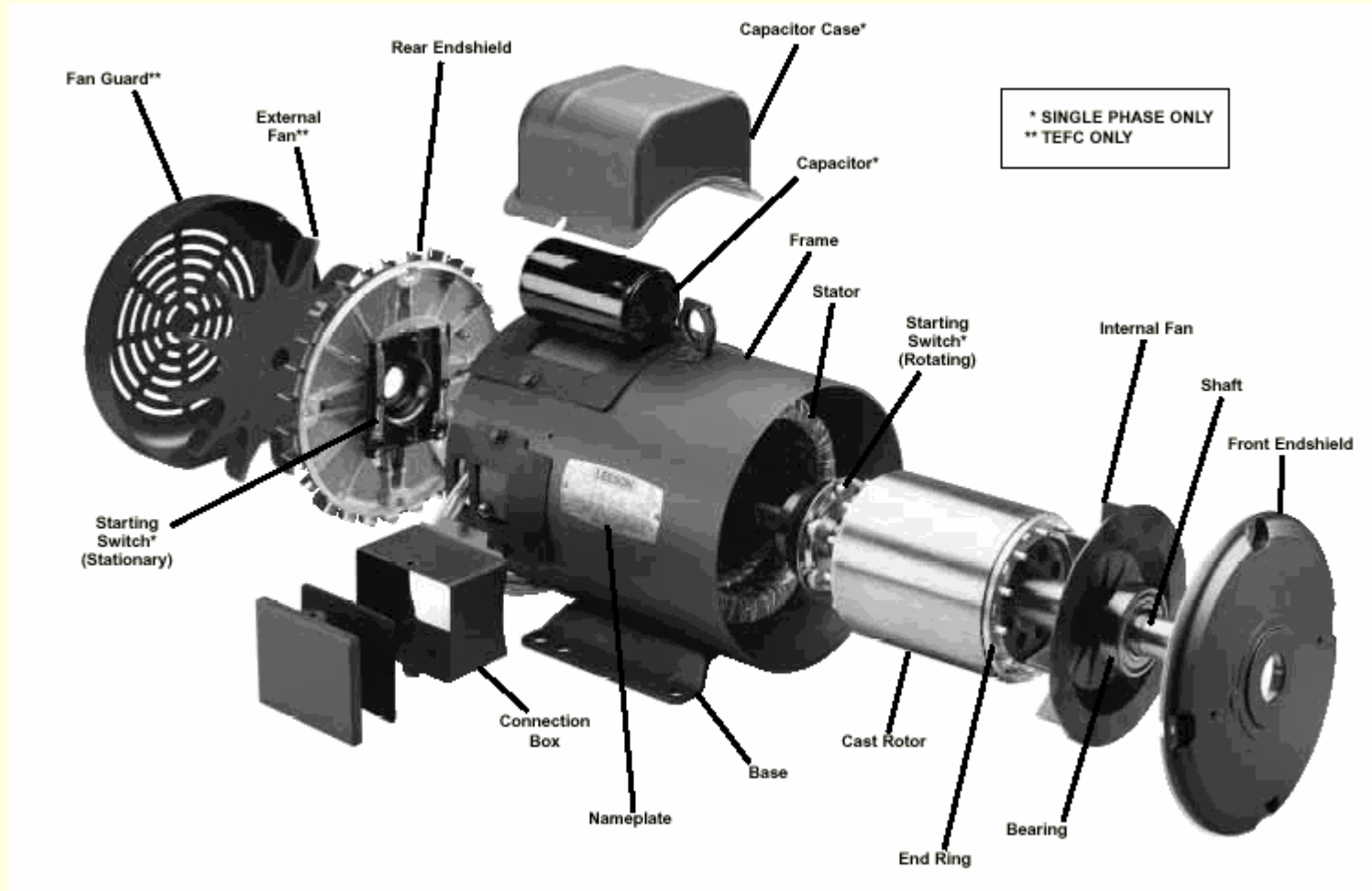
# طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۱-۴ ساختمان ماشین dc



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم





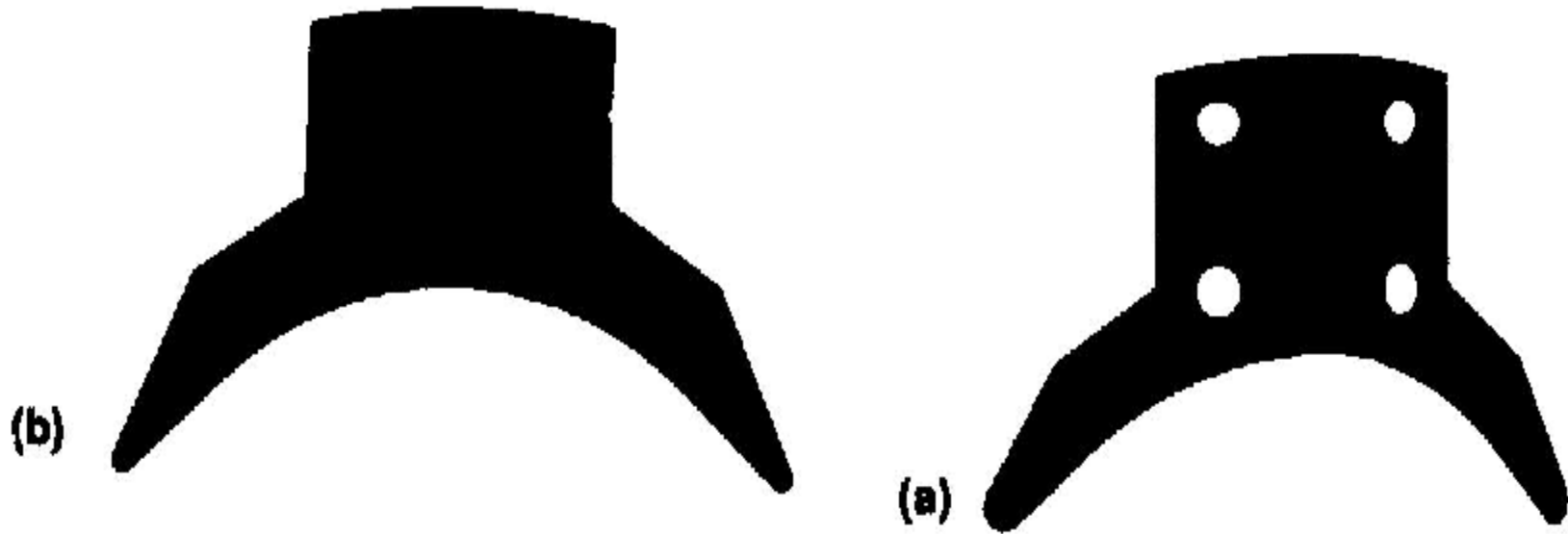
## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### استاتور ماشین dc

- استاتور ماشین dc شامل یوغ (یا هسته استاتور)، قطبهای اصلی و قطبهای کموتاسیون می باشد. یوغ علاوه بر اینکه بخشی از مدار مغناطیسی است، به عنوان نگهدارنده مکانیکی سیستم میدان نیز عمل می کند.
- در گذشته یوغ های یکپارچه چدنی مورد استفاده قرار می گرفت. سپس یوغ های فولاد ریخته بخاطر چگالی شار اشباعی در حدود دو برابر، جایگزین چدن شده باعث کاهش چشمگیر سطح مقطع یوغ ها و نیز وزن و ابعاد ماشین گردید.
- در حال حاضر استفاده از یوغ های مورقی از جنس فولادهای الکتریکی مرسوم است. این امر بدین علت است که اغلب موتورهای صنعتی پیشرفته از مبدلهای قدرت استاتیکی تغذیه می شوند که در کنار فراهم سازی تغذیه متغیر مطلوب، جریانهای هارمونیکی در ماشین تزریق می کنند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۴-۲ (a) ورقه قطب پرچ شده و (b) ورقه قطب جوش داده شده.

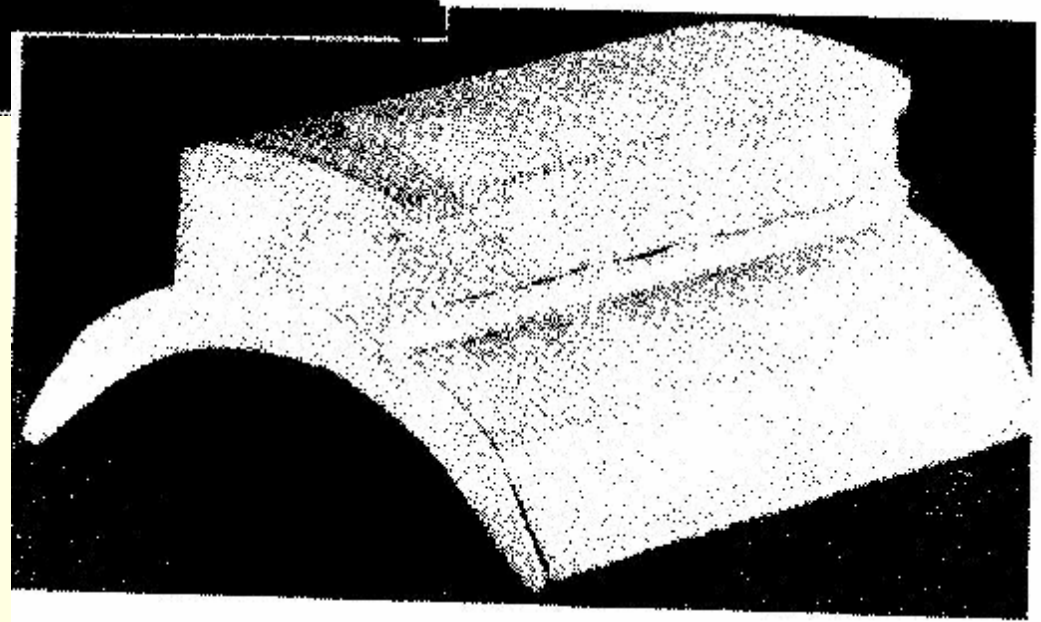
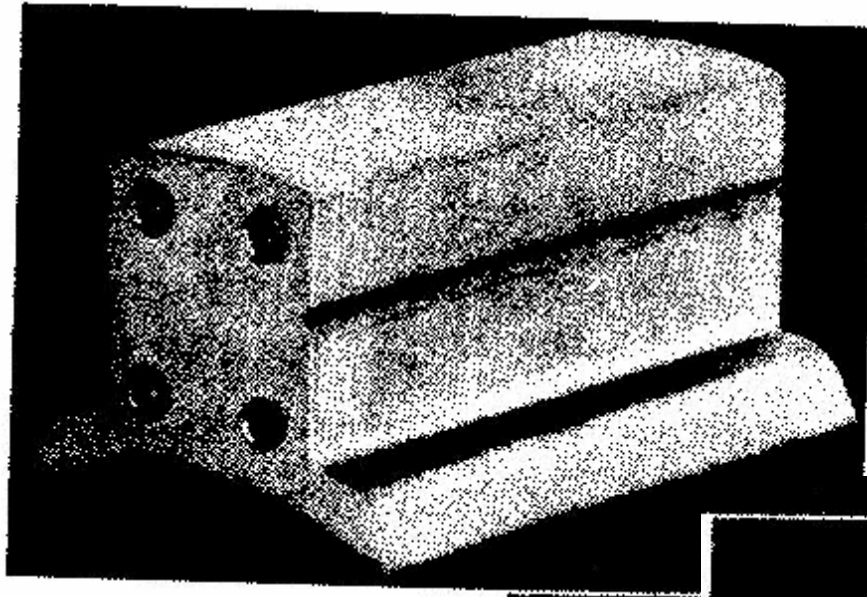


دانشکده مهندسی  
برق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



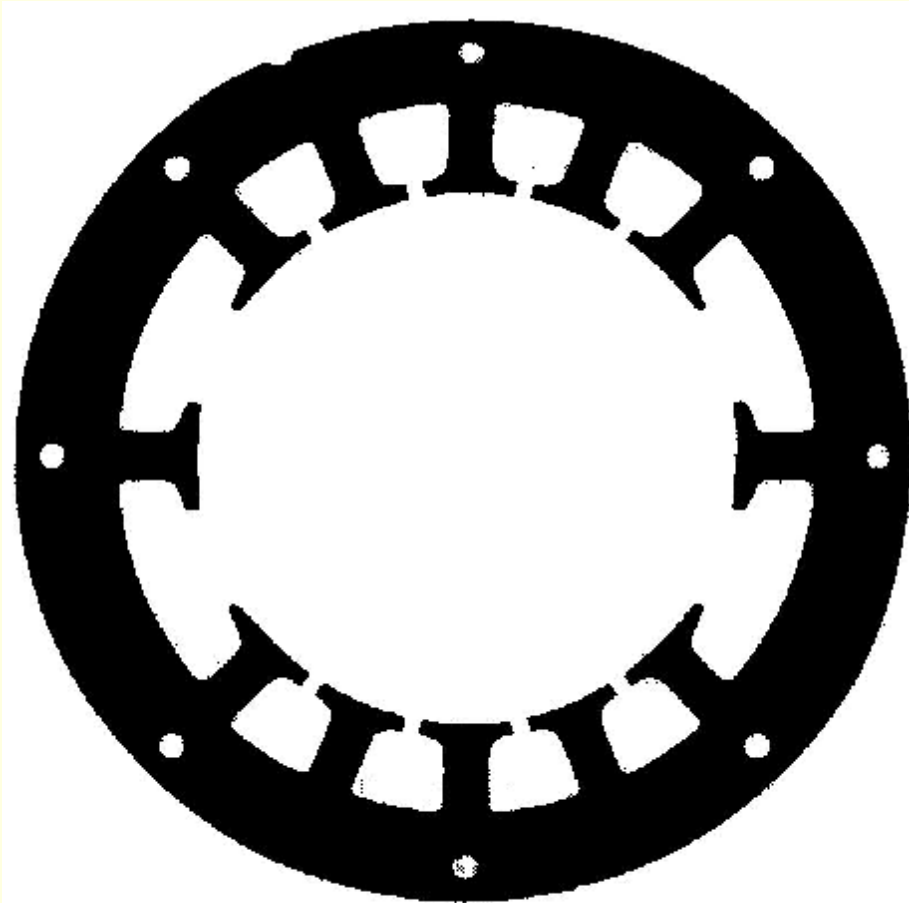


دانشکده مهندسی  
پرف

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



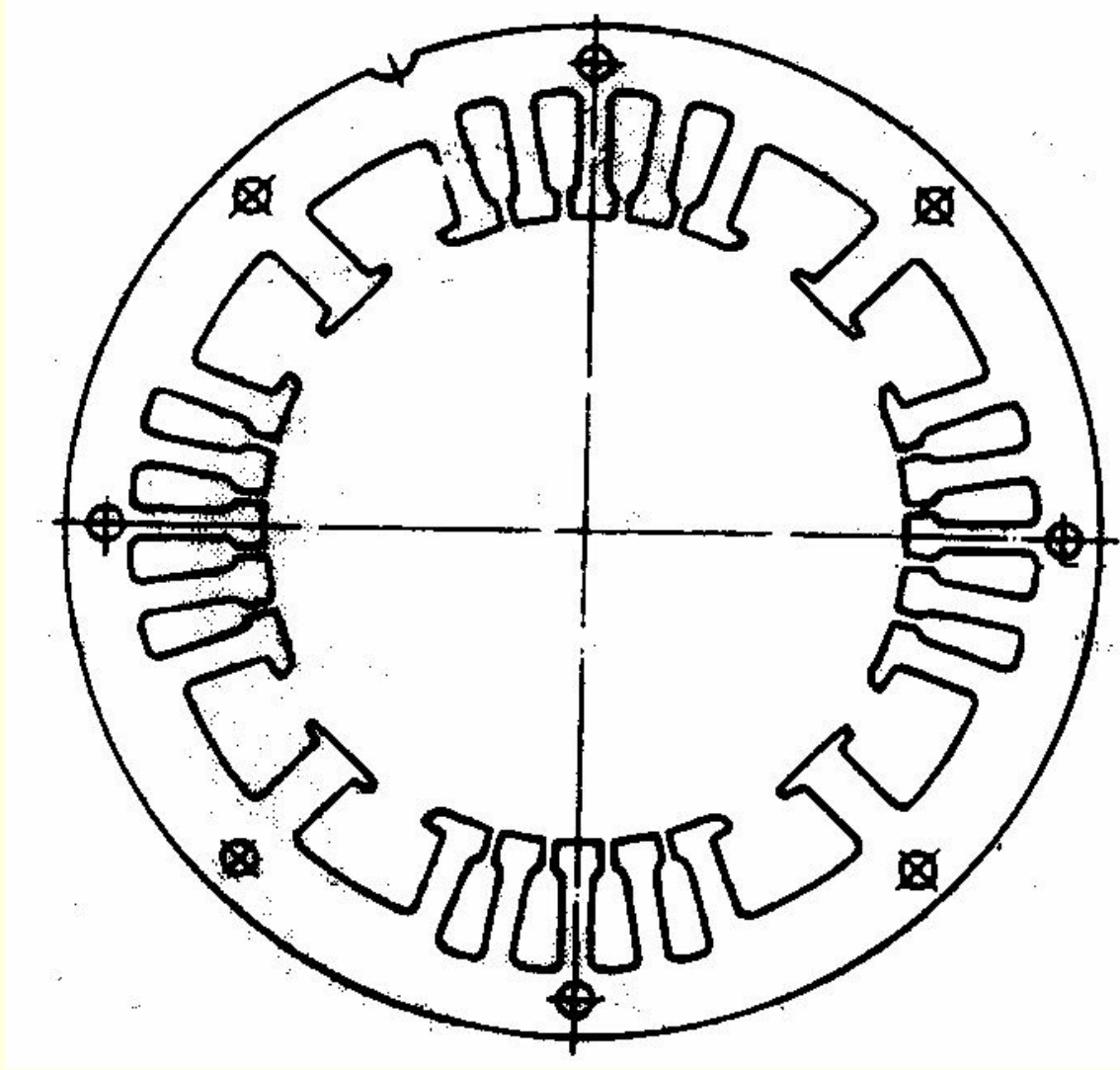
شکل ۴-۴ یک ورقه استاتور ۲ قطب.



دانشکده مهندسی  
یزق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴



دانشگاه علم و صنعت  
ایران

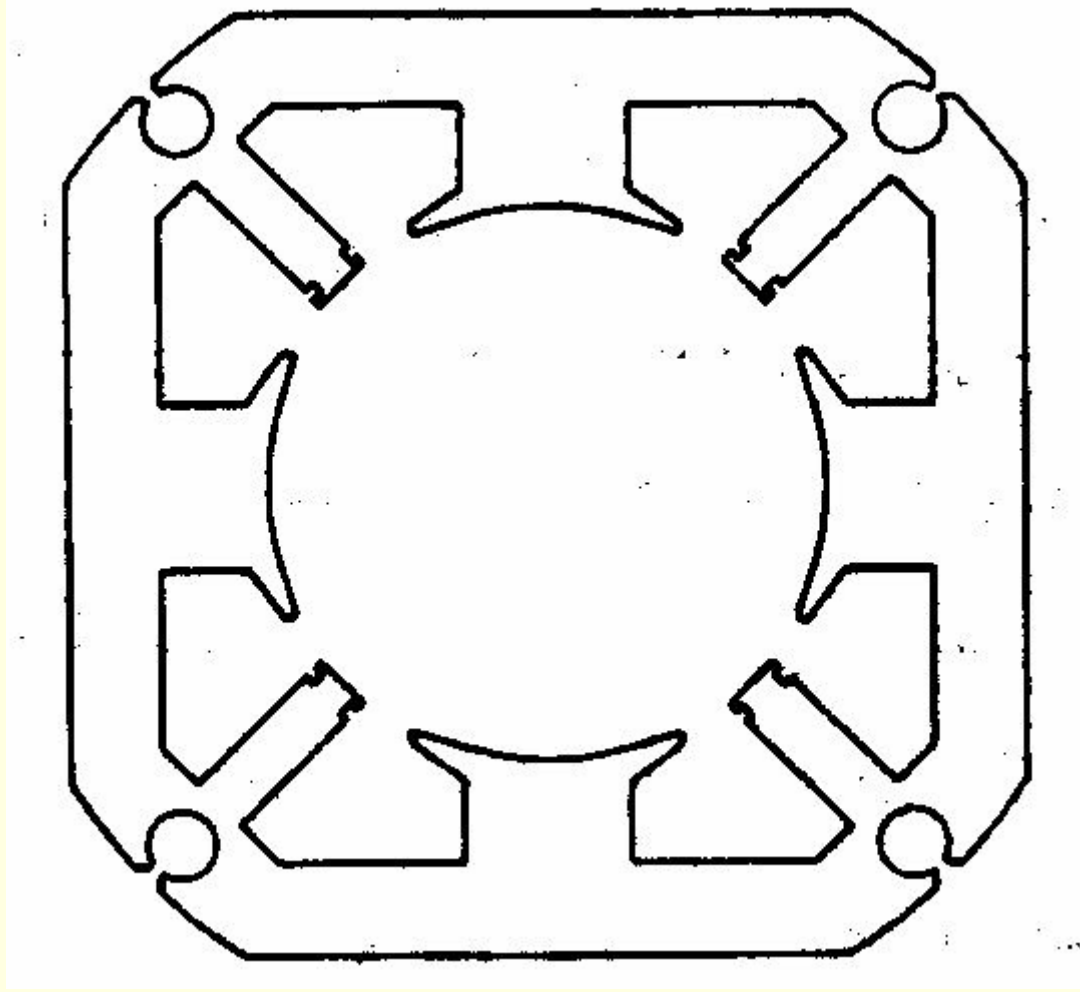


دانشکده مهندسی  
شیراز

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم





## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- در موتورهای با اندازه قاب تا 180 عموماً برای ساخت استاتور، ورقه‌های یک تکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- برای اندازه‌های بزرگتر، سیم پیچی نمودن سیم پیچهای میدان اصلی بر روی استاتور جمع شده مشکل می‌گردد. این امر استفاده از ورقه‌های مجزا برای قطب اصلی را ایجاب می‌نماید، یعنی قبل از اینکه کل مجموعه در محل پیچ شود، قطب ساخته شده و سیم پیچ میدان روی آن سوار می‌شود.

### سیم پیچهای میدان

- هنگامی که قطبهای اصلی مونتاژ می‌شوند، سیم پیچهای میدان اصلی همراه با لایه‌هایی از عایق، مستقیماً روی قطبها سیم پیچی می‌شوند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- در ماشینهای dc کوچک عموماً سیمهای مسی گرد به کار برده می شوند.
- سیم پیچهای میدان سری ممکن است در بالای سیم پیچهای شنت (موازی) قرار گرفته و یا به صورت سیم پیچی جداگانه مورد استفاده قرار گیرند. در هر دو حالت، دو سیم پیچی باید به طور مناسب از یکدیگر عایق شده باشند.
- هنگامی که قطبهای کمکی (قطبهای کموتاسیون) در یک ماشین dc کوچک به کار می روند، سیم پیچها (از سیم گرد) مستقیماً روی بدنه قطب کمکی سیم پیچی می شوند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### موتورهای آهنربای دائم

- در یک موتور dc آهنربای دائم معمول، تحریک بوسیله یک قطعه آهنربای قوسی شکل که مستقیماً روی یوغ سوار شده است، ایجاد می گردد.
- این مسئله عموماً موتورهای کوچکتر و سبکتر و نیز با راندمان بیشتر را موجب می گردد
- استفاده از این ساختار، در وسایل مربوط به خودرو و در صندلی های چرخ دار برقی و نیز محرکهای جرثقیل های چنگک دار بسیار متداول می باشد.
- اگر چه ممکن است سیستمهای تحریک آهنربای دائم برای شش قطب یا بیشتر تحقق یابد، اما ترکیبهای دو قطب و چهار قطب به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- قطعات قطب آهنربا هر یک، بسته به ماده آهنربای دائم مورد استفاده، در جهت شعاعی یا محیطی مغناطیسی می شوند.
- مقدار پسماند زدایی پائین آهنرباهای آلنیکو، مغناطیس شدن محیطی را ایجاب می نماید که منجر به سیستم تحریکی محیطی می گردد. قطبهای آهنربای آلنیکو معمولاً با کفشکهای قطب آهنی تهیه می شوند
- هنگامی که آهنرباهای خاک کمیاب یا سرامیکی (فریت) مورد استفاده قرار می گیرند، پسماند زدایی بالای آنها اجازه مغناطیس شدن در جهت شعاعی را می دهد.
- قطعات آهنربای از پیش مغناطیس شده به سادگی بوسیله چسب صنعتی به یوغ فولاد ریخته می چسبند.

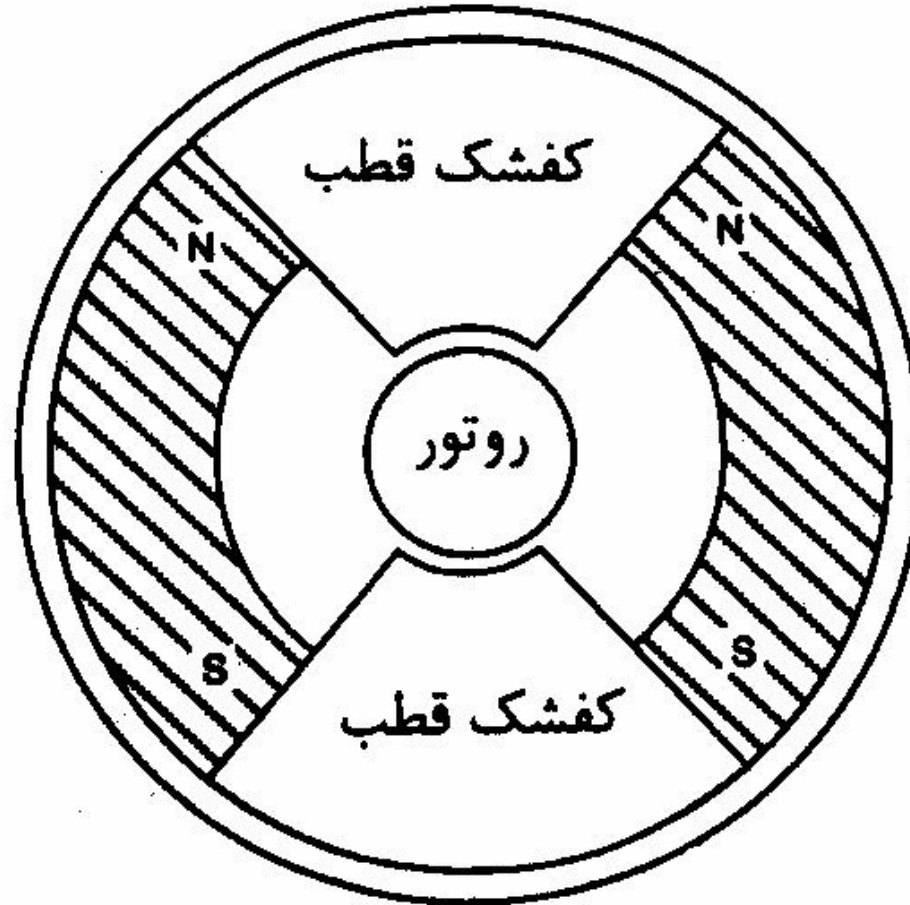


## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- آهنرباهای آلنیکو ( $KA/m$  480-240) معمولاً، امکان مغناطیس شدن در محل پس از مونتاژ و نیز مغناطیس زدایی جهت انجام هرگونه کار تعمیر را خواهد داد.
- اما مغناطیس نمودن سایر آهنرباها بدلیل ملزومات مغناطیس کنندگی بالای آنها : آهنرباهای سرامیکی ( $KA/m$  1800-875)، آهنرباهای ساماریوم- کبالت ( $KA/m$  3980-1590) و آهنرباهای نئودیمیوم- آهن- بورون ( $KA/m$  2790-1590) در مقایسه با آلنیکوها، در محل تقریباً غیر ممکن خواهد بود.
- سوار کردن قطعات آهنرباهای از پیش مغناطیس شده نیز هزینه ساخت را افزایش می دهد. به هر حال، نصب سیم پیچهای مغناطیس کنندگی در موتورهای آهنربای دائم سرامیکی کوچک غیر عملی بوده و در اغلب موارد جهت کاهش اندازه موتور، هزینه بالای آهنرباهای خاک کمیاب تحمیل می گردد.



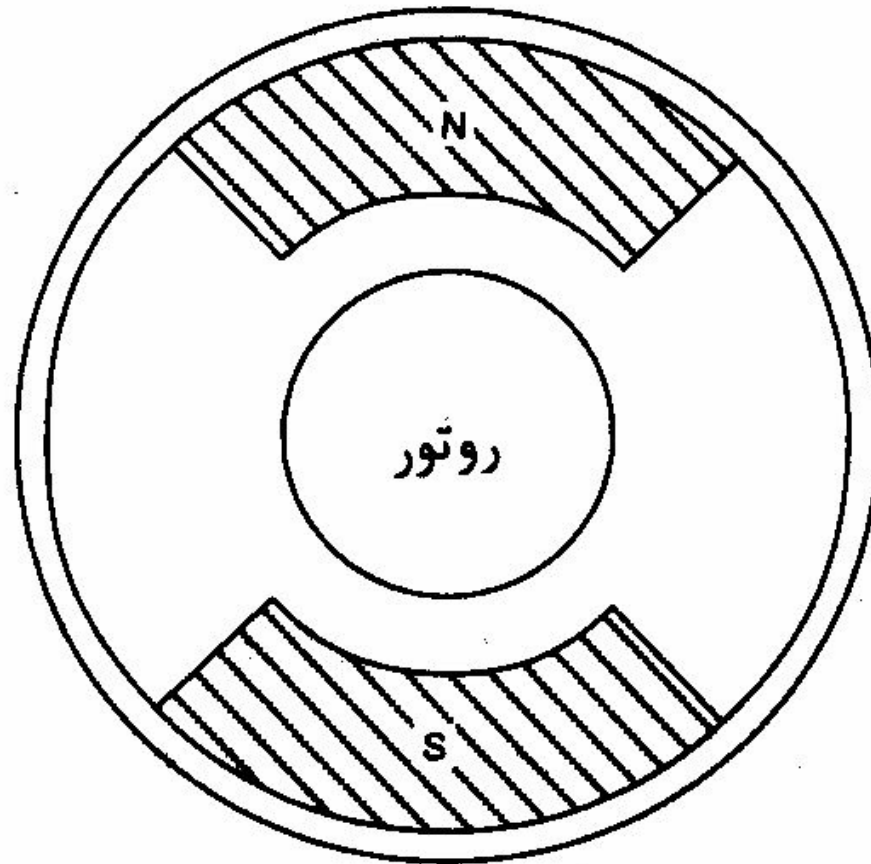
## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۴-۷ ساختار میدان آهنربای آلنیکو



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۴-۸ ساختار میدان آهنربای سرامیکی



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### آرمیچر

- اگر چه می توان در ساخت مجموعه میدان، ورقه های نسبتاً ضخیم (تا ضخامت 2 میلی متر) یا حتی قطبهای یکپارچه (با بدون کفشکهای قطب مورق) را به کار برد، در آرمیچر ماشین dc ورقه های فولاد سیلیکون دار نازک با تلفات پائین (با ضخامت 0/35، 0/5 و 0/65 میلی متر) مورد استفاده قرار می گیرند.
- ورقه های آرمیچر ماشینهای dc کوچک معمولاً به صورت یکپارچه با فشار روی هم محکم می شوند. این ورقه ها در بعضی مواقع، با سوراخهای محوری تهویه ایجاد می گردند.

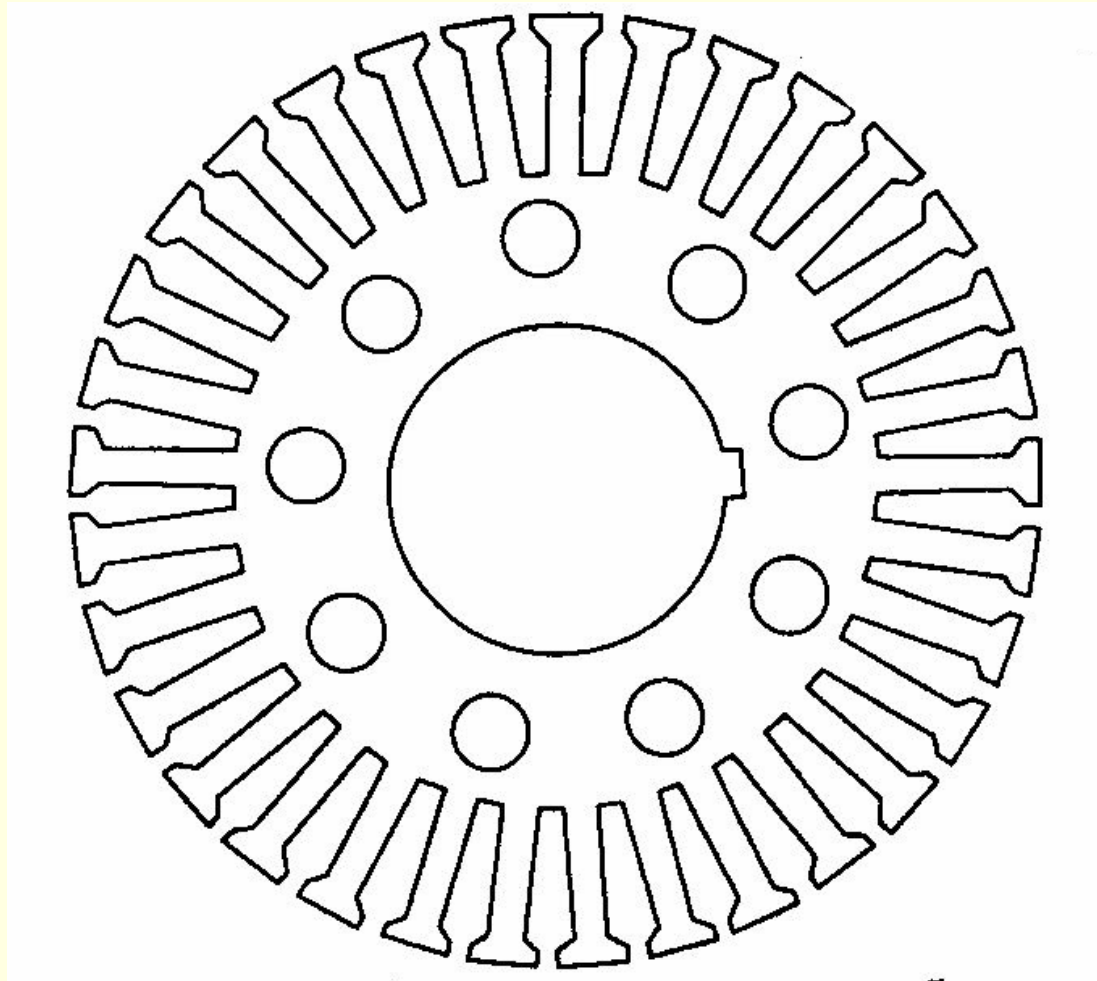


دانشکده مهندسی  
برق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



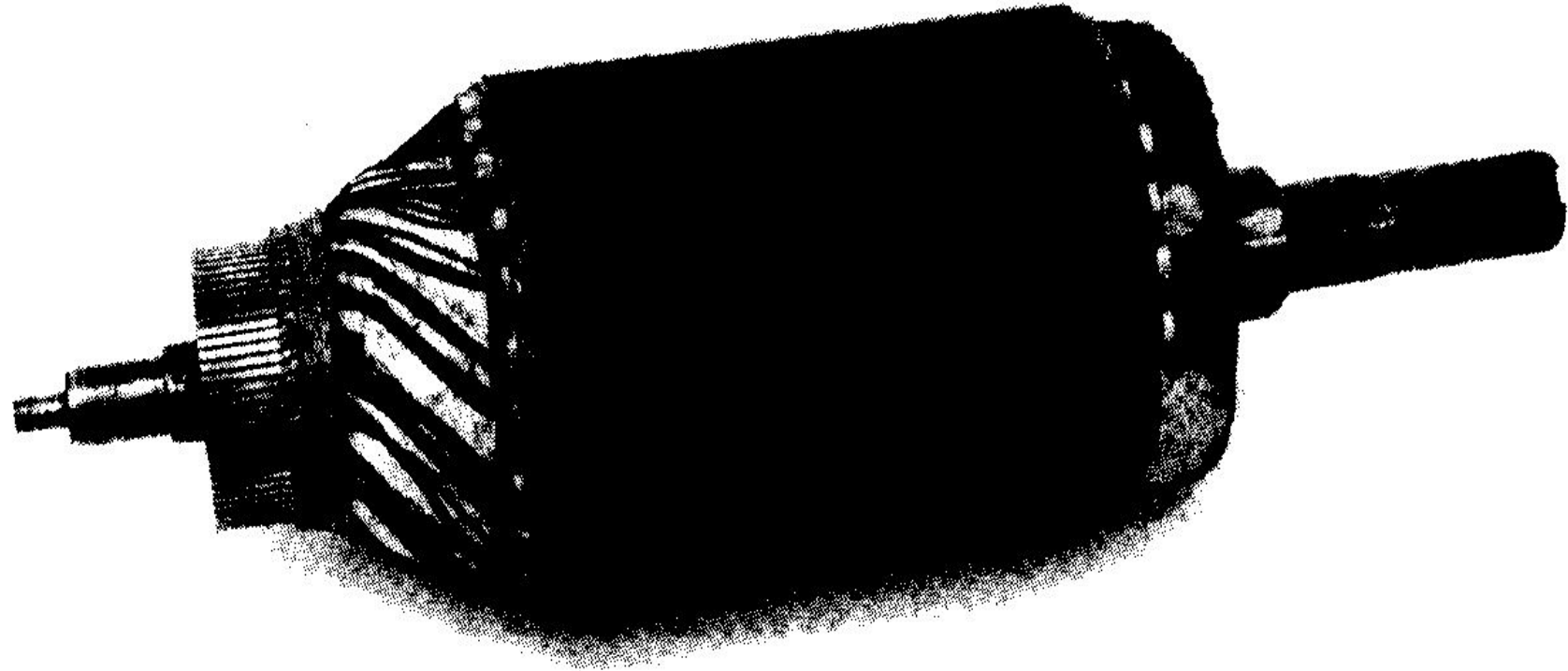
ورقه آرمیچر ساخته شده  
با سوراخهای تهویه



دانشکده مهندسی  
برق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴



شکل ۴-۱۱ آرمیچر یک موتور dc کوچک.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### سیم پیچی آرمیچر

- برای سیم پیچی آرمیچر ماشین dc کوچک، سیم پیچهای چند دوری از هادیهای مسی گرد مورد استفاده قرار می گیرد.
- سیم پیچی آرمیچر ماشین dc معمولاً یک سیم پیچی چند لایه می باشد، و در مورد ماشینهای کوچک این سیم پیچی دو لایه است. به طوریکه سیم پیچی های حلقوی ساده یا موجی ساده را می توان مورد استفاده قرار داد.
- به طور کلی، انتخاب بین دو نوع سیم پیچی در درجه اول، از مقدار جریان در هر مسیر از سیم پیچی آرمیچر تبعیت می کند که عملاً مقدار ماکزیموم 250 آمپر را داراست،



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### کموتاتور

- کموتاتور یک ماشین dc کوچک شامل تعدادی تیغه مسی گوه ای شکل می باشند که از یکدیگر عایق بوده و به هادیهای آرمیچر متصل می شوند.
- تیغه های کموتاتور از مس سخت کشیده یا مس مخلوط با نقره (حدوداً شامل 5 درصد نقره) ساخته شده و با لبه های پهن شده فراهم می گردند تا بتوان هادیهای آرمیچر را لحیم نموده و جوش داد.
- جدا کننده های به کار برده شده جهت عایق نمودن تیغه های کموتاتور از یکدیگر، باید خواص مکانیکی مقاوم و پایداری داشته باشند. این امر بدین علت است که کیفیت کموتاسیون، از بین عوامل مختلف به فاصله صحیح تیغه تا تیغه که قطعاً به ضخامت عایق وابسته است بستگی دارد



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- جدا کننده های به کار برده شده برای این منظور عموماً از ترکیب میکای تجزیه شده - لاک شیشه ای (96 درصد میکا) یا با ترکیب میکای خالص - رزین - اپوکسی (که سامیکانایت نامیده می شود) میباشند.
- . درجه میکای به کار رفته و نوع ماده سخت کننده، سختی و قابلیت ارتجاع جدا کننده را مشخص می نماید.

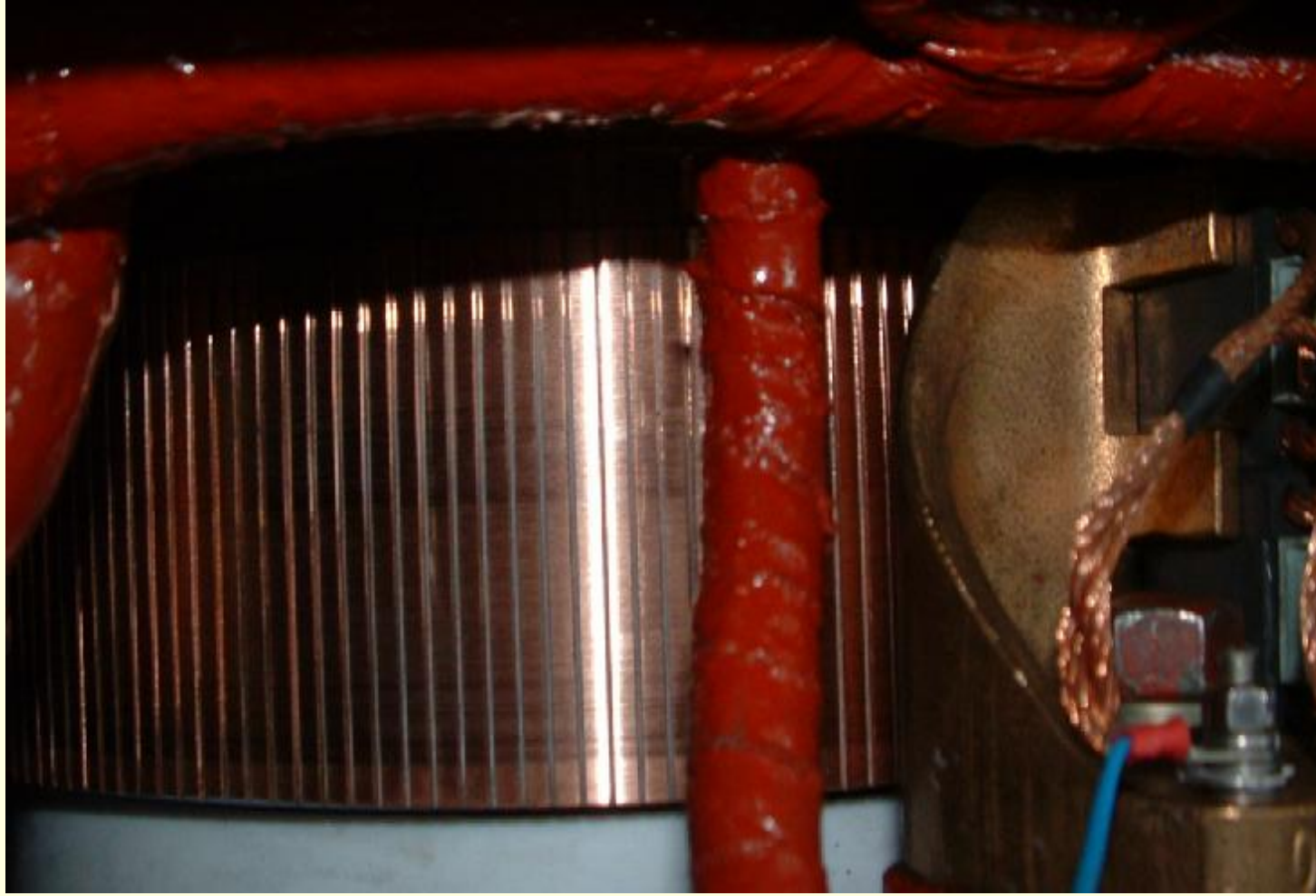


دانشکده مهندسی  
برق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران





## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### لوازم جاروبک

- لوازم جاروبک شامل مجموعه ای از نگهدارنده های جاروبک می باشد که روی یک یوغ با ماده عایقی مناسب سوار شده و جاروبکهای کربنی را با قابلیت هدایت الکتریکی و سختی مناسب در خود جای می دهند.
- نگهدارنده جاروبک در واقع جعبه ای فلزی است که سر و ته آن باز است، با یک فنر قابل تنظیم تجهیز شده و بسیار نزدیک به سطح کموتاتور مستقر می گردد. جاروبک از انتهای نگهدارنده، داخل آن شده و از انتهای دیگر بوسیله یک فنر با فشار در برابر سطح کموتاتور قرار می گیرد.
- جاروبکهای ساخته شده از گرافیت طبیعی ، کربن سخت ، الکتروگرافیت یا متال گرافیت در دسترس هستند



دانشکده مهندسی  
برق

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴



دانشگاه علم و صنعت  
ایران



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- گرافیت طبیعی که یک رزین سخت کننده در سرعت بالا دارای مشخصات مکانیکی خوبی است اما در عوض قابلیت هدایت کمی دارد (ناشی از مقدار رزین موجود).
- قابلیت هدایت پایین موجب افزایش افت ولتاژ اتصال می شود این جاروبکها جهت استفاده در موتورهای کوچک که معمولاً قطبهای کمکی در آنها به کار نرفته است، مناسب می باشند.
- کربن سخت جاروبکهایی سخت اما ارزان را ارائه می نماید. سختی این جاروبکها موجب سائیدگی و فرسودگی نسبتاً زیاد کموتاتور می گردد.
- این جاروبکها اغلب در ماشینهای کسری از اسب بخار و در بعضی از موتورهای دور پائین بزرگتر مورد استفاده قرار می گیرند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- جاروبکهای الکتروگرافیت مقدار سائیدگی پائینی دارند و بنابراین، به طور گسترده در موتورهای صنعتی و کاربردهای حمل و نقل به کار برده می شوند.
- جاروبکهای متال گرافیت قابلیت هدایت بالایی را دارا می باشند که این امر مقدار پائین افت ولتاژ اتصال را موجب می گردد. این نوع جاروبک برای کاربردهای ولتاژ پائین جریان بالا مثل موتورهای استارت اتومبیل مناسب می باشد.
- سه روش جهت به کارگیری جاروبکها در کموتاتور معمول است. این سه روش: شعاعی، شیب موافق و شیب مخالف حرکت کموتاتور می باشند.
- در بیشتر موارد جاروبکها به صورت شعاعی به کار می روند، بدین معنی که خط مرکز آنها منطبق بر شعاع کموتاتور می باشد. این روش، موتوری با عملکرد مشابه در هر دو جهت چرخش را نتیجه می دهد.

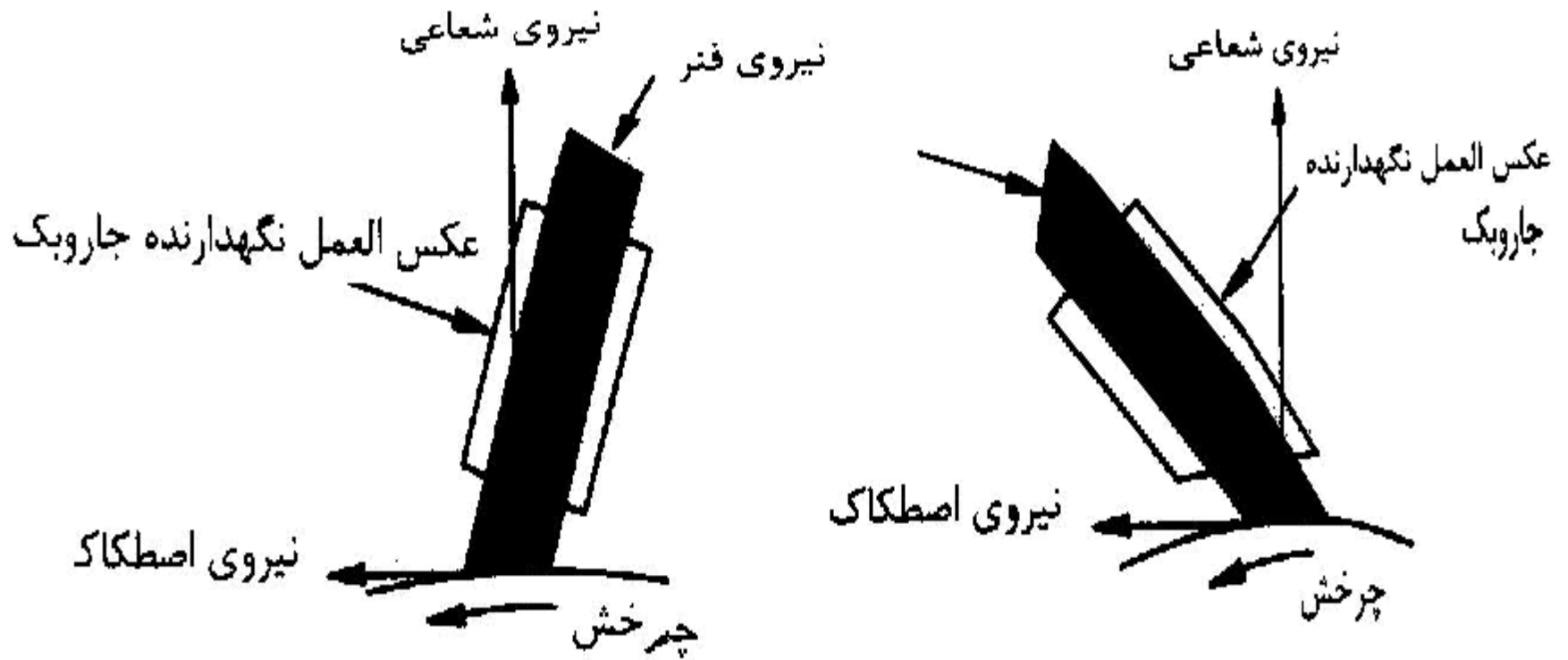


## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- در ماشینهای با سرعت بالا که جهت چرخش غیر قابل تغییر است ممکن است جاروبکها در جهت موافق یا در جهت مخالف حرکت کموتاتور متمایل شوند.
- در آرایش نگهدارنده جاروبک با شیب موافق، زاویه عمودی انحراف در حدود 10-15 درجه می باشد. در این حالت نیروی فنر، اصطکاک و نیروی شعاعی برای تقویت تماس جاروبک به سمت چپ نگهدارنده به هم می پیوندند.
- در آرایش نگهدارنده جاروبک با شیب مخالف، جاروبکها در خلاف جهت حرکت کموتاتور با زاویه ای بین 30-40 درجه از خط قائم منحرف می شوند. در این حالت، نیروی تماس بین سطح جانبی سمت راست جاروبک و سطح جانبی نگهدارنده جاروبک، مخالف نیروی اصطکاک می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



آرایش نگهدارنده جاروبک با شیب موافق

آرایش نگهدارنده جاروبک با شیب مخالف

شکل ۴-۱۵ تثبیت موقعیت جاروبکها.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### محاسبات طراحی

معادله خروجی ماشین dc در اینجا بازنویسی می شود:

$$P_a = C_o D^2 L n$$

$$C_o = \pi^2 B_{av} ac \times 10^{-3}$$

به طوریکه توان آرمیچر ( $P_a$ ) بر حسب KW،  $B_{av}$  بارگذاری مغناطیسی ویژه یا چگالی شار متوسط در فاصله هوایی بر حسب تسلا،  $ac$  بارگذاری الکتریکی ویژه بر حسب آمپر هادی برمتر،  $D$  و  $L$  به ترتیب قطر فاصله هوایی و طول هسته بر حسب  $m$  و  $n$  سرعت بر حسب  $rev/s$  می باشند



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- باید بین توان آرمیچر ( $P_a$ ) و مقادیر نامی توان ماشین تفاوت قائل شد.
- به سبب تلفات مسی میدان سری و آرمیچر و تلفات ناشی از تماس جاروبک از مقدار نامی توان ژنراتور تجاوز می کند.
- برای یک موتور نیز به سبب تلفات مکانیکی و هسته از مقدار نامی توان تجاوز می کند.
- در مرحله طراحی اولیه، توان آرمیچر ممکن است با توان نامی یک موتور برابر فرض شود.
- باید دقت شود که در موتورهای با سرعت بالا، تلفات مکانیکی و هسته مقدار قابل توجهی را دارا می باشند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

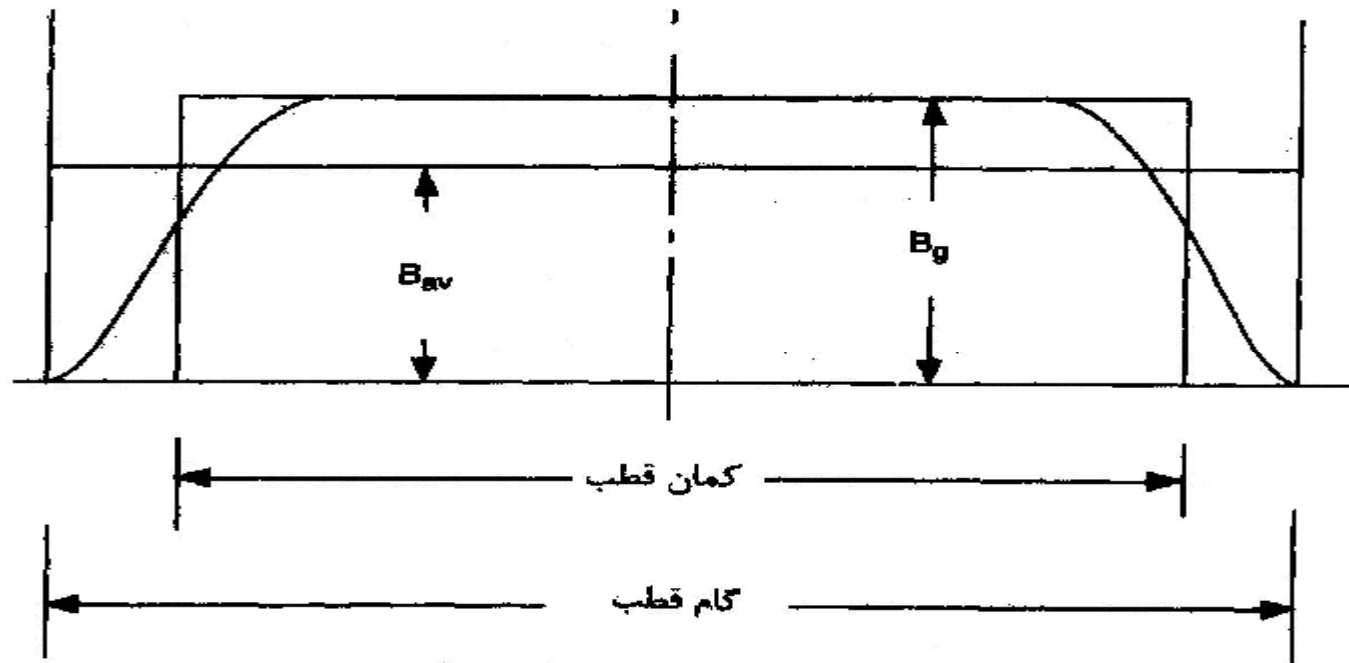
- در بعضی از کاربردها مثل موتورهای استارت اتومبیل، موتورهای طوری طراحی می شوند تا بیش از نیاز توان، ترجیحاً گشتاور را برآورده سازند. ا
- در این موتورها برای اینکه بتوان قطر و طول موتور را تعیین نمود لازم است تا گشتاور سکون آن مشخص شود.

$$T = \left( \frac{\pi}{2} B_{av} ac \right) D^2 L$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- فرض می کنیم که چگالی شار در سرتاسر گام قطبی ثابت و برابر با  $B_{av}$  باشد.
- در حقیقت توزیع واقعی چگالی شار در سراسر گام قطبی از صفر در ناحیه بین قطبها افزایش یافته و در زیر کمان قطب به مقدار ماکزیموم، خود یعنی  $B_g$  میرسد:



شکل ۴-۱۶ چگالی شار فرضی و واقعی قطب.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- نسبت سطح زیر منحنی توزیع شار حقیقی به سطح زیر توزیع مستطیل شکل فرضی، ضریب توزیع میدان،  $K_f$  نامیده می شود.
- میتوان به طور تقریبی  $K_f$  به صورت نسبت کمان قطب به گام قطب فرض شود، بنابراین:

$$B_g = \frac{B_{av}}{y}, \quad y = \frac{\text{کمان قطب}}{\text{گام قطب}}$$

- مقدار  $\psi$  معمولاً بین 0/6 و 0/75 انتخاب میشود.
- عامل محدود کننده اصلی، امانه فقط تنها عامل، در انتخاب مقدار برای چگالی شار فاصله هوایی در یک ماشین dc اشباع هسته و دندانه های آرمیچر می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- در بیشتر موتورهای کوچک این امکان وجود دارد که دندانه های با کناره های موازی مورد استفاده قرار گیرند. اما در هر حال عموماً ماکزیموم چگالی دندانه در پایه دندانه واقع شده و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$B_{tr} = \frac{B_{av} p D}{w_{tr} S}$$

- مقدار چگالی شار فاصله هوایی باید به نحوی انتخاب گردد که پیک چگالی دندانه از  $1/8$  تسلا تجاوز نکند.
- افزایش چگالی شار دندانه به بالاتر از این مقدار موجب اشباع مغناطیسی و افزایش بیش از اندازه mmf و مشکلات طراحی سیستم تحریک میشود.
- تلفات آهنی در دندانه ها با چگالی شار در دندانه ها افزایش می یابد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

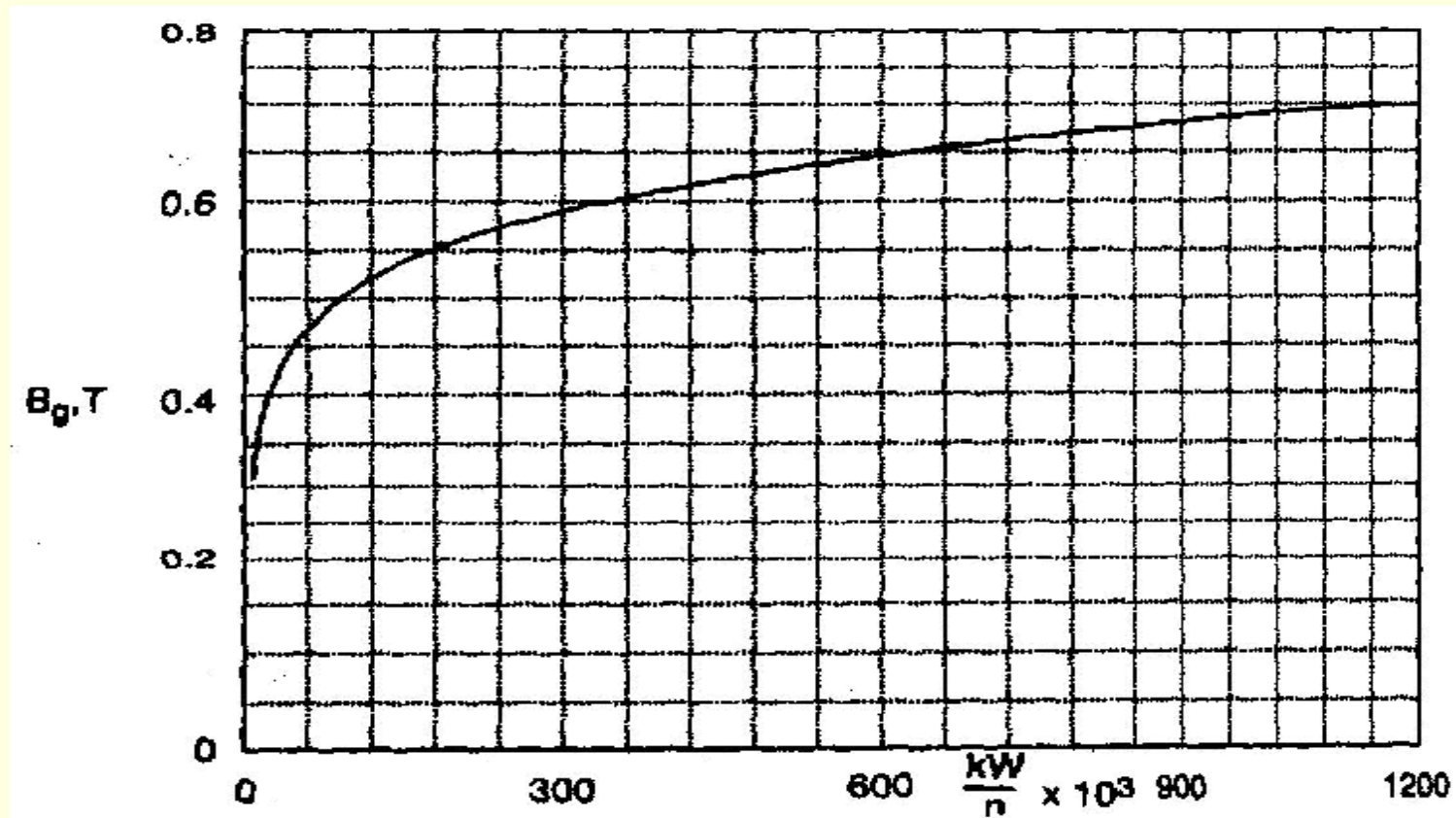
• برای جلوگیری از ایجاد تلفات آهنی بیش از اندازه در آرمیچر، در موتورهای سرعت بالا باید مقادیر کم چگالی شار را مورد استفاده قرار داد:

• مقدار  $B_g$  در ماشینهای dc کوچک بین  $0/3$  و  $0/8$  تسلا متغیر است. مقادیر کمتر مربوط به ماشینهای با ابعاد کوچکتر می باشد.

• مقادیر اولیه را می توان از نمودار مربوطه بدست آورد



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۱۷-۴ چگالی های شار فاصله هوایی برای موتورهای dc کوچک.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### بارگذاری الکتریکی

§ مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه (ac) مربوط به یک ماشین dc به افزایش دمای مجاز، کموتاسیون، راندمان و هزینه ساخت محدود می شود

§ مقدار بالاتر ac افزایش دمای بالاتر سیم پیچی آرمیچر را موجب می شود و بنابراین نیازمند مواد عایقی کلاس بالای گران قیمت تر می باشد.

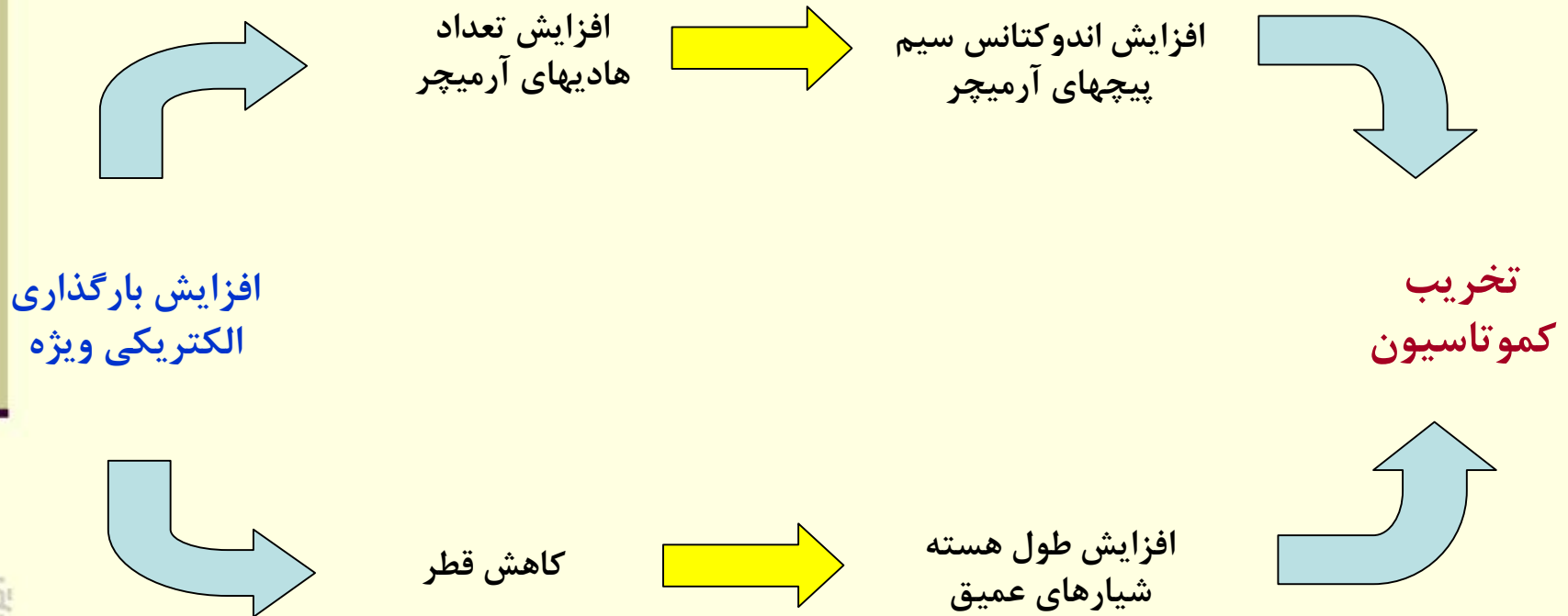
§ برای مثال، مقدار ac در ماشینی که با ماده کلاس F (155 درجه سانتی گراد) عایق بندی شده می تواند حدود 40 درصد بیشتر از حالتی باشد که عایق کلاس A (105 درجه سانتی گراد) مورد استفاده قرار می گیرد.

§ همچنین، نوع محفظه و شیوه خنک سازی به کار گرفته شده، افزایش دمای ماشین و در نتیجه مقدار بارگذاری الکتریکی ویژه مربوط به طراحی را تعیین می نماید.



# طراحی ماشینهای جریان مستقیم

برای ماشینهایی که قطبهای کمکی ندارند، کموتاسیون عامل محدود کننده اصلی در انتخاب بارگذاری الکتریکی ویژه میباشد:



در مورد موتورهای کوچک، ac معمولاً بین 8000 تا 24000 آمپر هادی بر متر است.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ مقادیر  $ac$  جهت طراحی اولیه در ماشینهای با قطب کموتاسیون را می توان از نمودار مربوطه بدست آورد

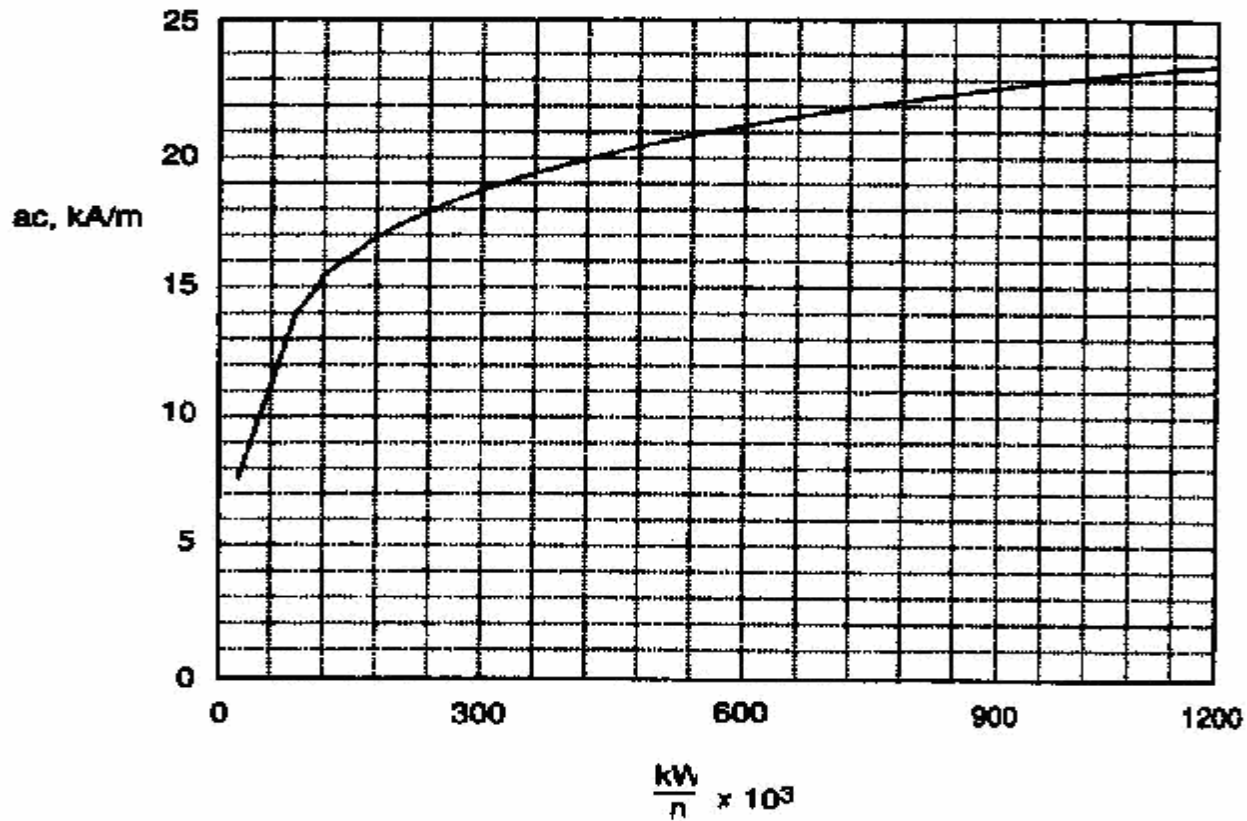
§ مقادیر متوسط در این نمودار برای ماشینهای با عایق کلاس  $B$  ارائه شده اند.

§ مقادیر کمتر را می توان برای ماشین بدون قطب کموتاسیون مورد استفاده قرار داد.

§ باید دقت داشت که مقادیر چگالی شار و  $ac$  هر دو ممکن است به میزان قابل توجهی، در موتورهای که به صورت مقطعی و متناوب کار می کنند افزایش یابد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۱۸-۴ بارگذاری الکتریکی ویژه برای موتورهای dc کوچک



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### تعداد قطبها

§ برخلاف ماشینهای جریان متناوب، یک ماشین dc را می توان برای سرعت یکسان با تعداد قطبهای مختلف طراحی نمود.

§ با این حال، محدوده خیلی کوچکی از تعداد قطبها موجود است که طراحی های مناسب و رضایت بخشی را نتیجه می دهد.

§ به طور کلی، تعداد قطبها باید به گونه ای انتخاب شود که مشخصات طراحی ماشین مطابق با حداقل وزن ماده فعال و کمترین هزینه ساخت باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

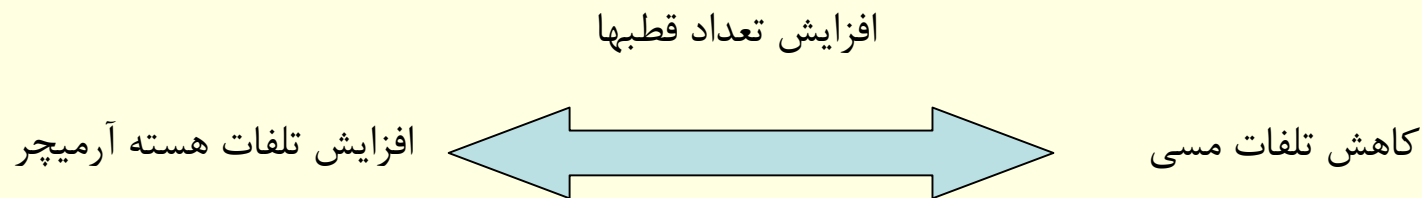
- § عامل محدود کننده اصلی در انتخاب تعداد قطبها، فرکانس شار متقابل در هسته آرمیچر (و جریانها در هادیهای آرمیچر) می باشد که برابر  $pn/2$  است.
- § معمولاً مقدار فرکانس آرمیچر بین ۲۵ تا ۵۰ هرتز انتخاب میشود.
- § در عملکردهای سرعت بالا، که فرکانس حتی با دو قطب نیز بیشتر از ۵۰ هرتز خواهد بود، چگالی شار در دندانه ها و هسته آرمیچر باید در حد پائین نگه داشته شود.
- § افزایش تعداد قطبها برای یک قطر معین باعث کوچکتر شدن گام قطب و کوتاهتر شدن طول اتصالات انتهایی و کاهش تلفات مسی آرمیچر و کاهش وزن مس به کار رفته در سیم پیچی آرمیچر می گردد. گام قطب به صورت زیر تعریف می شود:

$$\tau = \frac{\pi D}{p}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

علاوه بر این، افزایش تعداد قطبها برای یک قطر معین منجر به کاهش ناچیز وزن مس میدان و کاهش قابل توجه آمپر دورهای سیم پیچ میدان می شود. هر دوی این عوامل موجب می شوند تا تلفات مسی میدان کاهش یافته و تهویه سیم پیچهای میدان ساده تر صورت پذیرد.



شار یوغ به طور معکوس با تعداد قطبها متناسب می باشد. بنابراین با افزایش تعداد قطبها این امکان وجود دارد تا در وزن قطعات آهنی صرفه جویی شود.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ اکثر قریب به اتفاق موتورهای dc کوچک با ۲ یا ۴ قطب طراحی می شوند.

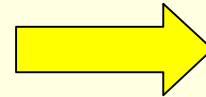
§ معمولاً تعداد قطبها به گونه ای انتخاب میشود که گام قطب کمتر از 380 mm شده و فرکانس در آرمیچر از 50 هرتز تجاوز نکند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

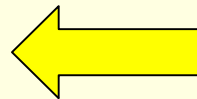
طول و قطر آرمیچر

انتخاب مقادیر مناسب برای  
بارگذاری های الکتریکی و مغناطیسی ویژه



تعیین ضریب خروجی

محاسبه جداگانه  $D$  و  $L$



محاسبه حجم فعال  $D^2L$





## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

محدودیت اصلی در انتخاب قطر آرمیچر سرعت مماسی روتور است. سرعتهای بالاتر از  $30 \frac{m}{s}$  در آرمیچر هزینه ساخت را افزایش داده و مشکلات مربوط به کموتاسیون را در پی خواهند داشت. سرعت مماسی موتورهای dc کوچک باید بین ۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه باشند.

§ آرمیچر با طول زیاد، کاهش نسبت وزن مس غیر فعال به وزن هادیهای فعال را در بر دارد.

§ از سوی دیگر، تهویه ماشینهایی که طول هسته آنها زیاد است مشکل می باشد

§ معمولاً با در نظر گرفتن عوامل مذکور، یک مقدار مناسب برای نسبت طول به گام قطب انتخاب می گردد.



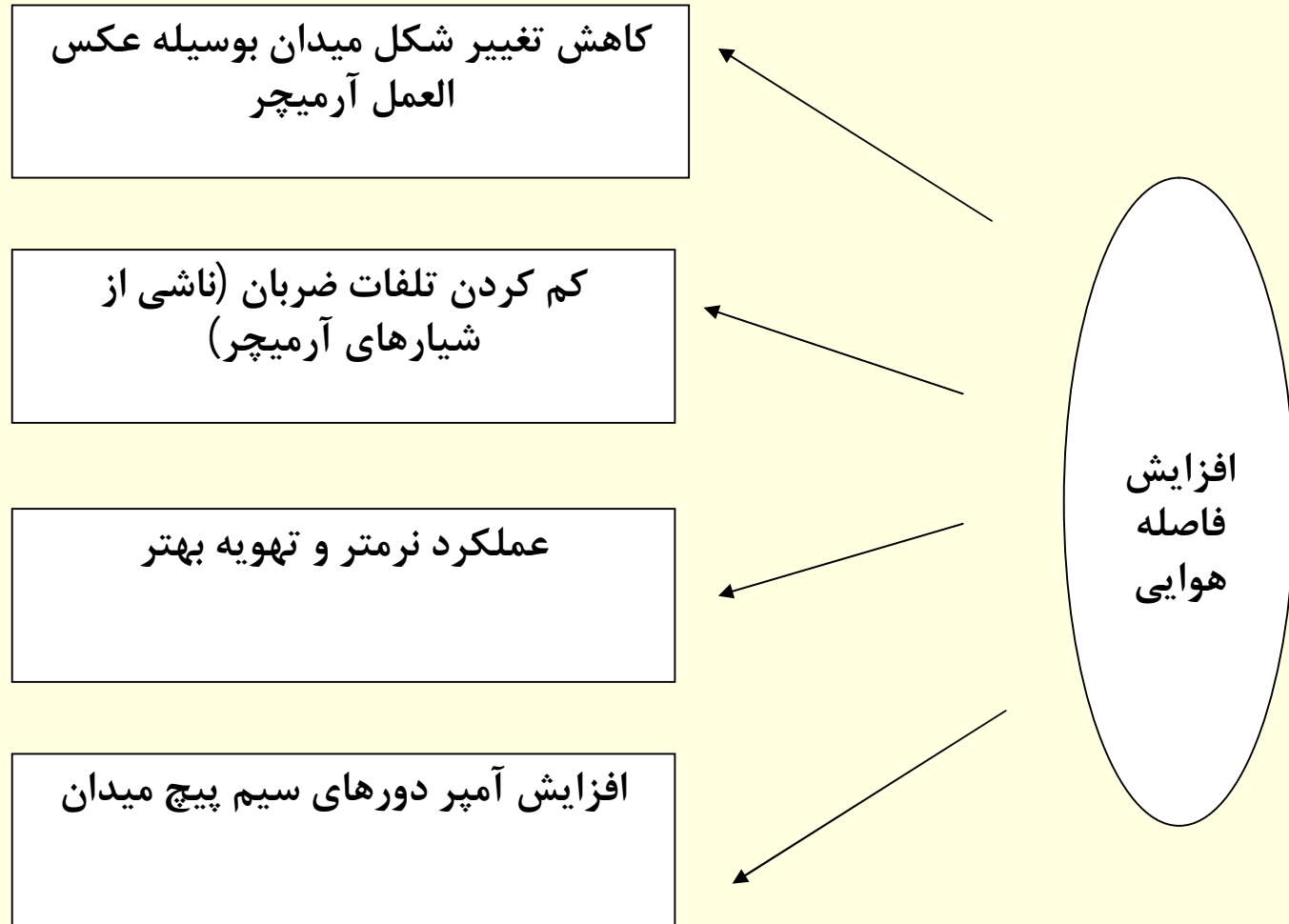
## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ برای موتورهای dc کوچک، نسبت  $L/t$  معمولاً بین ۰/۶ تا ۰/۹ انتخاب میگردد.

§ هنگام طراحی محدوده ای از موتورهای dc، قطر آرمیچر باید به گونه ای انتخاب شود که سایر مقادیر نامی را بتوان با تغییر طول توده هادی بدست آورد.



## گرما و خنک سازی





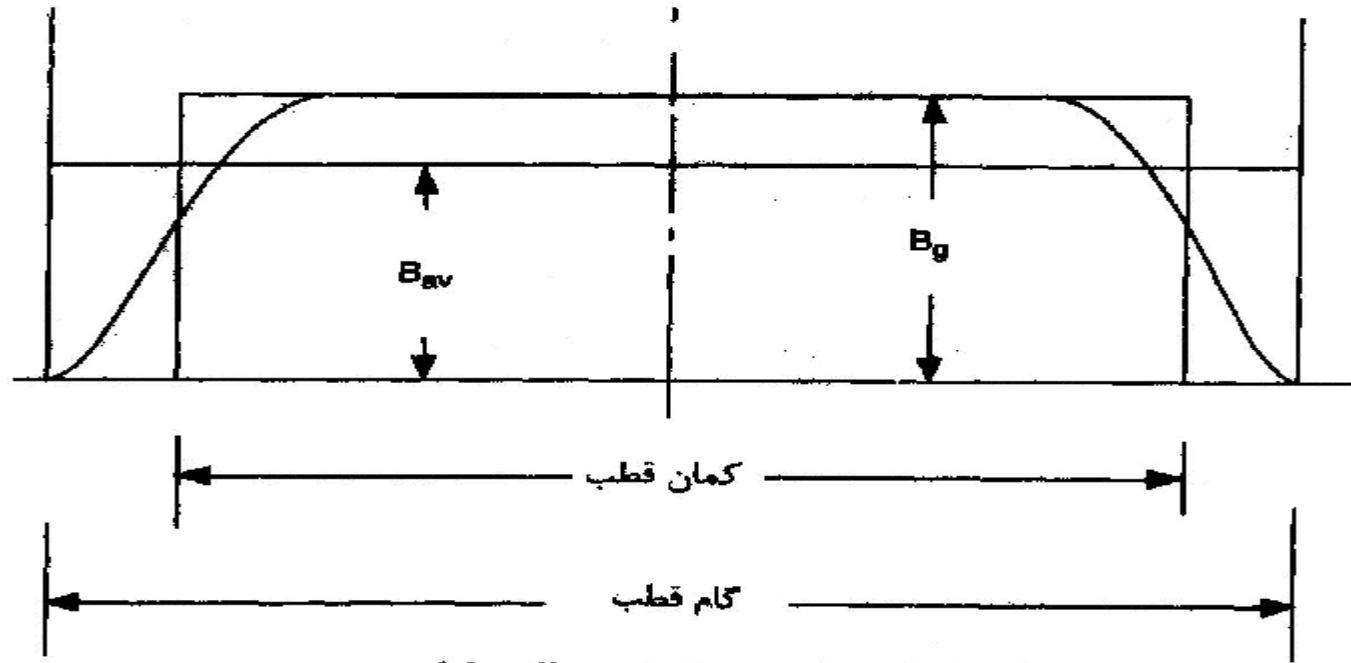
## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

معمولاً طراحی های رضایت بخش و مناسب وقتی بدست می آیند که مقادیر فاصله هوایی بین 1 تا 1/5 درصد گام قطب باشند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

کمو تاسیون خوب زمانی بدست می آید که چگالی شار فاصله هوایی به تدریج از مرکز قطب کاهش یافته و هنگامی که به محور بین دو قطب می رسد به صفر برسد. منحنی توزیع شار فاصله هوایی با تغییرات ناگهانی، مشکلاتی را در کمو تاسیون موجب شده و ممکن است نویز مغناطیسی را تقویت کند.



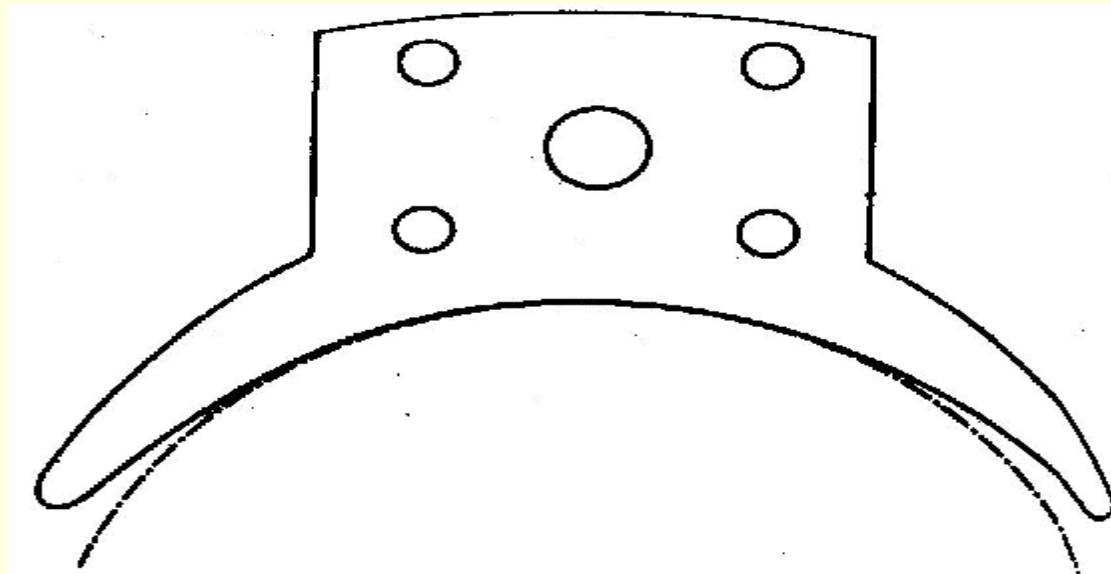
شکل ۴-۱۶ چگالی شار فرضی و واقعی قطب.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ جهت دستیابی به شکل میدان مطلوب، پیشانی قطب باید به شکلی باشد که فاصله هوایی، به تدریج در مسافت بین مرکز قطب تا لبه های قطب افزایش یابد.

§ طول فاصله هوایی در لبه های قطب معمولاً حدود  $1/5$  برابر فاصله هوایی در مرکز قطب است.



شکل ۴-۱۹ مقطع پیشانی قطب



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### سیم بندی آرمیچر

انتخاب سیم بندی آرمیچر برای موتورهای dc کوچک معمولاً حلقوی ساده یا موجی ساده بوده و در بیشتر موارد نوع دوم ترجیح داده می شود.

تعداد هادیها در سیم بندی حلقوی ساده برابر تعداد آنها در سیم بندی موجی ساده است.

مجموع سطح مقطع هادی به کار رفته در سیم بندی موجی ساده برابر سطح مقطع هادی مورد نیاز در سیم بندی حلقوی برای همان ماشین می باشد. استفاده از تعداد کمتر هادیها با سطح مقطع بزرگتر در سیم بندی موجی موجب می گردد تا از سطح شیار بهره برداری بهتری صورت گرفته منجر به کاهش هزینه ساخت گردد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ مزیت آشکار سیم بندی حلقوی، کاهش جریان در مسیرهای موازی است.

§ سیم بندی های حلقوی در بعضی از موتورهای حمل و نقل جهت کاهش اندازه و وزن موتور به کار می روند. ( گام کوتاه)

§ سیم بندی آرمیچر باید مطابق با ماکزیموم ولتاژ بین تیغه های مجاور کموتاتور انتخاب و طراحی گردد تا از تخلیه الکتریکی شدید جلوگیری شود.

§ معمولا ولتاژ بین تیغه های مجاور را تحت شرایط کاری مختلف به  $V 30$  محدود می نمایند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

ماکزیموم ولتاژ بین تیغه های مجاور کموتاتور در حالت بی باری و بارداری برای ماشینهای بدون سیم پیچ جبران کننده به صورت زیر است:

چگالی شار ماکزیموم در فاصله هوایی در حالت بی باری

طول آرمیچر

$$E_c = 2T_c N_c B_g L v_a$$

تعداد دورهای هر سیم پیچ

تعداد سیم پیچهای متصل شده بین تیغه های مجاور

تعداد سیم پیچهای متصل شده بین تیغه های مجاور برای سیم پیچی موجی ساده برابر 1 و برای سیم پیچی حلقوی ساده نصف تعداد قطبها می باشد.

در ماشینهای بدون سیم پیچ جبران کننده، اثر میدان عکس العمل آرمیچر را با افزایش چگالی شار ماکزیموم در فاصله هوایی در حالت بارداری کامل به میزان 25 درصد، در نظر میگیرند



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

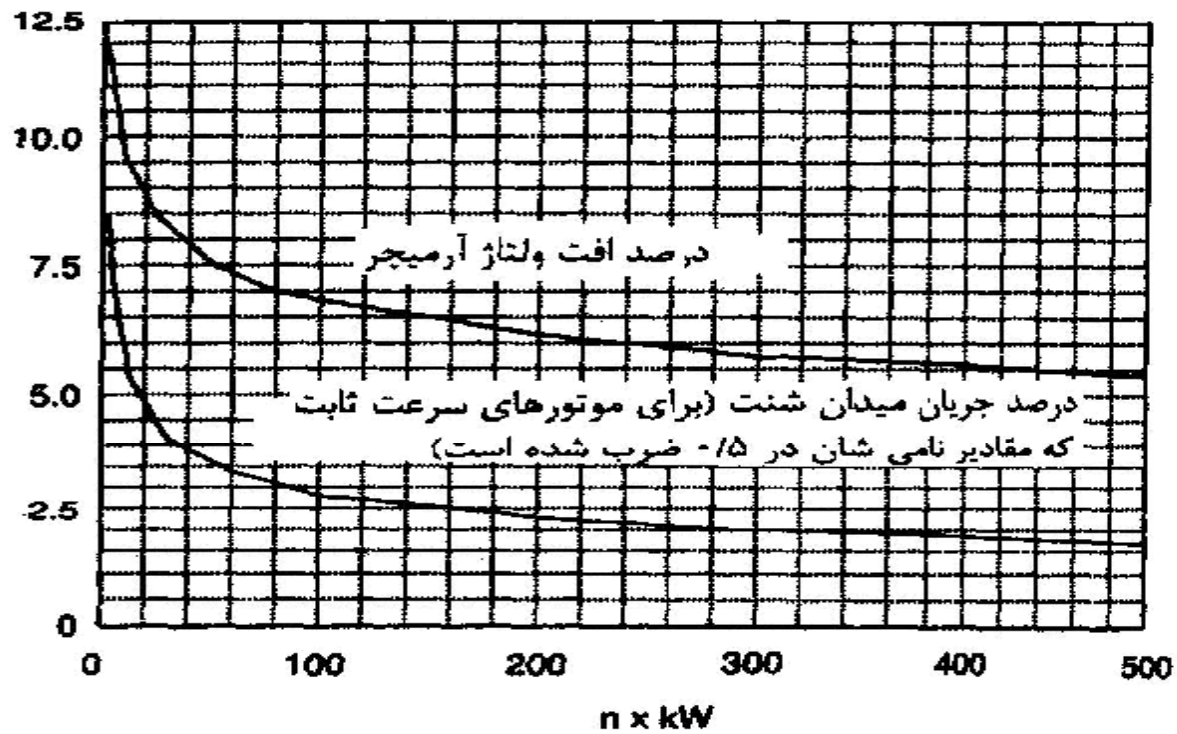
تعداد هادیهای آرمیچر ( $Z$ ) همچنانکه در ذیل آمده، از  $emf$  آرمیچر ( $E$ )، سرعت ( $n$ )، تعداد مسیره‌های موازی ( $a$ )، شار قطب ( $\phi$ ) و تعداد قطبها ( $p$ ) مشخص می‌گردد:

$$Z = \frac{Ea}{\phi np}$$

برای محاسبه  $emf$  آرمیچر در مرحله اولیه طراحی، لازم است تا افت ولتاژ آرمیچر را تخمین بزنیم. این کار ممکن است با ایده گرفتن از شکل ۴-۲۰، انجام گیرد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



جریان میدان شنت و افت ولتاژ مدار آرمیچر تقریبی به ترتیب به صورت درصدی از جریان نامی و ولتاژ ترمینال.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

جریان هر مسیر در سیم پیچی آرمیچر برای موتورهای شنت برابر است با:

$$I_Z = \frac{I_a}{a} = \frac{I - I_f}{a}$$

به طوریکه:  $I_a$  جریان آرمیچر،  $I$  جریان بار کامل موتور و  $I_f$  جریان میدان شنت می باشد.

جریان میدان شنت ممکن است از شکل قبل که در آن  $I_f$  به صورت درصدی از  $I$  داده شده، تخمین زده شود.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

با داشتن جریان تخمین زده شده هادی آرمیچر ( $I_z$ )، مقداری را برای چگالی جریان فرض نموده و سطح مقطع هادی را به صورت زیر محاسبه می‌نمائیم:

$$a_z = \frac{I_z}{\delta_a}$$

§ باید بالاترین چگالی جریان ممکن که یک موتور مطابق مشخصه های طراحی و برطرف نمودن ملاحظات طراحی حرارتی ارائه می‌نماید، انتخاب گردد.

§ این امر نه تنها به صرفه جویی در مس آرمیچر منتهی می‌شود بلکه این امکان را فراهم می‌کند تا شیارهای آرمیچر با عمق کم مورد استفاده قرار گیرد که به کموتاسیون نیز کمک می‌کند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

مقدار چگالی جریان معمول برای موتورهای کاملاً بسته کوچک بین ۳ تا ۷ آمپر بر میلی متر مربع تغییر می کند.

مقادیر بیشتر، برای ماشینهای سرعت بالای تهویه شده با فن مورد استفاده قرار می گیرند. مقدار چگالی جریان باید برای موتورهای با کارکرد دوره ای به طور قابل توجهی افزایش داده شود.

با مراجعه به جدول استاندارد سیمها، سیم مورد نظر انتخاب میگردد. گاهی اوقات، سیمهای دو روکشه مورد استفاده قرار می گیرند که روکش رویی در برابر خراشیدگی و سایش مقاوم می باشد

سیم بندی آرمیچر تقریباً همه موتورهای dc کوچک بر روی دستگاههای سیم پیچ انجام گرفته و سپس به شیارهای از پیش عایق بندی شده انتقال داده می شوند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طول دور متوسط آرمیچر را می توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$L_{ma} = 2L + 2.3t + 5d_s$$

در هر مدار موازی و در دو طرف کلاف در هر دور به تعداد  $\frac{Z}{a}$  هادی وجود دارد. مقاومت آرمیچر  $R_a$  ،  $\frac{1}{a}$  برابر مقاومت هر مدار موازی است.

$$R_a = \frac{Z}{2a} \frac{\rho L_{ma}}{a_z \times 10^{-6}}$$

مقاومت سیم بندی آرمیچر برابر است با:

مقاومت سیم بندی آرمیچر را می توان با استفاده از معادله فوق در یک دمای معین بدست آورد، به طوریکه متناظر با آن دما مقدار مقاومت مخصوص بدست می آید (معمولاً دمای 25 درجه سانتی گراد). مقدار مذکور برای تطابق با دمای عملکرد می بایست تصحیح شود.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### شیارهای آرمیچر

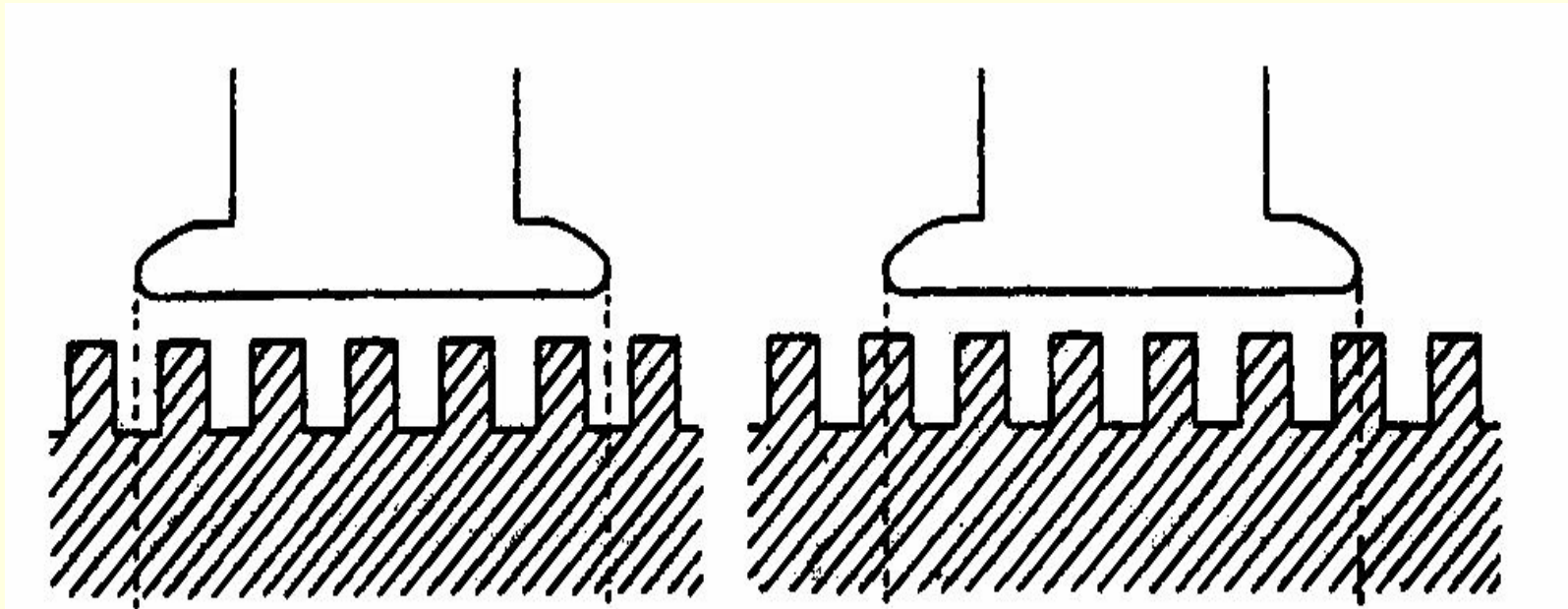
با داشتن مقادیر تقریبی بدست آمده تعداد هادیهای آرمیچر و سطح مقطع آنها، حال لازم است تا هادیها را در شیارهای آرمیچر جای دهیم..

انتخاب تعداد کمتر شیارها موجب صرفه جویی در ماده عایقی خواهد شد. اما این صرفه جویی به بهای کموتاسیون ضعیف تر و ضربان شار بیشتر خواهد بود.

ضربان شار از تغییر رلوکتانس مسیر شار که نتیجه چرخش آرمیچر است ناشی می شود. رلوکتانس فاصله هوایی با وضعیت آرمیچر هنگامی که تعداد شیارهای هر قطب یک عدد صحیح است تغییر می کند. زمانی که آرمیچر می چرخد، شار فاصله هوایی به ضربان درآمده و این ضربان در پیشانی قطب تولید تلفات آهنی نموده و نویز مغناطیسی را افزایش خواهد داد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



شکل ۴-۲۱ تصویری از وابستگی رلوکتانس فاصله هوایی به موقعیت آرمیچر.

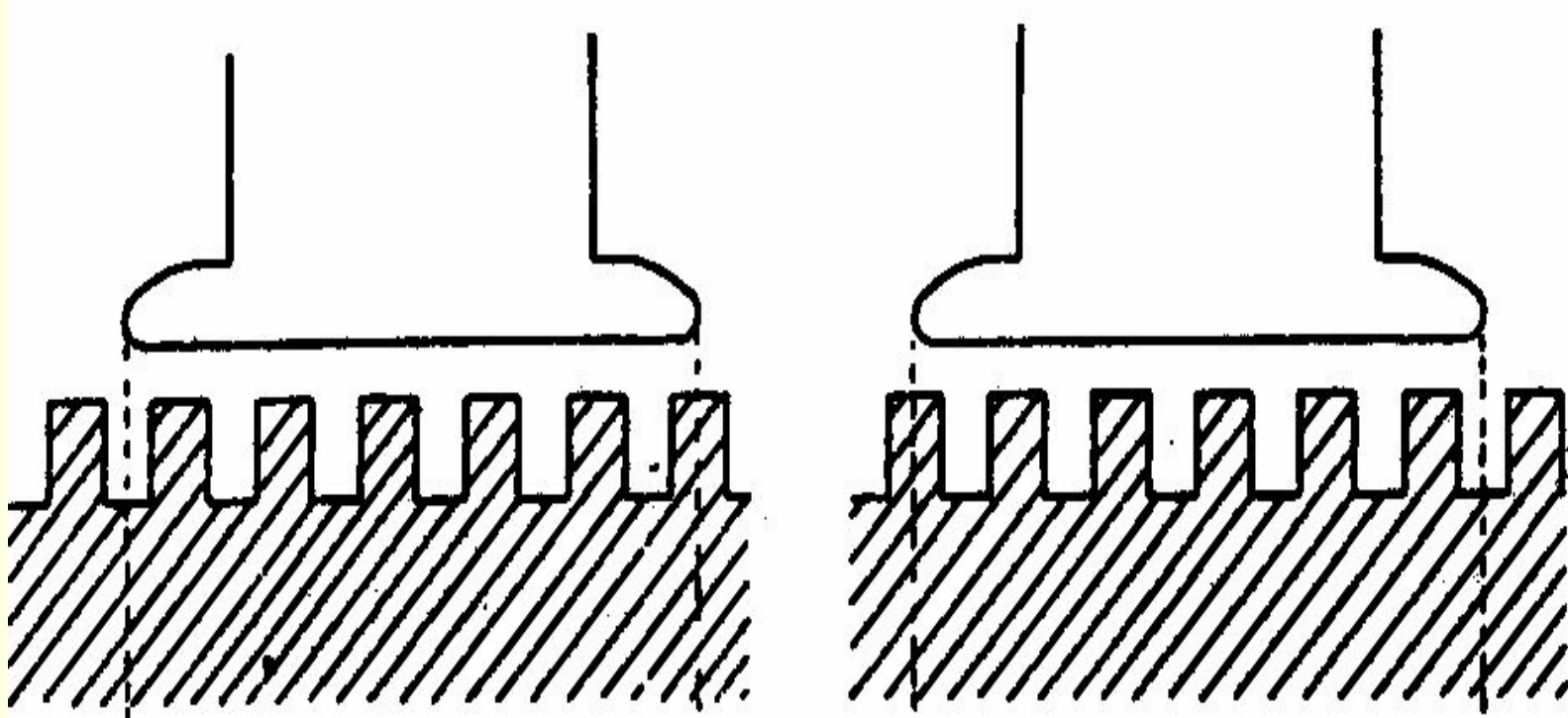


دانشکده مهندسی  
یرق

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴

دانشگاه علم و صنعت  
ایران

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم



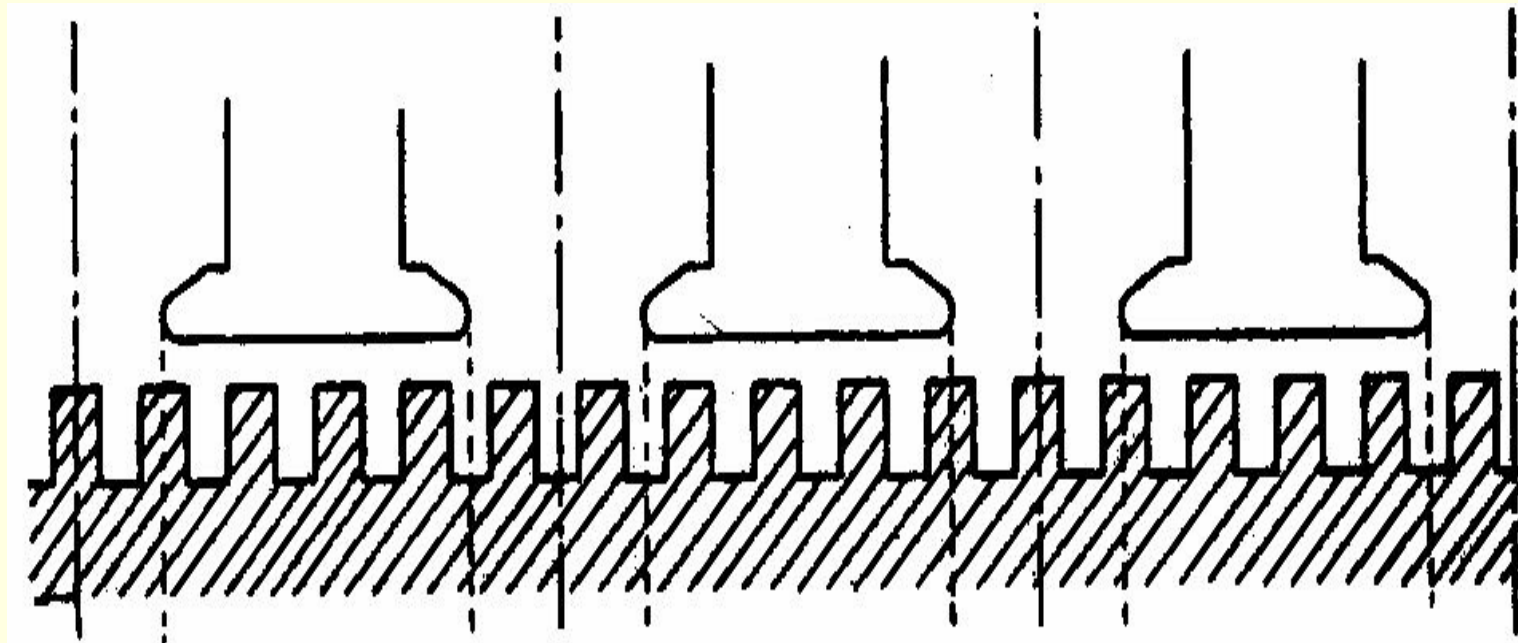
شکل ۴-۲۲



دانشکده مهندسی  
شیراز

## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی ماشینهای الکتریکی / دکتر ابوالفضل واحدی / بهار ۸۴



شکل ۴-۲۳



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

به طور کلی، تعداد شیارهای بین لبه های قطبهای مجاور باید حداقل ۳ تا بوده یا اینکه:

$$(1 - \psi) \frac{S}{p} \geq 3$$

با فرض اینکه  $Y$  بین 0/66 تا 0/7 است، تعداد شیارها باید برابر یا بزرگتر از بین 8/8 تا 10 باشد. برای موتورهای کوچک با قطر آرمیچر کوچک ممکن است استفاده از چنین تعداد زیاد شیار برای هر قطب امکان پذیر نباشد. در این قبیل موارد، شیارهای آرمیچر نیمه بسته مورد استفاده قرار خواهند گرفت. مقدار معمول برای گام شیار در موتورهای dc کوچک بین 15 تا 25 میلی متر می باشد، اما برای بعضی از موتورهای خیلی کوچک ممکن است لازم باشد تا مقدار کمتر از 15 میلی متر مورد استفاده قرار گیرد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ عامل مهم دیگری که هنگام انتخاب تعداد شیارها باید مورد بررسی قرار گیرد، مناسب بودن تعداد شیارها جهت سیم پیچی با توجه به تعداد کل کلافهای سیم پیچی و بازوهای کلاف در هر شیار می باشد.

§ تعداد شیارها باید طوری انتخاب شود که تعداد هادیهای هر شیار یک عدد صحیح زوج باشد. همچنین، تعداد هادیهای هر شیار باید بر تعداد بازوهای کلاف در هر شیار تقسیم پذیر باشد.

§ در حالت سیم بندی حلقوی، تعداد شیارها باید مضربی از تعداد زوج قطبها باشد. این امر موجب تقارن سیم پیچی نسبت به قطبها شده و اجازه استفاده از اتصالات متعادل کننده را می دهد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

پس از تصمیم گیری در مورد تعداد شیارهای آرمیچر، گام شیار (یا دندانه) از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\tau_s = \frac{\pi D}{S}$$

گام شیار طوری متناسب می گردد که شیارهای بدست آمده فضای کافی را برای جای دادن کلافهای سیم پیچ آرمیچر همراه با کل مواد عایق بندی داشته و نیز دندانه به اندازه کافی پهن باشد تا بدون اینکه اشباع شود بتواند شار را حمل نماید. در بیشتر موارد، در موتورهای dc کوچک شیارهای دوزنقه ای مورد استفاده قرار می گیرند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

- در صورتی که از شیارهای عمیق استفاده شود، ولتاژ راکتانس آنها زیاد خواهد بود. بنابراین، عمق شیارهای به کار رفته در موتورهای بدون قطب کمکی، با توجه به بررسی صورت گرفته بر روی پهنای دندانه، حدوداً به 4 برابر ماکزیموم پهنای آن محدود می شود.

- موتورهای با قطر آرمیچر تا 150 میلی متر به ندرت با شیارهایی طراحی می شوند که عمق آنها بیشتر از 22 میلی متر باشد. با این حال ممکن است شیارهای عمیق تر برای ماشینهایی که قطبهای کمکی دارند به کار برده شوند



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### کموتاتور و جاروبکها

تعداد تیغه های کموتاتور یک ماشین dc همیشه با تعداد کلافهای سیم پیچی آرمیچر برابر است. کمترین تعداد تیغه های کموتاتور بوسیله ولتاژ بین تیغه های مجاور که در حالت بی باری نباید بیشتر از ۱۵ ولت باشد، مشخص میشود.

§ قطر کموتاتور معمولاً بین 0/6 تا 0/8 برابر قطر آرمیچر می باشد.

§ به طور کلی، برای مقدار نامی معین، در صورتی که مقدار نامی ولتاژ موتور کاهش یابد قطر کموتاتور بزرگتری مورد نیاز خواهد بود.

§ عوامل دیگری که لازم است هنگام تصمیم گیری در مورد اندازه قطر کموتاتور مورد بررسی قرار گیرند، سرعت مماسی کموتاتور، فاصله بین بازوهای جاروبک و گام تیغه کموتاتور می باشند..



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ سرعت مماسی کموتاتور باید کمتر از  $15 \frac{m}{s}$  نگه داشته شود چرا که سرعت بیشتر شرایط کموتاسیون را بدتر می کند.

§ گرادیان ولتاژ در امتداد محیط کموتاتور باید پائین تر از  $3 V/mm$  نگه داشته شود برای مثال، حداقل فاصله بین بازوهای جاروبک در امتداد سطح کموتاتور برای یک موتور ۲۲۰ ولت باید ۷۴ میلی متر باشد.

§ گام تیغه کموتاتور و ضخامت جاروبک، پهنای ناحیه کموتاسیون و تعداد کلافهای تحمیل کننده کموتاسیون را مشخص می نمایند. در صورتی که گام تیغه کموتاتور کمتر از ۴ میلی متر باشد مشکلات کموتاسیون افزایش می یابد. بنابراین:

$$\beta_c = \frac{\pi D_c}{C} \geq 4 \text{ mm}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

§ ضخامت جاروبک باید به گونه ای انتخاب شود که بتواند دو تا سه تیغه کموتاتور را بپوشاند.

§ مساحت جاروبک باید طوری انتخاب گردد که بیشتر از ۷۰ آمپر جریان از آن عبور نکند.

§ طول کموتاتور از طریق فضای مورد نیاز جهت خواباندن جاروبکها و مساحت بیرونی لازم جهت پراکنده سازی حرارت ایجاد شده توسط تلفات آن، تعیین می گردد.

§ طول کموتاتور موتورهای کوچک معمولاً برابر با مجموع اندازه محوری جاروبک به اضافه 10 تا 25 میلی متر می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات در سطح بیرونی کموتاتور از افت ولتاژ تماس جاروبک / کموتاتور (افت اتصال) و از تلفات اصطکاک ناشی می گردد. مقادیر متوسط افت اتصال جاروبک، چگالی جریان و ضریب اصطکاک برای مواد جاروبک مختلف در جدول ۱-۴ داده شده اند.

| نوع ماده      | افت اتصال (V) | چگالی جریان ( $A/mm^2$ ) | فشار ( $KN/m^2$ ) | ضریب اصطکاک |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-------------|
| گرافیت طبیعی  | 0/7-1/2       | 0/1                      | 14                | 0/1-0/2     |
| کربن سخت      | 0/7-1/8       | 0/065-0/085              | 14-20             | 0/15-0/25   |
| الکترو گرافیت | 0/7 -0/8      | 0/08-0/1                 | 18-31             | 0/1-0/2     |
| متال گرافیک   | 0/4-0/7       | 0/1-0/2                  | 18-21             | 0/1-0/2     |



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات اصطکاک به فشار جاروبک، سرعت مماسی کموتاتور و به ضریب اصطکاک بین کموتاتور و جاروبک وابسته است. ضریب اصطکاک تابعی از سرعت می باشد، هنگامی که سرعت افزایش یابد ضریب اصطکاک کاهش می یابد.:

تلفات اصطکاک را می توان به صورت زیر محاسبه نمود.:

$$W_{bf} = \mu A_B P_b v_c$$

فشار اتصال جاروبک

سرعت مماسی کموتاتور

ضریب اصطکاک جاروبک

سطح تماس همه جاروبکها



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### ابعاد یوغ و قطب

سطح مقطع قطب با ماکزیموم چگالی شار در بدنه قطب محدود می گردد و ارتفاع قطب طوری انتخاب می شود که بتوان کلافهای سیم پیچ میدان را جای داده و به طور مؤثر نیز خنک شوند.

به علت نشت، شار در بدنه قطب بین ۱۰ تا ۲۰ درصد بیشتر از مقدار شاری در نظر گرفته شود که در هر قطب برای تولید  $emf$  آرمیچر مورد نیاز است

چگالی شار در بدنه قطب بین ۱/۲ تا ۱/۸ تسلا در نظر گرفته شوند.

طول محوری قطب را می توان برابر با طول آرمیچر ( $L$ ) فرض کرد و طول ماده فعال و مؤثر قطب مورق ( $l_{pi}$ ) را می توان ۰/۹۵ برابر طول مکانیکی در نظر گرفت. بنابراین:

$$A_p = \frac{f_p}{B_p}$$

$$b_p = \frac{A_p}{l_{pi}}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

mmf میدان و ارتفاع قطب وابسته به هم بوده و هیچیک در این مرحله معلوم نمی باشند. آمپر دورهای مورد نیاز هر قطب جهت عبور شار در قطب و یوغ ممکن است در ابتدا به اندازه 2000 برابر گام قطب تخمین زده شود.

§ ارتفاع قطب، علاوه بر تأثیرگذاری روی mmf قطب، طراحی سیم پیچ میدان را نیز از نظر خنک سازی تحت تأثیر قرار می دهد.

§ در صورتی که ارتفاع قطب بیشتر از حد معینی افزایش یابد، اندازه موتور به صورتی غیر ضروری افزایش خواهد یافت.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

ارتفاع قطب ممکن است برای قطبهای مستطیل شکل بین 1 تا 1/5 برابر پهناى بدنه قطب در نظر گرفته شود.

اگر قطبهای دوار یکپارچه مورد استفاده قرار گیرند، ارتفاع قطب را می توان برابر با نصف قطر سطح مقطع قطب فرض کرد.

$$\phi_y = \frac{\phi_p}{2}$$

در مرحله اولیه طراحی فرض می کنیم :

عمق یوغ سپس با در نظر گرفتن مقداری برای چگالی شار یوغ بدست می آید. چگالی شار یوغ برای فولاد ریخته 1/2 تسلا و برای یوغ های مورق بین 1/5 تا 1/6 تسلا در نظر گرفته شود. بنابراین:

$$d_y = \frac{\phi_p}{2B_y l_{iy}}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### طراحی سیم بندی میدان

قبل از اینکه بتوانیم سیم پیچی میدان را طراحی کنیم،  $mmf$  قطب باید مشخص باشد. با فرض مقادیر مناسب چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور، آمپر دورهای میدان را می توان محاسبه نمود.

به طور کلی:

ضخامت سیم پیچ میدان نباید از 40 تا 50 میلی متر تجاوز نماید.

چگالی جریان هادی سیم پیچی میدان بین  $1/2$  تا  $2/5$  آمپر بر میلی متر مربع در نظر گرفته شود.

تلفات مجاز در سطح بیرونی سیم پیچی میدان بین 500 تا 750 وات بر متر مربع فرض شود.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طول دور متوسط سیم پیچی میدان برابر است با:

$$l_{fc} = 2(l_p + 2b_{fc} + b_p)$$

توان تلف شده از سطح سیم پیچ میدان در هر متر از ارتفاع سیم پیچ که از سطوح بالایی و پائینی خارج می گردد، برابر است با:

$$p_f = 2l_{fc} p_f \quad w / m$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

حال فرض می کنیم ضریب اشغال مس در سیم پیچی میدان بین 0/4 تا 0/65 باشد به طوریکه مقدار کمتر برای هادیهای با سطح مقطع کوچک می باشد. حجم مس در واحد طول ارتفاع سیم پیچ میدان برابر است با:

$$v_{cf} = b_{fc} l_{fc} f_{cf} \quad m^3 / m$$

حجم مس در واحد ارتفاع سیم پیچ میدان را می توان بر حسب تعداد دورها در واحد ارتفاع ، سطح مقطع هادی و طول دور متوسط سیم پیچ میدان به صورت زیر بیان نمود:

$$v_{cf} = n_{fc} \left( a_{fc} \times 10^{-6} \right) l_{fc} \quad m^3 / m$$

جریان میدان برابر است با:

$$I_f = \delta_{fc} a_{fc}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

مقاومت برابر است با:

$$R_n = \frac{\rho n_{fc} l_{fc}}{a_{fc} \times 10^{-6}} \quad \Omega / m$$

تلفات مسی تولید شده باید با توان تلف شده از سطح سیم پیچ در هر متر از ارتفاع سیم پیچ برابر باشد. بنابراین:

$$2l_{fc} p_f = \delta_{fc}^2 a_{fc}^2 \frac{\rho n_{fc} l_{fc}}{a_{fc} \times 10^{-6}}$$

با استفاده از معادلات مربوطه و بازنویسی آنها:

$$2l_{fc} p_f = \delta_{fc}^2 \rho b_{fc} l_{fc} f_{cf} \times 10^{12}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

چگالی جریان در هادی میدان برابر خواهد بود با:

$$\delta_{fc} = \sqrt{\frac{2p_f \times 10^{-12}}{\rho b_{fc} f_{cf}}}$$

آمپر دورها در هر متر از ارتفاع سیم پیچ میدان برابر است با:

$$\frac{AT_{fl}}{h_f} = I_f \frac{b_{fc} f_{cf}}{a_{fc} \times 10^{-6}} = \delta_{fc} b_{fc} f_{cf} \times 10^6$$

معادله را می توان جهت بدست آوردن ارتفاع سیم پیچ میدان به صورت زیر دوباره مرتب نمود:

$$h_f = \frac{AT_{fl}}{\delta_{fc} b_{fc} f_{cf} \times 10^6}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

با جاگذاری مقدار چگالی جریان هادی داریم:

$$h_f = AT_{fl} \sqrt{\frac{\rho}{2p_f b_{fc} f_{cf}}}$$

ارتفاع قطب ، جدای از ارتفاع کفشک قطب ، باید اندکی بزرگتر (بین 5 تا 10 درصد گام قطب) از ارتفاع سیم پیچ میدان در نظر گرفته شود.

در موتورهای کمپوند حدود 20 درصد فضای سیم پیچی به سیم پیچی میدان سری اختصاص داده می شود.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

مقاومت سیم پیچی میدان برابر است با:

$$R_f = \frac{V_f}{I_f} = p N_f \frac{\rho l_{fc}}{a_{fc} \times 10^{-6}}$$

سطح مقطع هادی میدان شنت برابر است با:

$$a_{fc} = \frac{p I_f N_f \rho l_{fc}}{V_f \times 10^{-6}} = \frac{p A T_{fl} \rho l_{fc}}{V_f \times 10^{-6}} \quad \text{mm}^2$$

برای بدست آوردن تعداد آمپر دورهای هر قطب داریم:

$$I_f N_f = \frac{V_f a_{fc} \times 10^{-6}}{p \rho l_{fc}}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

از آنجاکه تعداد دورها در هر قطب روی سیم پیچ میدان تعیین کننده گرما می باشد، لازم است تا در این مرحله تلفات را در واحد سطح از سیم پیچی میدان محاسبه و آن را با مقادیر مجاز بین 500 تا 750 وات بر متر مربع مقایسه کنیم.

مساحت کل سطح بیرونی خنک کننده برای  $p$  تعداد قطب به طور تقریبی برابر است با:

$$A_{sf} = 2(l_{fc} + b_{fc})h_f p$$

و توان تولید شده در واحد سطح عبارتست از:

$$p_f = \frac{I_f^2 R_f}{A_{sf}} \leq 500 \text{ تا } 750 \text{ W/m}^2$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### میدان سری

mmf ای که توسط میدان سری در بار کامل ایجاد می شود معمولاً بین 15 تا 25 درصد mmf آرمیچر می باشد. تعداد دورهای میدان سری به راحتی با تقسیم آمپر دورهای آن به مقدار جریان آرمیچر مشخص می گردد. سطح مقطع هادی نیز با در نظر گرفتن مقدار چگالی جریان بین 2 تا 3 آمپر بر میلی متر مربع تعیین می شود.

### قطبهای کمکی

تقریباً همه موتورهای dc بالاتر از 0/75 کیلووات با قطبهای کمکی ساخته می شوند. برای سیم پیچی کمکی در موتورهای dc کوچک هادیهای مسی گرد به کار می روند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

پهنای قطب کمکی باید برابر با پهنای ناحیه کموتاسیون باشد، ممکن است جهت تورم شار در لبه های قطب کمکی تغییراتی بین 1/5 تا 2 برابر فاصله هوایی زیر قطب کمکی را لحاظ نمود. پهنای ناحیه کموتاسیون برای موتورهای سیم پیچی موجی برابر است با:

$$w_c = \frac{D}{D_c} \left[ \left( \frac{u}{2} - \frac{a}{p} \right) \beta_c + (w_b - w_m) \right]$$

همچنین پهنای قطب کمکی باید طوری انتخاب گردد که شار نشتی زیاد نباشد. برای جلوگیری از نشتی زیاد، پهنای قطب کمکی نباید از نیمی از فضای بین لبه های قطب مجاور تجاوز نماید. بنابراین

$$w_{ip} \leq \frac{1 - \psi}{2} \tau$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

در یک قطب کمکی باریک، ضربانهای شار که توسط شیارهای آرمیچر ایجاد می شوند، بزرگ خواهند بود. پهنای قطب کمکی باید از  $1/5$  برابر گام دندان بزرگتر بوده و در صورت امکان، باید مضربی از گام دندان باشد. بنابراین:

$$w_{ip} \leq 1/5 \tau_s$$

فاصله هوایی زیر قطب کمکی در حالت کلی بین یک تا دو برابر فاصله هوایی زیر قطب اصلی است.

آمپر دورهای روی قطب کمکی معمولاً بین  $1/2$  تا  $1/3$  برابر آمپر دورهای آرمیچر می باشند. بنابراین:

$$AT_{ip} = (1/2 \text{ to } 1/3) \times \frac{I_z Z}{2p}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تعداد دورهای قطب کمکی برابر است با:

$$N_{ip} = \frac{AT_{ip}}{I_a}$$

چگالی جریان در سیم پیچی کموتاسیون، ممکن است بین  $1/2$  تا  $2/5$  آمپر بر میلی متر مربع در نظر گرفته شود. سپس سطح مقطع هادی به صورت زیر بدست می آید:

$$a_{ip} = \frac{I_a}{\delta_{ip}} \text{ mm}^2$$

طول دور متوسط سیم پیچ میدان کموتاسیون، را می توان برحسب پهنای قطب کمکی، طول محوری آن و ضخامت سیم پیچ، مطابق با روش مشابه به کار رفته برای سیم پیچ میدان شنت بدست آورد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

مقاومت کلی سیم پیچی میدان کموتاسیون برابر است با:

$$R_{ip} = \frac{\rho l_{ic} N_{ip}}{a_{ip} \times 10^{-6}} p$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### تلفات و راندمان

تلفات در موتور dc عبارتند از:

§ تلفات مسی در سیم پیچی های میدان و آرمیچر.

§ تلفات اتصال جاروبک.

§ تلفات آهنی یا هسته در دندانه ها و بدنه هسته آرمیچر.

§ تلفات رئوستای آرمیچر و میدان (در صورت وجود).

§ تلفات مکانیکی ناشی از اصطکاک (یاتاقانها و جاروبکها) و بادخوری.

§ در استاندارد IEC پیشنهاد شده که برای تلفات اضافی نظیر تلفات جریان گردابی در هادیهای آرمیچر، تلفات در جاروبکها ناشی از کموتاسیون و ..... را برای موتورهای جبران سازی نشده و جبران سازی شده به ترتیب برابر با 1 درصد و 0/5 درصد توان ورودی نامی در نظر گرفته شوند



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

براساس استانداردهای بین المللی، تلفات مسی باید برای همه نوع سیم بندی ها در دمای 75 درجه سانتی گراد برای کلاسهای A، E و B و در دمای 110 درجه سانتی گراد برای کلاسهای F و H، برای تمام بارها محاسبه شود.

تلفات مسی آرمیچر برابر است با:

$$W_a = I_a^2 R_a$$



### تلفات اتصال جاروبک

استانداردهای IEC پیشنهاد می کنند که افت کل در اتصال جاروبک برای جاروبکهای کربنی و گرافیتی، 2 ولت فرض شود. مقدار پیشنهادی افت ولتاژ کل برای جاروبکهای متال گرافیت 0/6 ولت می باشد. بنابراین، بسته به نوع جاروبکهای به کار رفته، تلفات اتصال جاروبک برابر است با:

$$W_b = (2 \text{ یا } 0/6) I_a$$

### تلفات هسته

در حالت کلی چگالی شار هسته و دندانه های آرمیچر مشابه نمی باشد و باید تلفات هسته آنها را جداگانه محاسبه نمود. این مقادیر باید به فرکانس برگشت شار در آرمیچر (یا) تبدیل شود.

البته باید توجه داشت که همیشه هنگام محاسبه وزن دندانه های آرمیچر، پهنای متوسط دندانه مورد استفاده قرار می گیرد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات مسی میدان کموتاسیون

تلفات مسی در سیم پیچ میدان کموتاسیون با مربع بار تغییر می کند و به صورت زیر ارائه می شود:

$$W_i = I_a^2 R_{ip}$$

تلفات مسی میدان کموتاسیون

$$W_f = I_f^2 R_f$$

و تلفات مسی میدان شنت برابر است با:



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

وزن دندانه های آرمیچر بر حسب کیلوگرم برابر است با:

$$G_t = S w_t l_{ia} d_s \gamma$$

وزن هسته آرمیچر بر حسب کیلوگرم برابر است با:

$$G_C = \frac{\pi}{4} [(D - 2d_s)^2 - D_i^2] l_{ia} \gamma$$

تلفات آهنی کل با ضرب کردن مجموع تلفات هسته و دندانه های آرمیچر (ناشی از شار فرکانس اصلی) در ضریبی که عموماً بین 1/5 تا 3 می باشد، بدست می آید. این ضریب باید برای موتورهای مشابه از طریق داده های تجربی تعیین گردد. هنگامی که چنین داده هایی قابل دستیابی نیست، ضریب 2/5 را می توان مورد استفاده قرار داد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### تلفات اصطکاک جاروبک

داده های تجربی بدست آمده از تعداد زیادی از ماشینها نشان می دهد که تلفات اصطکاک جاروبک به طور تقریبی برابر است با:

$$W_{bf} = 2400 A_B V_C$$

برای جاروبکهای کربنی و گرافیتی

$$W_{bf} = 1500 A_B V_C$$

برای جاروبکهای گرافیت کربنی:

### تلفات بادخوری و اصطکاک یاتاقان

تلفات بادخوری به سرعت مماسی روتور، به ابعاد روتور و به ساختار ماشین وابسته است.

تلفات بادخوری و اصطکاک یاتاقان عموماً از هم تفکیک نمی شوند و از آزمایشهایی که روی ماشینهای مشابه صورت می گیرد،

در مورد یک ماشین dc کوچک، تلفات بادخوری و اصطکاک یاتاقان را بر اساس در صدی از توان خروجی در نظر میگیرند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### مثالی از یک طراحی

مسئله طراحی یک موتور dc با سرعت ثابت و مقادیر نامی  $2700 \text{ rev/min}$ ،  $5/1 \text{ kW}$  و  $110 \text{ V}$  را مورد بررسی قرار دهیم.

ابعاد اصلی

$$n = \frac{N(\text{rev / min})}{60} = \frac{2700}{60} = 45 \text{ rev / s}$$

$$\frac{\text{kw output}}{n} \times 10^3 = \frac{1/5}{45} \times 10^3 = 33/3$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

از منحنیهای مربوطه میتوان می توانیم به ترتیب  $B_g$  و  $ac$  را بدست آوریم:

$$B_g = 0.42 \text{ T} \quad \text{و} \quad ac = 9 \text{ KA/m}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

فرض می کنیم نسبت کمان قطب به گام قطب  $0/7$  باشد، چگالی متوسط فاصله هوایی  $0/294T$  خواهد بود. سپس ضریب خروجی محاسبه می شود:

$$C_o = \pi^2 \times 0/294 \times 9000 \times 10^{-3} = 26/11$$

سپس حاصل ضرب قطر و طول محاسبه خواهد شد.

$$D^2 L = \frac{P_a}{C_o n} = \frac{1/5}{26/11 \times 45} = 1/276 \times 10^{-3} \quad m^3$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

با فرض اینکه نسبت طول به قطر هسته  $1/3$  باشد خواهیم داشت:

$$D = 100 \text{ mm} \quad \text{و} \quad L = 128 \text{ mm}$$

حال لازم است تا نسبت طول هسته به گام قطب و سرعت مماسی آرمیچر را امتحان کنیم. سرعت روتور  $45 \text{ rev/s}$  می باشد، در صورتی که تعداد قطبها را بیشتر از 2 انتخاب کنیم، فرکانس آرمیچر و همچنین تلفات هسته آن زیاد خواهد شد. با انتخاب یک ماشین دو قطبی، گام قطب برابر است با:

$$\tau = \frac{\pi D}{p} = \frac{\pi \times 100}{2} = 157 \text{ mm}$$

$$\frac{L}{\tau} = \frac{128}{157} = 0.82$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

که در داخل محدوده (0/5 تا 0/9) که در بخش 4-3-4 بالا ارائه گردید قرار دارد. سرعت مماسی آرمیچر برابر است با:

$$D = 100 \text{ mm} \quad \text{و} \quad L = 128 \text{ mm}$$

حال لازم است تا نسبت طول هسته به گام قطب و سرعت مماسی آرمیچر را امتحان کنیم. سرعت روتور 45 rev/s می باشد، در صورتی که تعداد قطبها را بیشتر از 2 انتخاب کنیم، فرکانس آرمیچر و همچنین تلفات هسته آن زیاد خواهد شد. با انتخاب یک ماشین دو قطبی، گام قطب برابر است با:

$$v_a = \pi D n = \pi \times 0.1 \times 45 = 14.14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

که در داخل محدوده مشخص شده 8 تا 25 m/s قرار دارد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طراحی آرمیچر

شار متوسط در هر قطب برابر است با:

$$\phi = B_{av} \tau L = 0.294 \times 0.157 \times 0.128 = 5/9 \text{ mWb}$$

برای موتورها، ولتاژ بی باری (emf القاء شده مدار باز) برابر ولتاژ ترمینال می باشد. از آنجا که در این مرحله به برآورد سرعت بی باری نیاز داریم، سرعت بی باری را  $2800 \text{ rev/min}$  (یا  $67/46 \text{ rev/s}$ ) فرض می کنیم. بنابراین تعداد کل هادیهای آرمیچر از معادله (4-8) محاسبه می شود:

$$Z = \frac{E_a}{\phi n_p} = \frac{110 \times 2}{5/9 \times 10^{-3} \times 46/67 \times 2} = 399$$

به طوری که سرعت بی باری است. اگر چه ما هنوز در مورد نوع سیم بندی آرمیچر تصمیم گیری نکرده ایم اما تعداد قطبها برابر 2 می باشد، تعداد مسیرهای موازی نیز در هر صورت چه سیم بندی حلقوی یا موجی ساده انتخاب شود، برابر 2 خواهد بود. ولتاژ القاء شده در هر هادی برابر است با:



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

$$e_c = \phi n_o = 5/9 \times 10^{-3} \times 46/67 = 0/275 \text{ V}$$

از آنجا که این مقدار بدست آمده، بسیار اندک می باشد سیم بندی موجی ساده را که ارجحیت دارد می توان مورد استفاده قرار داد.

تعداد شیارهای بین لبه های قطب باید حداقل 3 باشد. بنابراین، با تعداد شیارهای برابر یا بزرگتر از 20 می توان این شرط را برآورده ساخت. از طرفی تعداد فرد شیارها موجب می شود شیارهای هر قطب برابر مجموع یک عدد کامل به اضافه شود، که ضربانهای شار در فاصله هوایی را کاهش می دهد. لذا این شرایط با تعداد فرد شیارهای برابر یا بزرگتر از 21 برآورده می شود.

در انتخاب ورقه ها باید حتی الامکان ورقه های موجود را مورد استفاده قرار داد. در این مورد فرض می کنیم ورقه های با قطر **100 mm**، و با تعداد 16، 27 یا 36 شیار موجود باشند. اگر چه ما فقط به 21 شیار نیاز داریم اما اقتصادی تر آن است که ورقه های موجود با تعداد شیارهای بیشتر را مورد استفاده قرار دهیم. بدیهی است که این کار هزینه عایق بندی شیار را افزایش خواهد داد اما هزینه ابزار کاری ورقه های جدید را حذف می نماید. حتی در صورتی که ورقه های با قطر دقیقاً دلخواه و مورد پسند ما وجود نداشته باشد، باید نزدیکترین اندازه ورقه ها را استفاده نموده و بر طبق آن طول توده را تنظیم نماییم.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

ورقه ۲۷ شیاره در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. مساحت شیار آن ، عمق هسته mm 6/16، پهنای دندانه mm 5/3 و عمق شیار (همراه با دهانه‌های شیار) mm 9/20 می باشد. تنها در صورتی می توانیم این ورقه ها را مورد استفاده قرار دهیم که چگالی شار در دندانه ها کمتر از مقدار اشباع باشد، تعداد هادیهای هر شیار را می توان بدون ایجاد تغییر اساسی در بارگذاری الکتریکی ویژه یک عدد زوج در نظر گرفت و نیز در صورتی که مساحت شیار به اندازه کافی بزرگ باشد طوریکه بتوان تعداد هادیهای هر شیار را همراه با عایق هادی و شیار در آن جای داد.

شار دندانه بدون در نظر گرفتن نشتی شیار، برابر است با:

$$\phi_t = \frac{p\phi}{\psi S}$$

به طوریکه S تعداد شیارهای آرمیچر (در این مورد برابر 27) می باشد.

چگالی شار در دندانه ها برابر است با:

$$B_t = \frac{\phi_t}{w_t L_i}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طول آهن آرمیچر را می توان برابر 0/95 طول آرمیچر در نظر گرفت. از آنجا که شیارها دوزنقه ای می شوند و دندانها دارای کناره های موازی می باشند، پهنای دندان در 3/5 mm ثابت است. بنابراین

$$B_t = \frac{2 \times 5 / 9 \times 10^{-3}}{0.7 \times 27 \times 3 / 5 \times 10^{-3} \times 0.95 \times 0.128} = 1/47 \text{ T}$$

باید توجه شود که اگر ما می خواستیم موتور دیگری را با توان نامی مشابه اما با سرعت بار کامل مثلاً 1300 min/rev طراحی کنیم، این امکان وجود داشت که بتوان براساس 4 قطب طراحی نمود بدون اینکه فرکانس آرمیچر از 50 هرتز بیشتر شود و در نتیجه کاهش شار هسته موجب می گردید تا بتوان بارگذاری مغناطیسی ویژه بیشتری را در نظر گرفت. این امر یکی از دلایلی است که مقادیر در شکل 4-17 برحسب نسبت توان به سرعت ترسیم شده است. بدیهی است که بارگذاریهای ویژه و ضریب خروجی موتور min/rev 1300 بزرگتر از مقادیر متناظر برای موتور 2700 min/rev خواهد بود. حاصل ضرب برای ماشینی با سرعت کمتر، نیز بیشتر از مقدار آن برای ماشین با سرعت بالاتر خواهد بود. این امر بدین علت است که حاصل ضرب به طور معکوس با حاصل ضرب سرعت و ضریب خروجی متناسب است، ضمن اینکه میزان افزایش در ضریب خروجی همیشه از میزان کاهش سرعت کمتر می باشد. قطر و طول موتور 1300 min/rev به ترتیب حدود 150 و 100 میلی متر خواهد شد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

مساحت شیار ورقه های نشان داده شده در شکل 4-24، می باشد. تعداد هادیهای هر شیار برابر است با:

$$\frac{Z}{S} = \frac{399}{27} = 14/78$$

برای جلوگیری از به کارگیری سیم پیچهای مجازی در آرمیچر سیم پیچی شده به صورت هر شیار باید به ترتیب مضربی از 2 یا 6 باشد. در صورتی که برای هر شیار 12 هادی در نظر بگیریم می توانیم سیم بندی را هم با 2 و هم با 6 بازوی کلاف در هر شیار طراحی کنیم. اما این کار کاهش اساسی در بارگذاری الکتریکی ویژه ایجاد خواهد نمود (که منجر به یک ماشین بزرگتر و یا بارگذاری مغناطیسی ویژه بیشتری خواهد شد). بنابراین، در این مورد، در هر شیار 2 بازوی کلاف در نظر می گیریم و در هر شیار می توانیم هم 14 و هم 16 هادی را مورد استفاده قرار دهیم (به ترتیب 7 یا 8 دور در هر کلاف). پیش از آنکه سرانجام بتوانیم در مورد استفاده از ورقه های نشان داده شده در شکل 4-24 تصمیم گیری کنیم باید قانع شویم که 16 یا 14 هادی را همراه با عایق هادی و شیار می توان در داخل شیار جای داد.  
جریان ترمینال موتور برابر است با:



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

$$I = \frac{P_o}{V\eta}$$

اگر فرض کنیم راندمان 85 درصد است (p.u 85/0)، جریان ترمینال موتور 16 A خواهد بود. با توجه به شکل 4-20، برای برابر با 67/5، جریان میدان شنت تقریباً 1/34 درصد جریان نامی موتور، یا 0/2 A خواهد بود.

$$I_a = 16 - 0/2 = 15/8 \quad , \quad I_z = \frac{I_a}{2} = 7/9 A$$

فرض می کنیم چگالی جریان هادی برابر باشد، سطح مقطع هادی برابر است با:

$$a_z = \frac{I_z}{\delta_a} = \frac{7/9}{3/5} = 2/26 \text{ mm}^2$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

قطر هادی برابر است با:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \times 2 / 26}{\pi}} = 1 / 69 \text{ mm}$$

نزدیک ترین قطر در جدول سیم مسی استاندارد شده  $1/7 \text{ mm}$  می باشد (سطح مقطع مس برابر است) و قطر هادی عایق شده  $1/83 \text{ mm}$  می باشد. سطح مقطع هادی عایق شده در حدود است. لذا سطح مقطع کل 16 هادی می باشد. مساحت شیار ورقه نشان داده شده در شکل 4-24 برابر است. این مقدار، ضریب اشغال شیار  $0/36$  را به ما خواهد داد. بنابراین می توان 16 هادی (و مسلماً 14 هادی) را به راحتی در داخل شیار جای داد.

. در حقیقت، اگر این ورقه ها را مورد استفاده قرار دهیم، بهره برداری از شیار بسیار بد و کمتر از میزان لازم خواهد بود. آنچه که ما در واقع نیاز داریم ورقه هایی با شیارهای کوچکتر و هسته عمیق تر است. با چنین ورقه هایی، نسبت مساحت مس به شیار افزایش خواهد یافت، بهره برداری از شیار بهتر صورت گرفته و از اشباع هسته جلوگیری خواهد شد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

حال ورقه نشان داده شده در شکل ۴-۲۵ را مورد بررسی قرار می دهیم. قطر خارجی آن 95 mm، مساحت شیار، عمق هسته 20 mm، پهنای دندانه 5/4 mm و عمق شیار 15 mm می باشد. ضریب اشغال شیار برای ۱۶ و ۱۴ هادی در هر شیار به ترتیب برابر ۰/۴۸ و ۰/۴۲ خواهد بود. عمق شیار کمتر (15 mm در مقایسه با 9/20 mm برای ورقه ۲۷ شیاره) موجب می گردد تا برای عبور شار در دندانه ها، آمپر دورهای کمتری مورد نیاز باشد. بنابراین برای این طراحی، ورقه ۲۵ شیاره مناسب تر است.

ما ورقه شکل 4-25 را مورد استفاده قرار می دهیم و با 14 هادی در هر شیار، بارگذاری الکتریکی ویژه 9264 آمپر هادی بر متر خواهد بود. تعداد کل هادیهای آرمیچر برابر 350 بوده و شار متوسط هر قطب که در ولتاژ بی باری برابر با ولتاژ ترمینال 110 V مورد نیاز است 37/6 mwb می باشد. ما طول آرمیچر را طوری انتخاب می کنیم که چگالی شار بوجود آمده در هسته 5/1 T باشد. این کار طول آرمیچر 118 mm را نتیجه می دهد.

حال چگالی شار ماکزیموم در فاصله هوایی، در حدود 55/0 T است اما چگالی شار در دندانه ها و هسته به ترتیب 5/1 T و 53/1 T است که کاملاً قابل قبول می باشند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

آمپر دورهای هر متر، هم برای دندانه و هم برای هسته آرمیچر از منحنی مغناطیس شونده ماده ورقه که در پیوست 1 ارائه شده است بدست می آید. بنابراین:

$$at_t = 700 \text{ A/m} \quad \text{و} \quad at_c = 800 \text{ A/m}$$

عمق شیار، همراه با دهانه شیار، 15 mm می باشد. طول مسیر شار در هسته، از معادله (A-152) پیوست 2 محاسبه شده و برابر 4/35 mm خواهد بود. بنابراین، آمپر دورهای دندانه ها و هسته برای هر قطب عبارتند از:

$$AT_t = 700 \times 0.15 = 11 \quad \text{و} \quad AT_c = 800 \times 35/4 = 28$$

در هر شیار 14 هادی وجود دارد. تعداد بازوهای کلاف در هر شیار 2 بوده و 7 دور در هر کلاف وجود دارد، لذا تعداد کلافهای آرمیچر و تیغه های کموتاتور برابر تعداد شیارها، یعنی 25 خواهد شد. اکنون گام کموتاتور را بررسی می کنیم.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

فرض می کنیم قطر کموتاتور 60 درصد قطر آرمیچر است، بنابراین:

$$\beta_c = \frac{\pi D_c}{C} = \frac{\pi \times 0.6 \times 95}{25} = 7.16 \text{ mm}$$

که کاملاً قابل قبول می باشد.:

سرعت مماسی کموتاتور در حالت بی باری حدود 8 m/s می باشد، که در داخل محدوده‌های ارائه شده در بخش 8-3-4 قرار دارد. ولتاژ بین تیغه های مجاور کموتاتور نیز بوسیله معادله (7-4) محاسبه شده و در حدود 2/12 V می باشد. باز هم این مقادیر، رضایت بخش و قابل قبول اند.

طول دور متوسط سیم پیچی آرمیچر از معادله (4-11) به صورت زیر بدست می آید:

$$L_{ma} = 2 \times 0.118 + 2/3 \times 0.149 + 5 \times 0.15 = 0.654 \text{ m}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

و مقاومت آرمیچر از معادله (4-12) بدست می آید:

$$R_a = \frac{350 \cdot \frac{1}{8} \times 10^{-8} \times 0.654}{2 \times 2^2 \cdot \frac{2}{27} \times 10^{-6}} = 0.227 \Omega$$

افت ولتاژ مقاومت آرمیچر  $V_{6/3}$  می باشد. این مقدار در حدود  $3/3$  درصد ولتاژ ترمینال است. با توجه به شکل 4-20، برای  $n \times KW$  برابر  $67/5$ ، افت ولتاژ مدار آرمیچر در حدود  $7/2\%$  یا  $9/7 V$  است. پس از بدست آوردن افت ولتاژ در سیم پیچی قطب کمکی و نیز افت اتصال جاروبک، خواهیم دید که افت ولتاژ مدار آرمیچر در حدود مقدار بدست آمده از شکل 4-20 خواهد بود. این امر نشان دهنده آن است که طراحی آرمیچر رضایت بخش و قابل قبول می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### فاصله هوایی و آمپر دورهای قطب

برای آنکه لبه قطب پیشرونده (موافق) موتور به طور کامل مغناطیس زدایی نشود، آمپر دورها در هر قطب برای فاصله هوایی و دندانه های آرمیچر نباید از مقدار  $mmf$  عکس العمل آرمیچر در لبه قطب، یا کمتر باشند. بنابراین، فرض می کنیم آمپر دورهای لازم جهت عبور شار در فاصله هوایی و دندانه های آرمیچر تقریباً  $0/75$  برابر آمپر دورهای آرمیچر در هر قطب باشند.

آمپر دورهای آرمیچر در هر قطب برابر است با:

$$AT_a = \frac{I_z Z}{2p} = \frac{7/9 \times 350}{2 \times 2} = 691$$

همچنین:

$$AT_g = 0/75 AT_a - AT_t = 519 - 11 = 508$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

اما:

$$AT_g = \frac{B_g}{\mu_0} l_g K_g$$

به طوریکه ضریب تصحیح فاصله هوایی بوده و در این مورد برابر 1/15 می باشد

طول فاصله هوایی که در این روش بدست می آید حدود 1 mm است. آمپر دورهای لازم در هر قطب جهت فرستادن شار از میان قطب و یوغ در بار کامل، ، را می توان برابر با 2000 برابر گام قطب در نظر گرفت، که گام قطب بر حسب متر می باشد. بنابراین:

$$AT_p + AT_y = 2000 \times 0.149 = 298$$

در صورتی که برابر 1 mm انتخاب گردد، آمپر دورها در هر قطب در بار کامل حدود 845 خواهد بود، و این مقدار موقتی و مشروط حدود 22 درصد بزرگتر از آمپر دورهای عکس العمل آرمیچر است



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### طراحی سیم پیچ میدان و قطب

برای تعیین ابعاد قطب، فرض می کنیم چگالی شار در بدنه قطب برای قطب مورق  $T/8$  است. طول آهن خالص قطب  $0/95$  برابر طول آرمیچر می باشد. بنابراین:

$$B_p = 1/8 T, \quad l_{pi} = 0/95 \times 0/118 = 0/112 \text{ m}$$

ضریب نشتی قطب را  $1/1$  فرض می کنیم، شار در بدنه قطب برابر است با:

$$\phi_p = 6/73 \times 1/1 = 7/4 \text{ mwb}$$

سطح مقطع برابر است با:

$$A_p = \frac{\phi_p}{B_p} = \frac{7/4 \times 10^{-3}}{1/8} = 4/11 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

پهنای بدنه قطب برابر است با:

$$b_p = \frac{A_p}{l_{pi}} = \frac{4/11 \times 10^{-3}}{0/112} = 0/036 \text{ m}$$

ارتفاع قطب را می توان بین 1 تا 1/5 برابر پهنای قطب فرض کرد. اجازه دهید ارتفاع قطب، ، همراه با کفشک قطب 36 mm باشد. آمپر دورها در هر متر از ارتفاع قطب از مشخصه های مغناطیس شونده گی ارائه شده در پیوست 1 برابر 8000 بدست می آید. آمپر دورهای لازم برای عبور شار در بدنه قطب برابر است با:

$$AT_p = 8000 \times 0/036 = 288$$

فرض می کنیم چگالی شار در یوغ T 1/5 باشد، حال عمق یوغ را از معادله (20-4) محاسبه می کنیم. عمق یوغ حدود 22 mm است. طول مسیر شار، ، به کمک معادله (22-A2) پیوست 2 برابر 0/15 m بدست می آید. آمپر دورها در هر متر از مسیر شار در یوغ برابر 700 می باشد



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

. آمپر دورهای مورد نیاز جهت عبور شار در یوغ برابر است با:

$$AT_y = at_y \times l_y = 700 \times 0.15 = 105$$

بنابراین، آمپر دورهای لازم در هر قطب جهت عبور شار در بدنه قطب و یوغ برابر 393 می باشد (برابر 298 که در بالا تخمین زده شد نیست)، و بدین ترتیب آمپر دورهای کل در هر قطب در بار کامل برابر 940 خواهد بود.

در صورتی که بتوان سیم پیچ میدان را جای داد، طراحی قطب قابل قبول و رضایت بخش خواهد بود. ارتفاع سیم پیچ میدان اندکی کمتر از ارتفاع قطب است. اجازه دهید ارتفاع متوسط سیم پیچ میدان 28 mm در نظر گرفته شود. همچنین فرض می کنیم عمق سیم پیچ، 40 mm بوده و ضریب اشغال سیم پیچ میدان 0/55 باشد، از معادله (4-30) برای محاسبه چگالی جریان در هادیهای میدان استفاده می نمائیم. چگالی جریان بدست آمده در حدود خواهد بود. این مقدار قابل قبول می باشد و بنابراین ابعاد قطب تا کنون رضایت بخش بوده است.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

طول دور متوسط سیم پیچی میدان با استفاده از معادله (4-21) محاسبه می شود:

$$l_{fc} = 2(0.118 + 2 \times 0.04 + 0.036) = 0.468 \text{ m}$$

سطح مقطع هادی با استفاده از معادله (4-34) محاسبه می شود:

$$a_{fc} = \frac{2 \times 940 \times 1/8 \times 10^{-8} \times 0.468}{110} = 1/44 \times 10^{-7} \text{ m}^2 = 0.144 \text{ mm}^2$$

نزدیکترین سیم استاندارد، قطر 0/45 mm را داشته و سطح مقطع آن می باشد. قطر سیمی که دوبار عایق کاری شده (سیم دو روکشه) برابر 0/516 است.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

حال می توان برای ضریب اشغال سیم پیچ میدان، مقدار دقیق تری را به صورت زیر بدست آورد:

$$f_{cf} = 0.75 \times \left( \frac{0.45}{0.516} \right)^2 = 0.57$$

که به مقدار فرض شده 0/55 خیلی نزدیک است. تعداد دورهای روی هر سیم پیچ میدان برابر است با:

$$N_f = \frac{h_f b_{fc} f_{cf}}{a_{fc}} = \frac{28 \times 40 \times 0.57}{0.159} = 40.15$$

مقاومت سیم پیچی میدان از معادله (4-33) بدست می آید:

$$R_f = 2 \times 40.15 \times \frac{1/8 \times 10^{-8} \times 0.468}{0.159 \times 10^{-6}} = 426 \Omega$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### طراحی قطبهای کموتاسیون

پهنای قطب کمکی در درجه اول به پهنای ناحیه کموتاسیون بستگی دارد. بنابراین پیش از طراحی قطبهای کمکی، کموتاتور و لوازم جاروبک را طراحی می نمائیم.

$$17/9 \leq w_{ip} \leq 22/3 \text{ mm}$$

برای موتورهای به صورت موجی سیم پیچی شده، پهنای ناحیه کموتاسیون در معادله (4-38) ارائه گردیده است. در این مورد در حال بررسی 2 بازوی کلاف در هر شیار و 2 قطب وجود دارند، پهنای ناحیه کموتاسیون برابر است با:

$$w_c = \frac{1}{0.6} (w_b - w_m)$$

بدلیل سرعت بالای این ماشین، جاروبکهای گرافیت آمیخته با رزین را مورد استفاده قرار می دهیم. گام کموتاتور حدود 7 mm می باشد. جاروبکی با پهنای 16mm، در امتداد سطح کموتاتور فقط روی 2 تیغه کموتاتور را می پوشاند. ضخامت جدا کننده عایق را نیز می توان برابر 0/8 mm در نظر گرفت. بنابراین پهنای بدست آمده برای ناحیه کموتاسیون برابر 24 mm است که قابل قبول می باشد. طول محوری جاروبک از چگالی جریان آن و جریان آرمیچر مشخص می گردد. چگالی جریان گرافیت آمیخته با رزین همانطور که در جدول 4-1 ارائه شده، برابر می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

لذا طول محوری جاروبک برابر با 10 mm است که قابل قبول خواهد بود. طول شعاعی مطابق با اندازه استاندارد جاروبک 32 mm می باشد.

اجازه دهید برای قطبهای کمکی نیز مشابه قطبهای اصلی همان فاصله هوایی، یعنی 1 mm را مورد استفاده قرار دهیم. برای آنکه اجازه دهیم تا شار در لبه های قطب کمکی متورم شود، پهنای قطب کمکی برابر 22 mm انتخاب می گردد. طول محوری قطب کمکی نیز مشابه قطب اصلی، یا 118 mm می باشد.

آمپر دورهای آرمیچر در هر قطب برابر 691 می باشد. ما آمپر دورهای قطب کمکی را 20 درصد بزرگتر از 691 mmf آرمیچر در هر قطب در نظر می گیریم، یعنی:

$$AT_{ip} = 1/2 \times 691 = 829$$

و تعداد دورهای قطب کمکی برابر است با:

$$N_{ip} = \frac{829}{15 / 8} = 52$$

فرض می کنیم چگالی جریان در سیم پیچی کموتاسیون برابر با باشد، سطح مقطع بدست آمده هادی آن خواهد بود



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

نزدیکترین سیم استاندارد، قطر مس 3 mm و سطح مقطع دارد. قطر هادی دو بار عایق کاری شده (دو رو کشه) 3/14 mm می باشد. مساحت مس در 52 کلاف سیم پیچ است. فرض می کنیم ضریب اشغال برای سیم پیچ قطب کمکی 0/5 باشد، کل مساحت شکاف مورد نیاز خواهد بود. بنابراین، اجازه دهید عمق متوسط سیم پیچ قطب کمکی را حدوداً 22 mm و ارتفاع متوسط آن را 30 mm در نظر بگیریم.

طول دور متوسط برابر است با:

$$l_{ic} = 2(0/118 + 2 \times 0/03 + 0/022) = 0/4 \text{ m}$$

مقاومت کل سیم پیچی میدان کموتاسیون به کمک معادله (44-4) به صورت زیر بدست می آید:

$$R_{ip} = \frac{1/8 \times 10^{-8} \times 0/4 \times 52}{7/069 \times 10^{-6}} \times 2 = 0/106 \text{ } \Omega$$

افت ولتاژ در سیم پیچی قطب کمکی در حدود 7/1 V می باشد.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات و راندمان

تلفات مسی

مقاومت سیم پیچی آرمیچر، سیم پیچی میدان شنت و سیم پیچی کموتاسیون به ترتیب ، و می باشند. این مقادیر در دمای 25 درجه سانتی گراد بدست آمده اند. مقادیر متناظر آنها در دمای 75 درجه سانتی گراد عبارتند از:

$$R_a = 0.27 \Omega \quad R_f = 5.6 \Omega \quad R_{ip} = 0.126 \Omega$$

جریان میدان در دمای 75 درجه سانتی گراد برابر است با:

$$I_f = \frac{110}{5.7} = 0.22 \text{ A}$$

و جریان آرمیچر در دمای برابر 78/15 A می باشد. تلفات مسی آرمیچر برابر است با:

$$W_a = (15/78)^2 \times 0.27 = 67/2 \text{ W}$$

تلفات مسی سیم پیچی میدان کموتاسیون برابر است با:

$$W_i = (15/78)^2 \times 0.126 = 31/4 \text{ W}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات مسی سیم پیچی میدان شنت برابر است با:

$$W_f = 0.22^2 \times 50.7 = 24/5 \text{ W}$$

افت ولتاژ اتصال جاروبک برای جاروبکهای گرافیت آمیخته با رزین برابر 2 V فرض می شود. تلفات اتصال جاروبک برابر است با:

$$W_b = 2 \times 15 / 78 = 31/7 \text{ W}$$

تلفات مسی کل 154/8 W می باشد



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### تلفات هسته

وزن دندانه های آرمیچر و هسته به کمک معادلات (4-49) و (4-50) به صورت زیر بدست می آیند:

$$G_t = 25 \times 0.045 \times 0.95 \times 0.118 \times 0.15 \times 7750 = 1/47 \text{ kg}$$

$$G_c = \frac{\pi}{4} \left[ (0.095 - 2 \times 0.15)^2 - (0.25)^2 \right] \times 0.95 \times 0.118 \times 7750 = 2/46 \text{ kg}$$

مقادیر تلفات آهنی ویژه در فرکانس 50 Hz و در 1/5 T و 1/53 T به ترتیب برای دندانه ها و هسته آرمیچر، از منحنی تلفات هسته ورقه بدست می آید. مقادیر تلفات آهنی برحسب kg/W در فرکانس 50 Hz برای دندانه ها و هسته آرمیچر به ترتیب 4/2 و 4/1 می باشند. در فرکانس 45 Hz این مقادیر 3/8 kg/W و 3/7 kg/W هستند.



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

تلفات آهنی هسته و دندانه های آرمیچر عبارتند از:

$$1/47 \times 3/8 + 2/46 \times 3/7 = 14/7 \text{ W}$$

تلفات آهنی کل با ضرب کردن تلفات هسته و دندانه های آرمیچر در عدد  $2/5$  تخمین زده می شود. بنابراین، تلفات هسته کل  $37 \text{ W}$  است.

### تلفات اصطکاک جاروبک

تلفات اصطکاک برای جاروبکهای گرافیتی برحسب سطح تماس کل جاروبک و سرعت مماسی کموتاتور همانطور که در بخش ۴-۳-۱۲ مورد بحث قرار گرفت، تعیین می گردد. سرعت کموتاتور  $8 \text{ m/s}$  و سطح تماس کل جاروبک می باشد. بنابراین:

$$W_{bf} = 2440 \times 320 \times 10^{-6} \times 8 = 6/3 \text{ W}$$



## طراحی ماشینهای جریان مستقیم

### تلفات اصطکاک یاتاقان و بادخوری

هنگامی که داده های آزمایش بر روی ماشینهای مشابه در دسترس نیست، ما این تلفات را برابر با تقسیم بر 50 درصد توان خروجی تخمین می زنیم. سرعت مماسی آرمیچر در حدود  $4/13$  m/s می باشد. تلفات اصطکاک یاتاقان و بادخوری تقریباً باید  $4 W$  باشد.

### راندمان

تلفات کل در موتور برابر است با:

$$\text{تلفات کل} = 154/8 + 37 + 6/3 + 4 = 20.2/1 \text{ W}$$

و راندمان برابر است با:

$$\eta = \frac{1500}{1500 + 20.2/1} = 88/1\%$$