1. ელექტრომძრავის ტექნოლოგიები
მომხმარებლის დონე

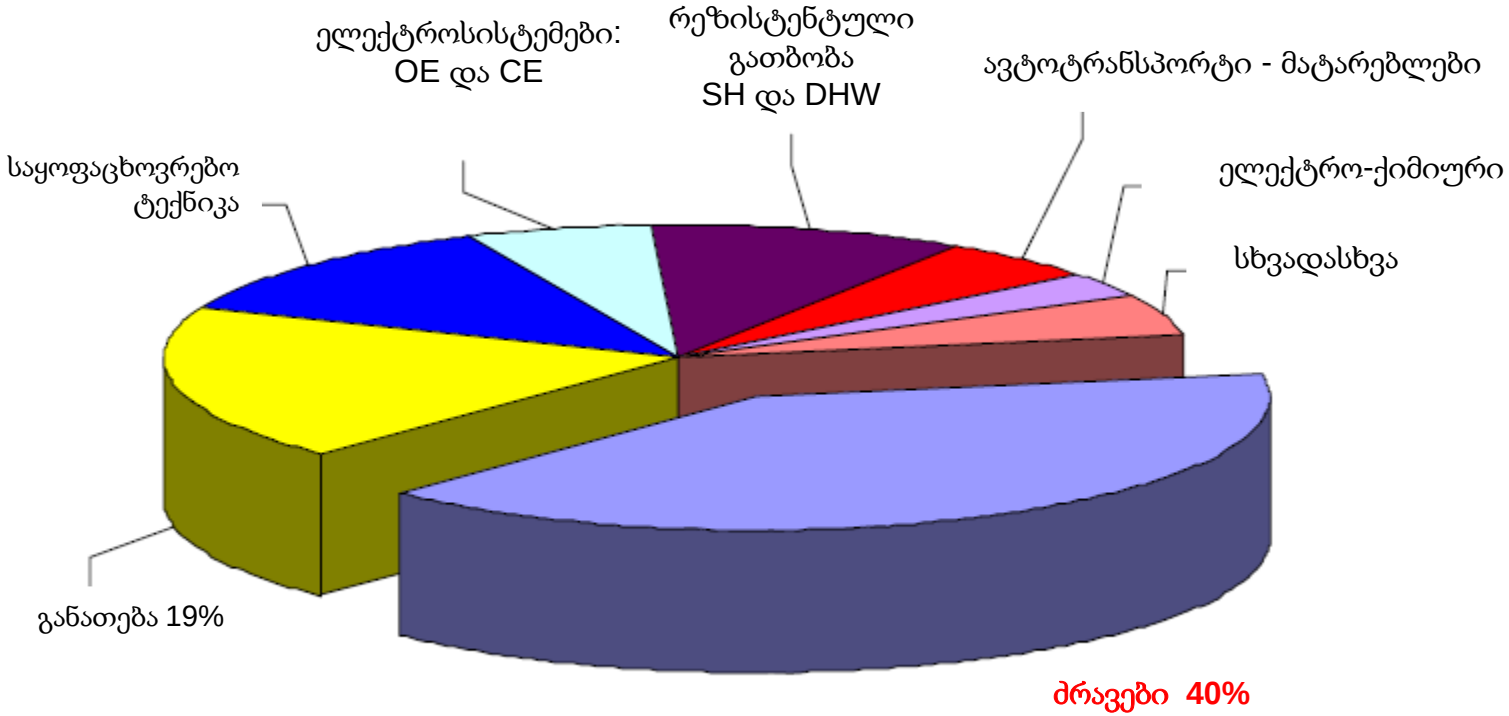
ანიბალ ტ. დე ალმეიდა

სისტემებისა და რობოტოტექნიკის
ინსტიტუტი-კოიმბრას უნივერსიტეტი

განხილული საკითხები

- ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება
- ძრავის სისტემის განმარტება
- ელექტროძრავის ტიპები
- ელექტროძრავის ეფექტურობა
- მაღალეფექტური ელექტროძრავები

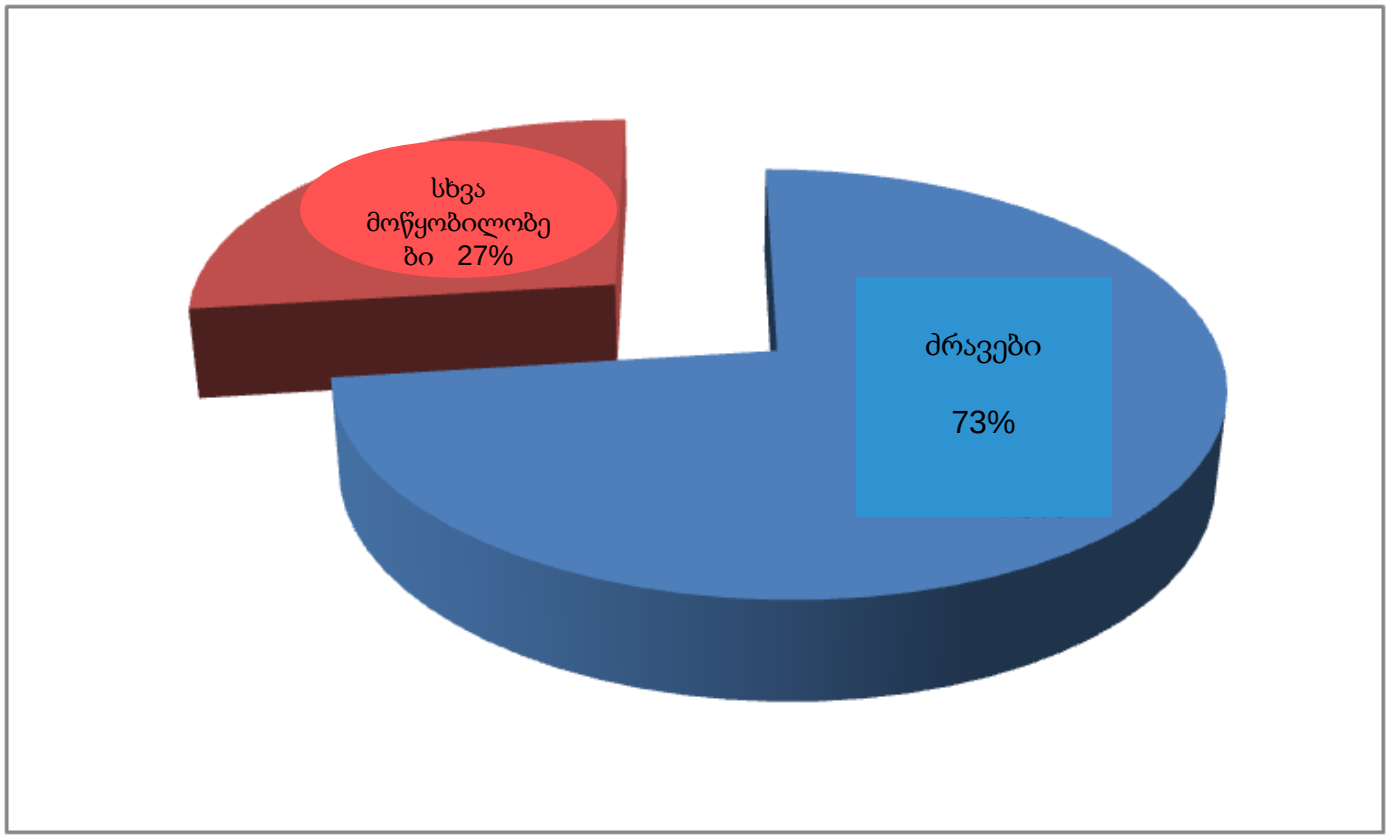
ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება



საბოლოო მომხმარებლის საერთო მოთხოვნა ელექტროენერგიაზე

წყარო: A+B International 2008

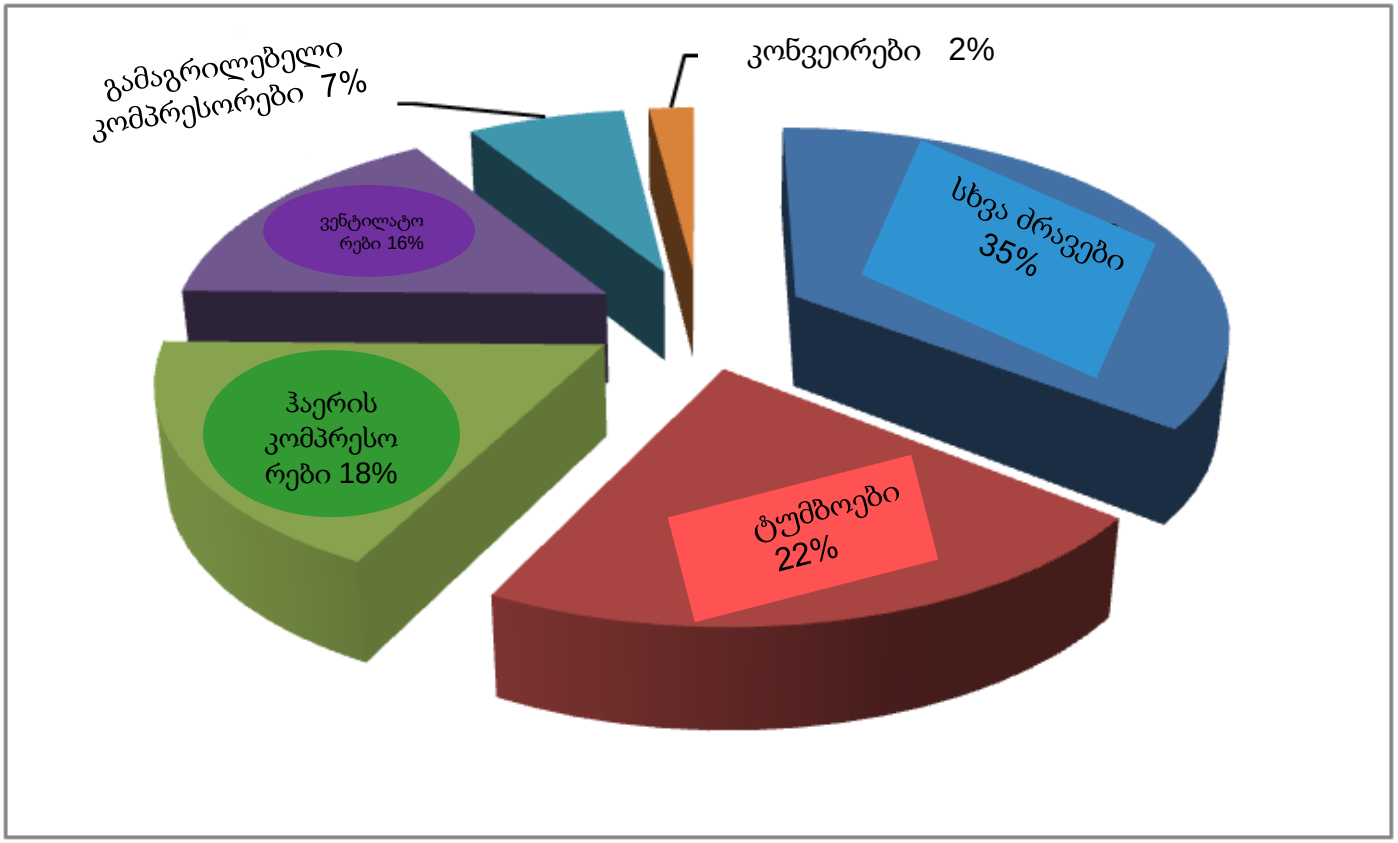
ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება



ელექტროენერგიის მოხმარება ევროკავშირის ინდუსტრიულ სექტორში

წყარო: რობოტიკისა და ელექტროტექნიკის ინსტიტუტი – კოიმბრას უნივერსიტეტი (2012)

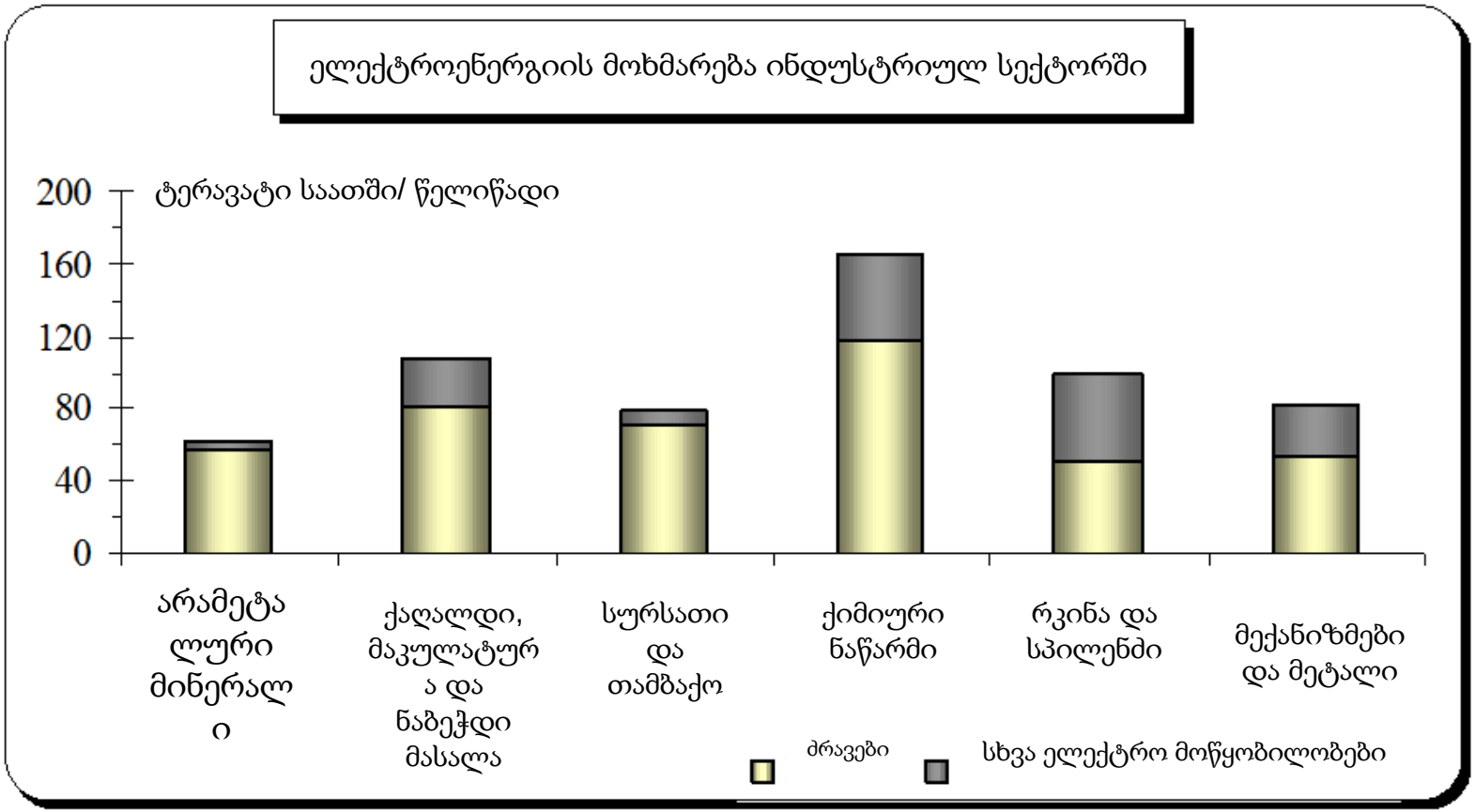
ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება



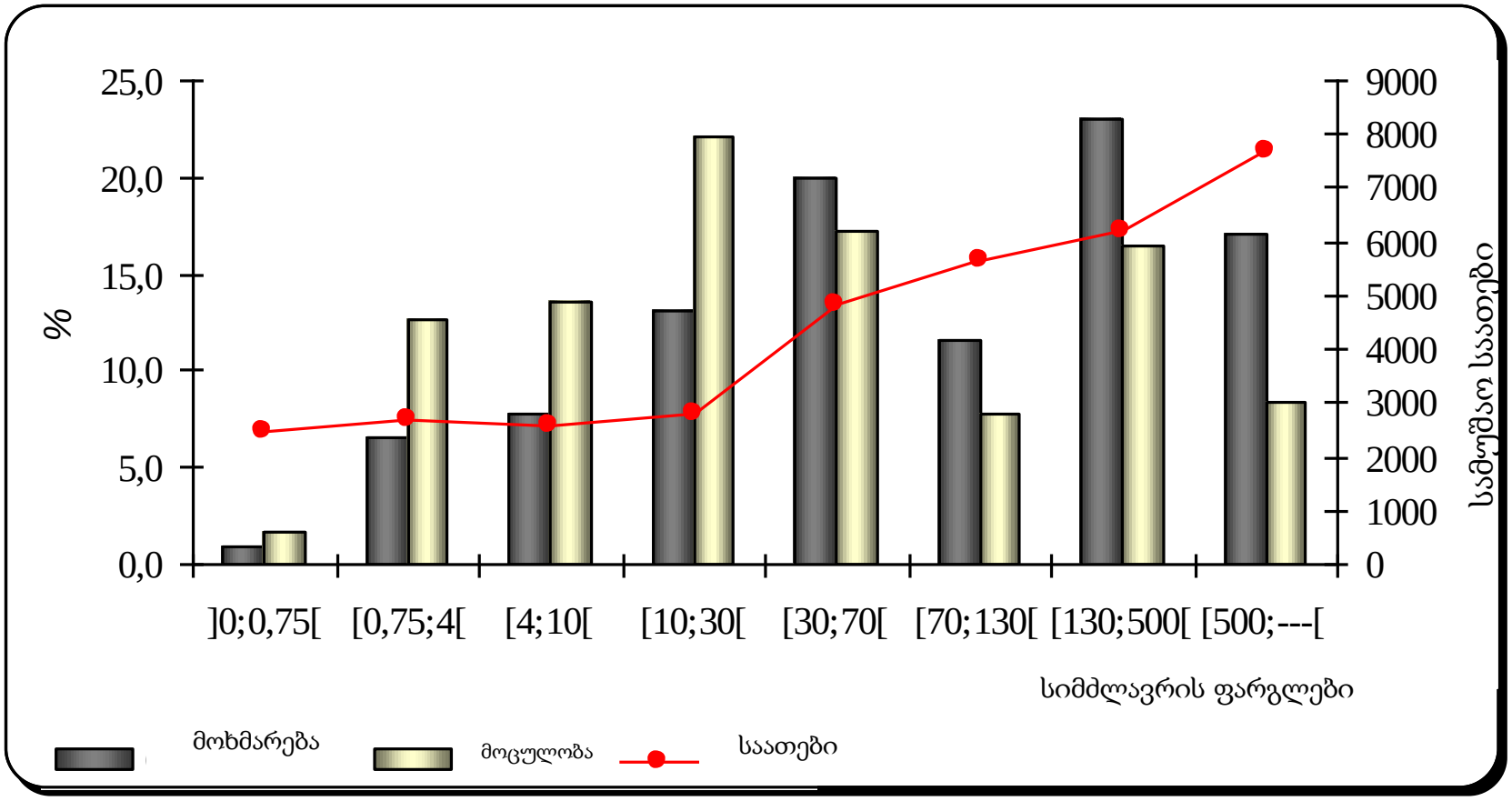
ასე ნაწილდება საბოლოო მომხმარებლის მიერ ელექტრო-ენერგიის მოხმარება ევროკავშირის ინდუსტრიულ სექტორში

წყარო: რობოტიკისა და ელექტროტექნიკის ინსტიტუტი – კოიმბრას უნივერსიტეტი (2012)

ძრავის სისტემების ელექტროენერგიის მოხმარება ინდუსტრიულ სექტორში(2000)



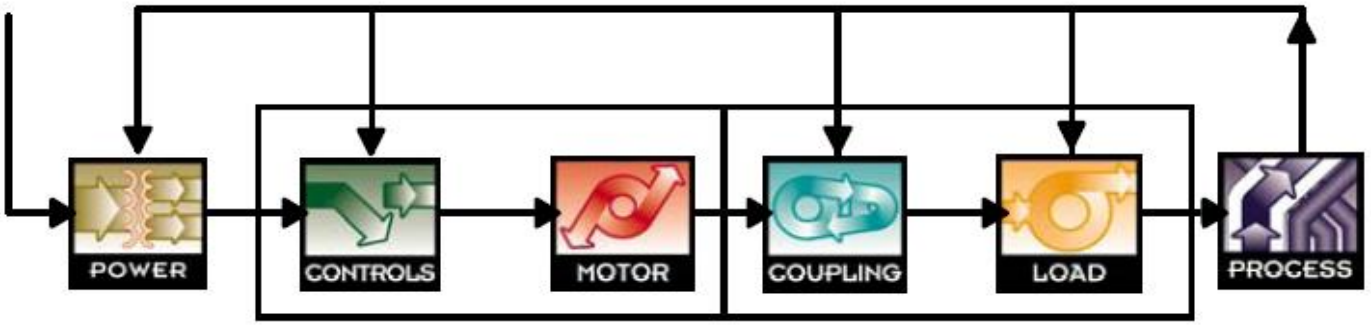
მრავის ელექტროენერგიის მოხმარება სიმძლავრის მიხედვით ინდუსტრიულ სექტორში (2000)



ძრავის სისტემა

სამფაზიანი შემავალი
სიმძლავრე

პროცესის მექანიკური და ელექტრული უკუკავშირი



ძრავის/ამძრავის ქვესისტემა

მექანიკური ქვესისტემა

ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება

ძრავის სისტემის ეფექტურობა რამდენიმე ფაქტორზეა დამოკიდებული:

- ძრავის ეფექტურობა
- ძრავის სიჩქარის/მაბრუნი მომენტის კონტროლი
- ზომის სწორად განსაზღვრა
- სიმძლავრის მიწოდების ხარისხი
- [სიმძლავრის] განაწილების დანაკარგები
- მექანიკური გადაცემა, ტრანსმისია
- ტექნიკური მომსახურება
- საბოლოო მოხმარების მექანიკური ეფექტურობა (ტუმბო, ვენტილატორი,
- კომპრესორი და ა.შ).

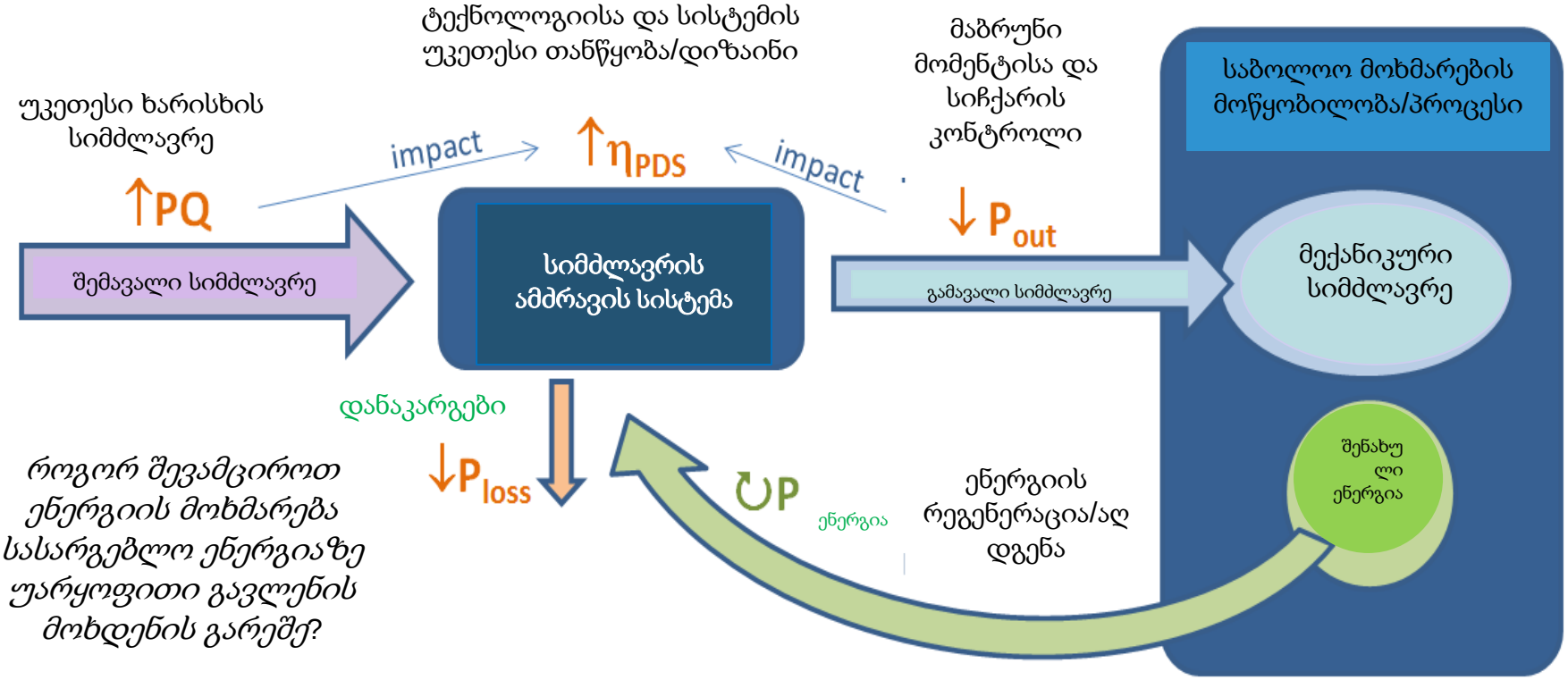
ელექტროძრავის სისტემის ეფექტურობა

$$\eta = \frac{P_{OUTPUT\ (USEFUL)}}{P_{INPUT}} = \frac{P_{SHAFT}}{P_{ELECTRICAL}} \qquad \eta = 1 - \frac{P_{LOSSES}}{P_{INPUT}} \qquad P_{SHAFT} = T \cdot \omega$$

$$\eta_{system} = \eta_{VSD} \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{transmission} \cdot \eta_{end-use} = \frac{P_{useful}}{P_{input}}$$

სადაც,
η – ეფექტურობა; P –სიმძლავრე; T – მაბრუნი მომენტი; ω – ბრუნვის სიჩქარე;
VSD – ცვლადი სიჩქარის ამძრავი

სტრატეგიები ელექტროძრავებში ენერგიის მოხმარების შესამცირებლად



წყარო: IEC60034-31

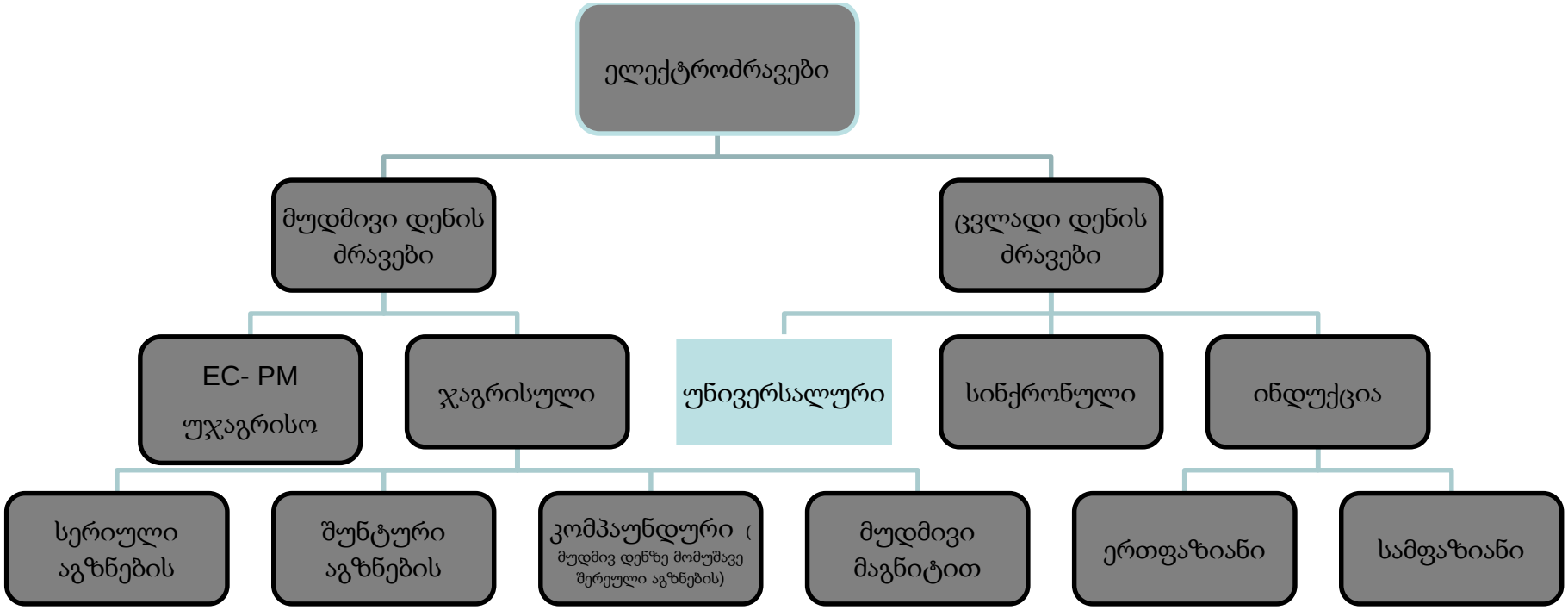
ექსპლუატაციის პრინციპები

ყველა ტიპის ძრავა ორი ძირითადი ნაწილისგან შედგება:

- სტატორი (უძრავი ნაწილი)
- როტორი (მბრუნავი ნაწილი)

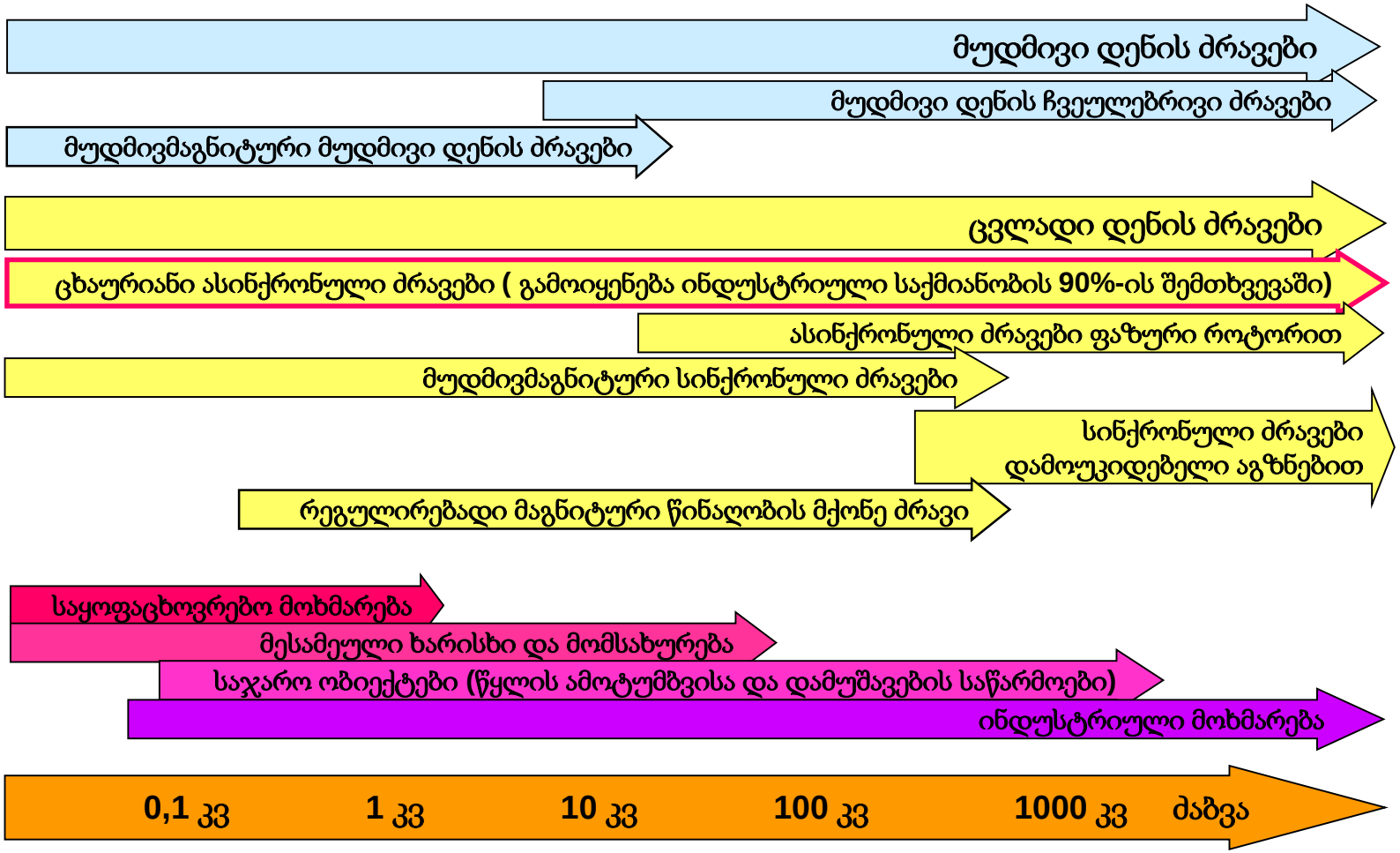
ამ ორი კომპონენტის კონსტრუქცია/დიზაინი და წარმოება ძრავის კლასიფიკაციისა და მახასიათებლების განმსაზღვრელია.

ძრავის ტიპები



EC – ელექტრონულად კომუტირებული
PM – მუდმივი მაგნიტი

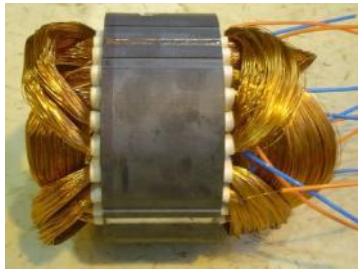
ძრავის ტიპები და გამოყენება

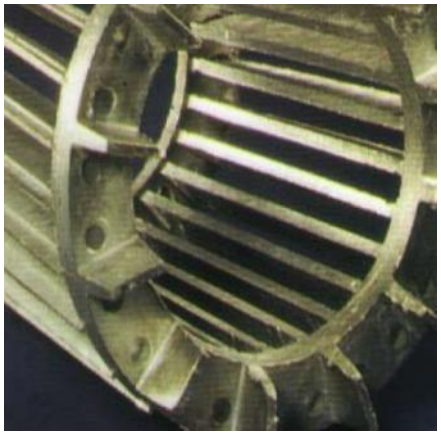


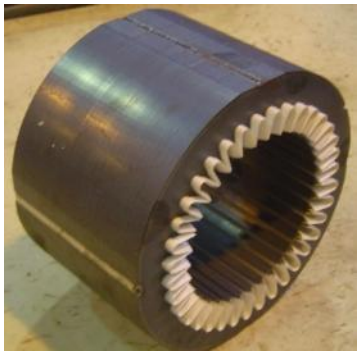
ცხაურიანი ასინქრონული ძრავები

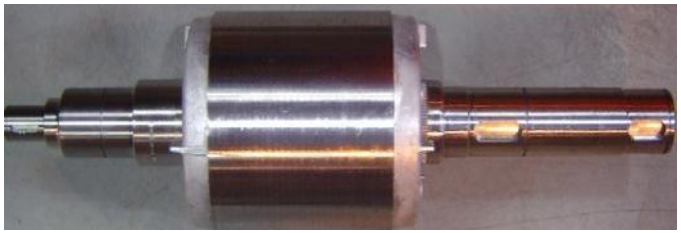
გამოიყენება ელექტროძრავების სისტემათა **90%**-ის მიერ;

- მაღალი ეფექტურობა და სანდოობა (ნაკლებად სჭირდება რემონტი);
- დაბალი ღირებულება (სხვა ტიპის ძრავებთან შედარებით);
- ადვილად სამართავი, როცა ცვლადი სიჩქარის ამძრავებით იკვებება **(VSDs)**.

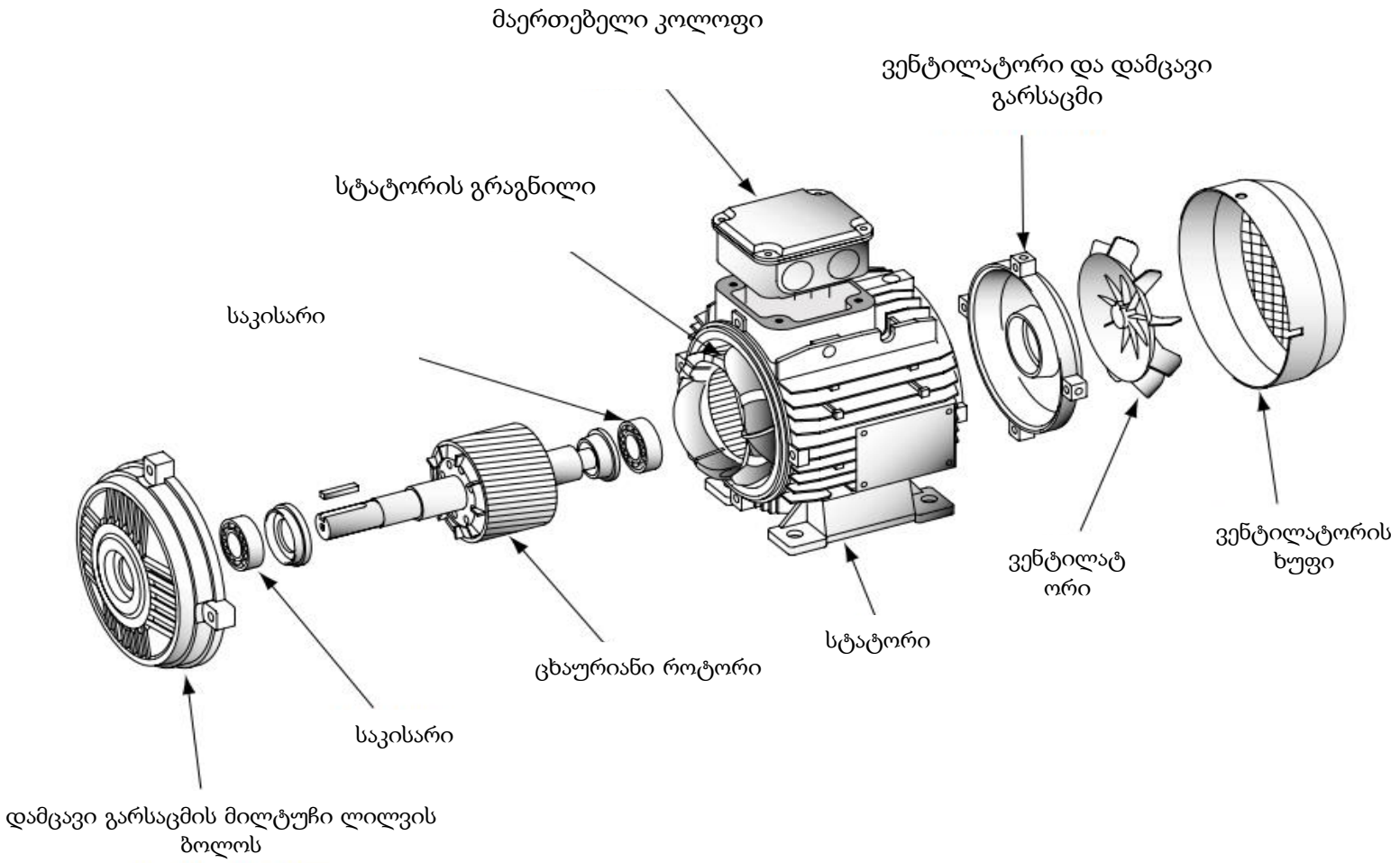




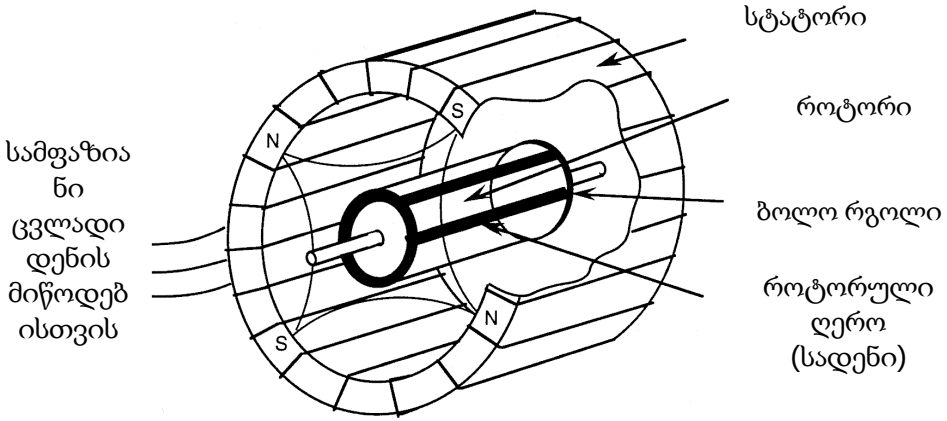


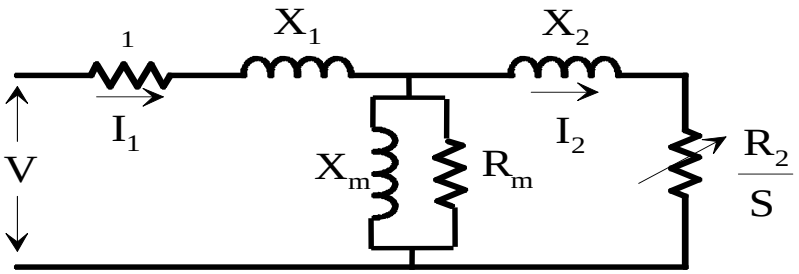


ცხაურიანი ასინქრონული ძრავები



ცხაურიანი ასინქრონული ძრავები

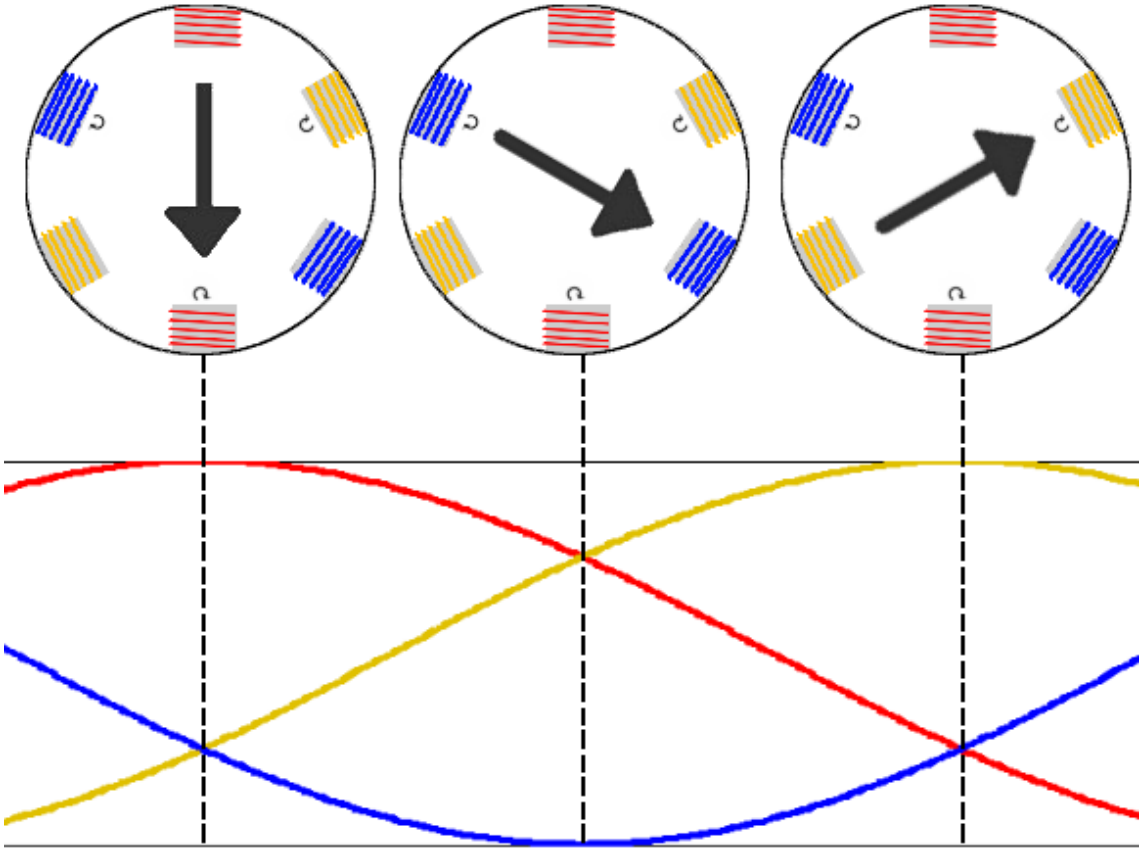




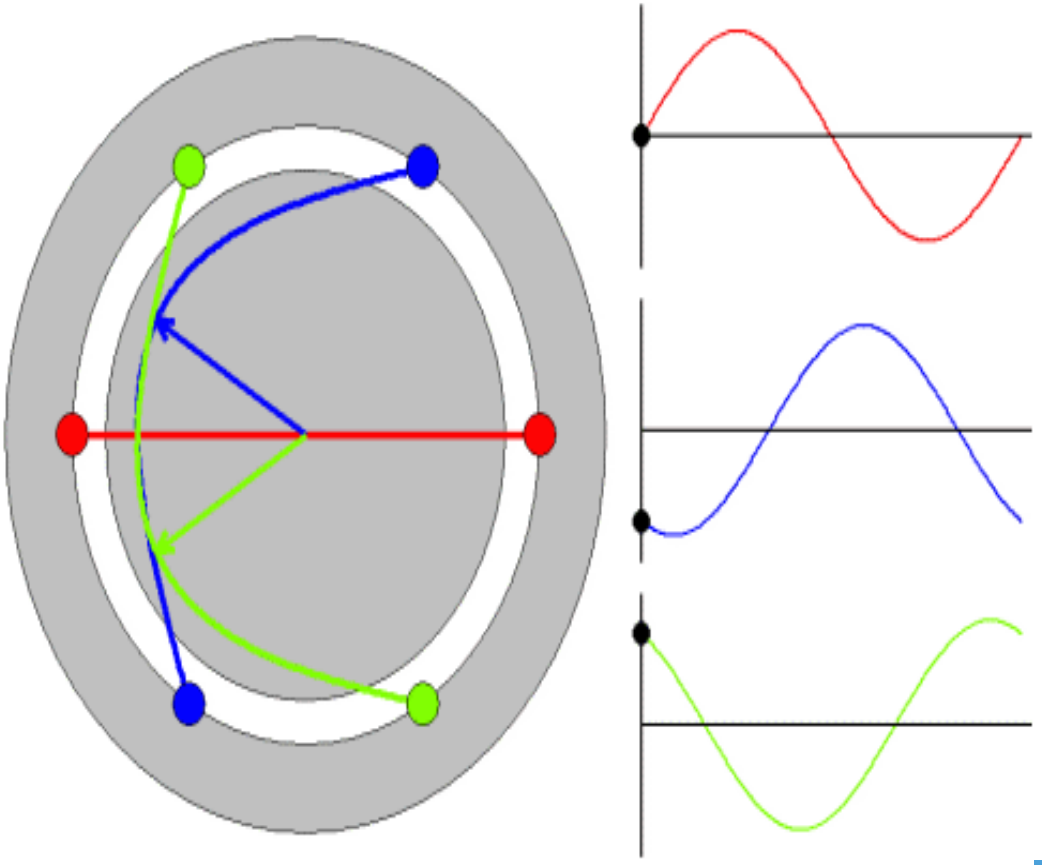
R1, R2 = სტატორის და როტორის წინაღობა,
X1, X2 = სტატორისა და როტორის გადინების რეაქტიული წინაღობა
s=როტორის სრიალი

Xm = მაგნიტური წინაღობა
Rm = მაგნიტური რეაქტიული წინაღობა

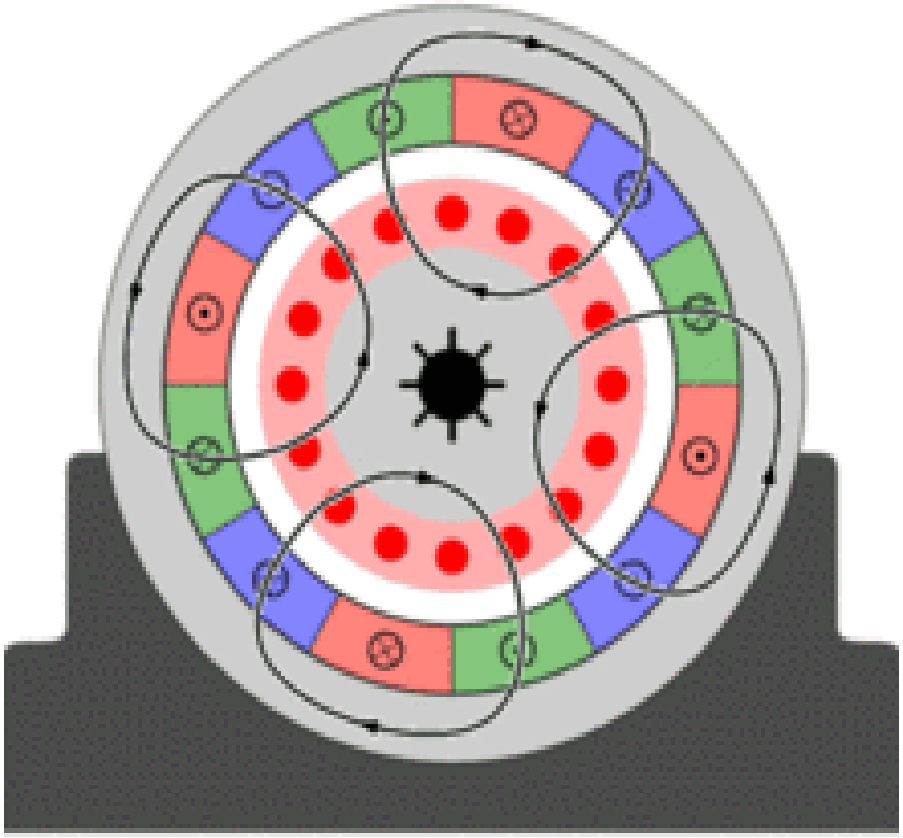
ასიქრონული ძრავები – მუშაობის პრინციპი



მაგნიტური როტაციული ველი

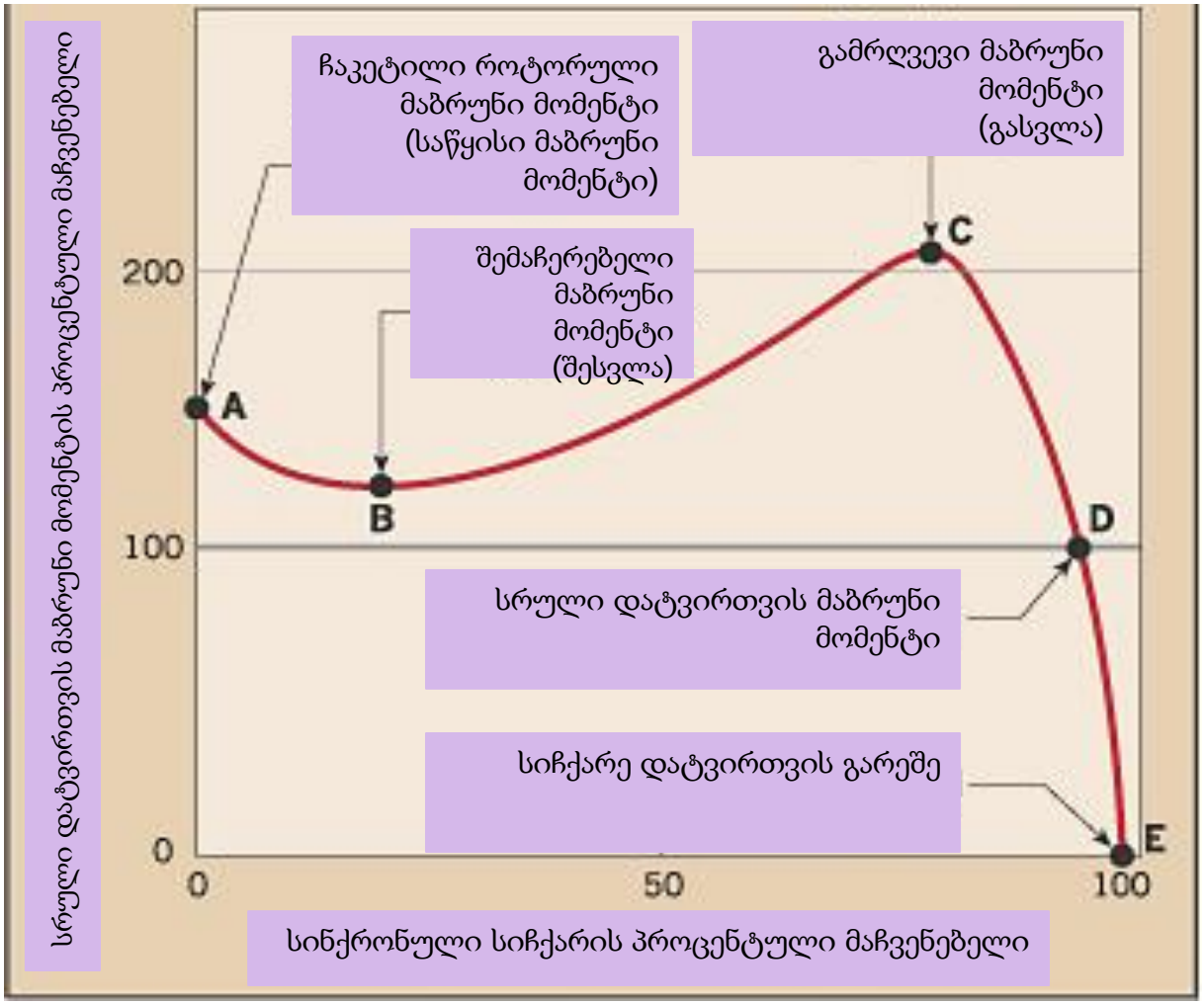


ასინქრონული ძრავა- მაგნიტური როტაციული ველი



ტიპიური მაბრუნი მომენტი-სიჩქარის ამსახველი გრაფიკი-

ცვლადი დენის ასინქრონული ძრავა



ძრავის დანაკარგები

- **ელექტრული დანაკარგები** (,,ჯოულის დანაკარგებსაც'' უწოდებენ) I^2R-ით გამოისახება და ძრავის დატვირთვასთან ერთად, სწრაფად მატულობს. ელექტრულ დანაკარგებს ადგილი აქვს იმიტომ, რომ ელექტრული წინაღობით წარმოქნილი სითბო სტატორის გრაგნილების მუდმივი ნაკადისა და როტორის გამტარში დაბრკოლებას ქმნის და რგოლებს წარმოქმნის.

- **მაგნიტურ დანაკარგებს** ადგილი აქვს სტატორისა და როტორის ფოლადის განშრევებებში. ეს ხდება დაგვიანებული და დაბალი სიხშირის დენის გამო, რომლებიც მაგნიტური ნაკადის სიმჭიდროვის კვადრატთან ერთად, შედარებით მატულობს.

- **მექანიკური დანაკარგების** მიზეზი საკისრების ხახუნში, სავენტილაციო სისტემასა და ჰაერის წინაღობის დანაკარგებში მდგომარეობს.

I - მუდმივი; R – ელექტრული წინაღობა

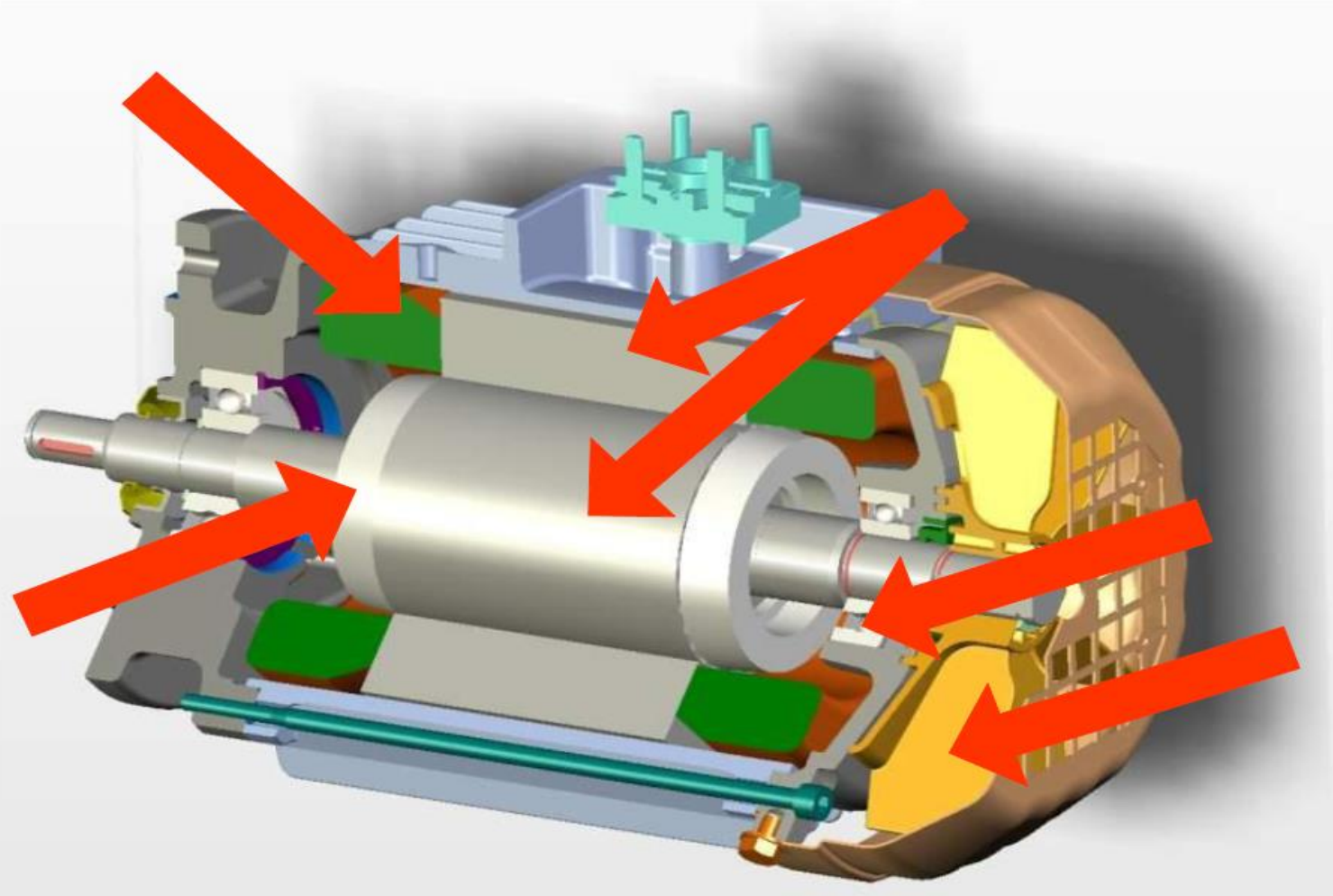
ISR – University of Coimbra

ძრავის დანაკარგები

- **მუხტის/დატვირთვის პარაზიტული დანაკარგები** გამოწვეულია ნაკადის გაპარებით, საჰაერო ნაპრალში ნაკადის სიმჭიდროვის ჰარმონიულობით, არაერთგვაროვნებითა და ცხაურის ღეროებში დენების განაწილებით, ასევე, საჰაერო ნაპრალის მექანიკური დეფექტებისა და ჰაერის ნაკადის არარეგულარული სიმჭიდროვის გამო.

- **ჯაგრისული/სრიალა კონტაქტის დანაკარგები (მხოლოდ ჯაგრისული ძრავების შემთხვევაში)** გამომდინარეობს ჯაგრისებსა და კოლექტორს/კომუტატორს შორის ძაბვის დაცემით და ასევე დამატებით, ხახუნით გამოწვეულ დანაკარგებსაც მოიცავს.

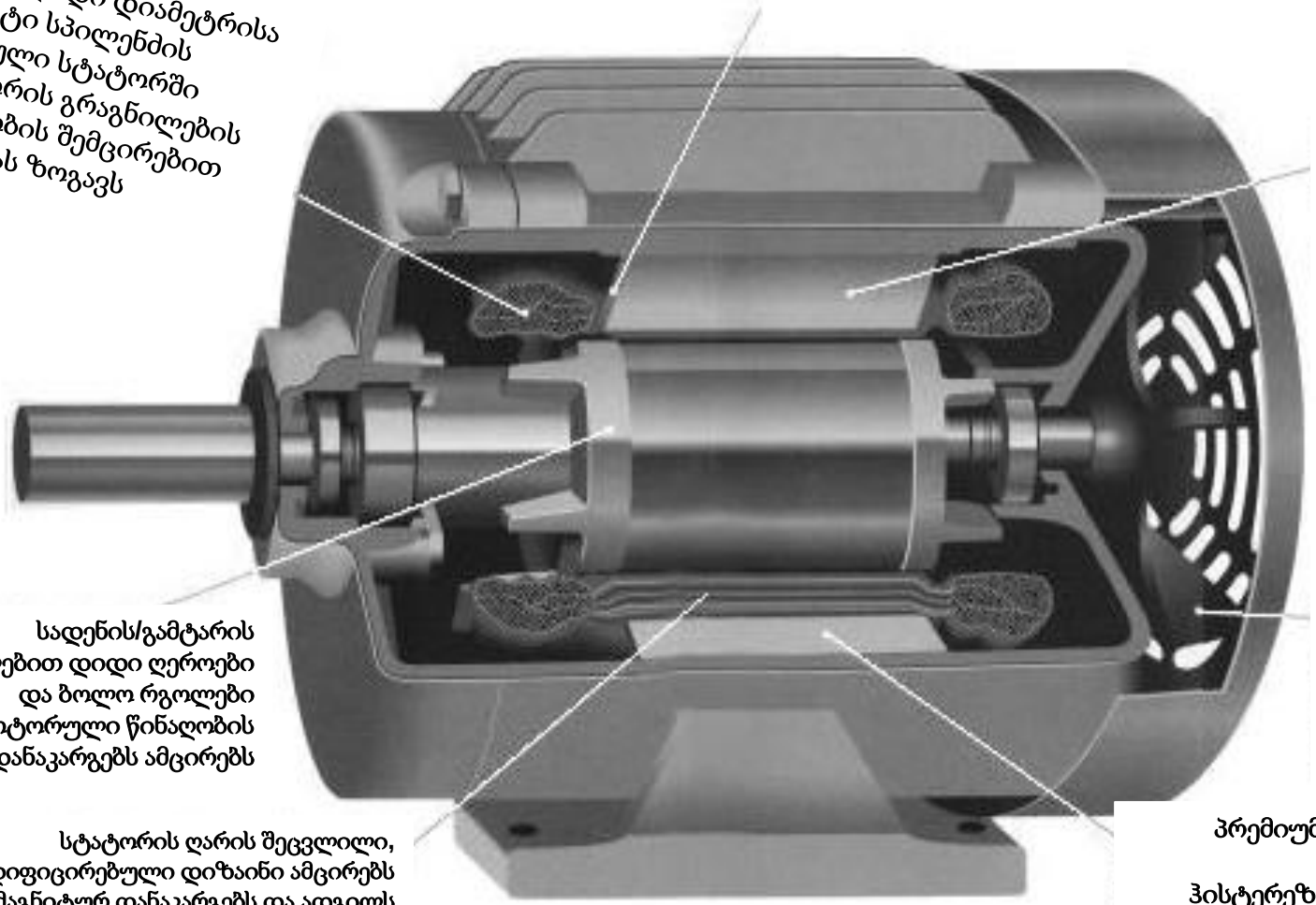
ასინქრონული ძრავების დანაკარგები



პრემიუმ ძრავების მახასიათებლები

სპილენძის გაცილებით თხელი განშრევებები დაბალი სიხშირის დენის დანაკარგებს აღკვეთს

უფრო დიდი დიამეტრისა და მეტი სპილენძის მავთული სტატორში სტატორის გრაგნილების წინაღობის შემცირებით ენერგიას ზოგავს



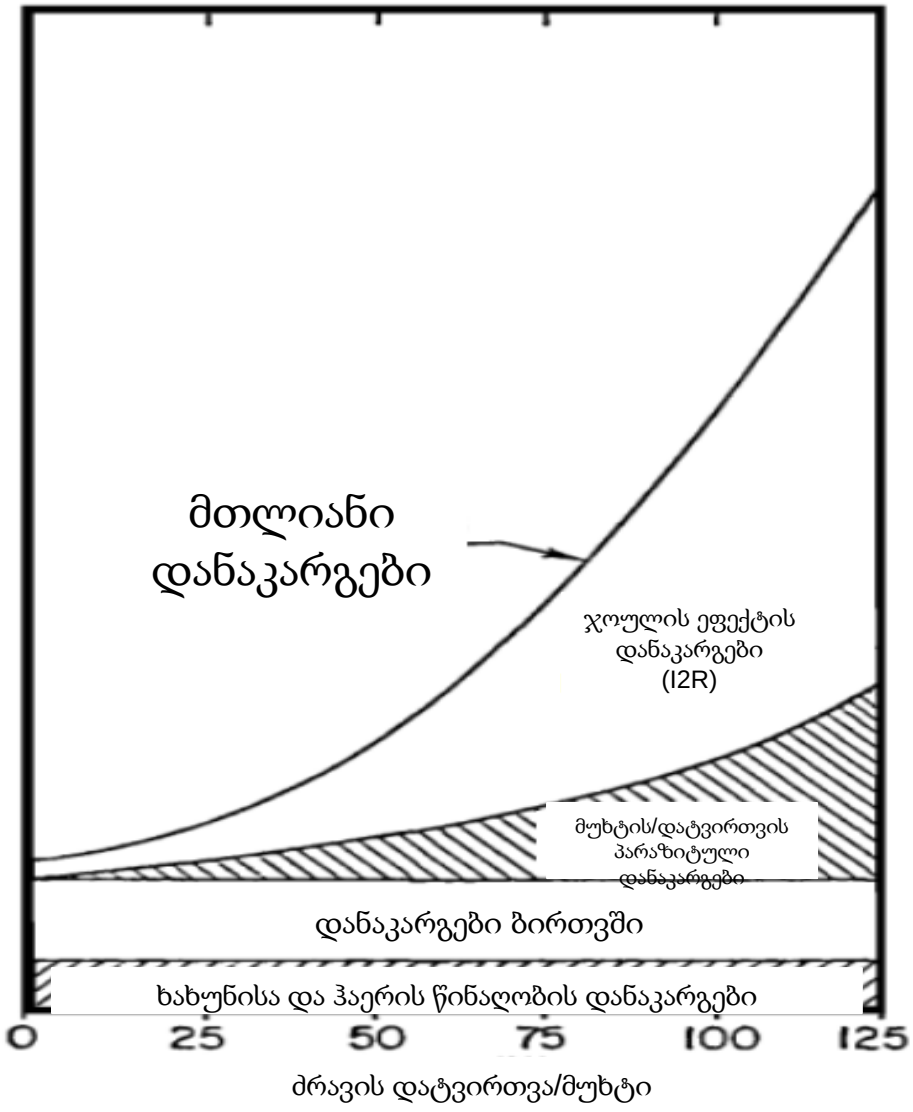
გაცილებით გრძელი სტატორი ამცირებს მაგნიტური სიმჭიდროვეს და ზრდის გაგრილების შესაძლებლობას. შედეგად, მაგნიტური და მუხტის/დატვირთვის დანაკარგები მცირდება.

გამაგრილებელი ვენტილატორის ეფექტური კონსტრუქცია აუმჯობესებს ჰაერის ნაკადს, ხოლო მისი დაძვრისთვის საჭირო ძაბვას ამცირებს

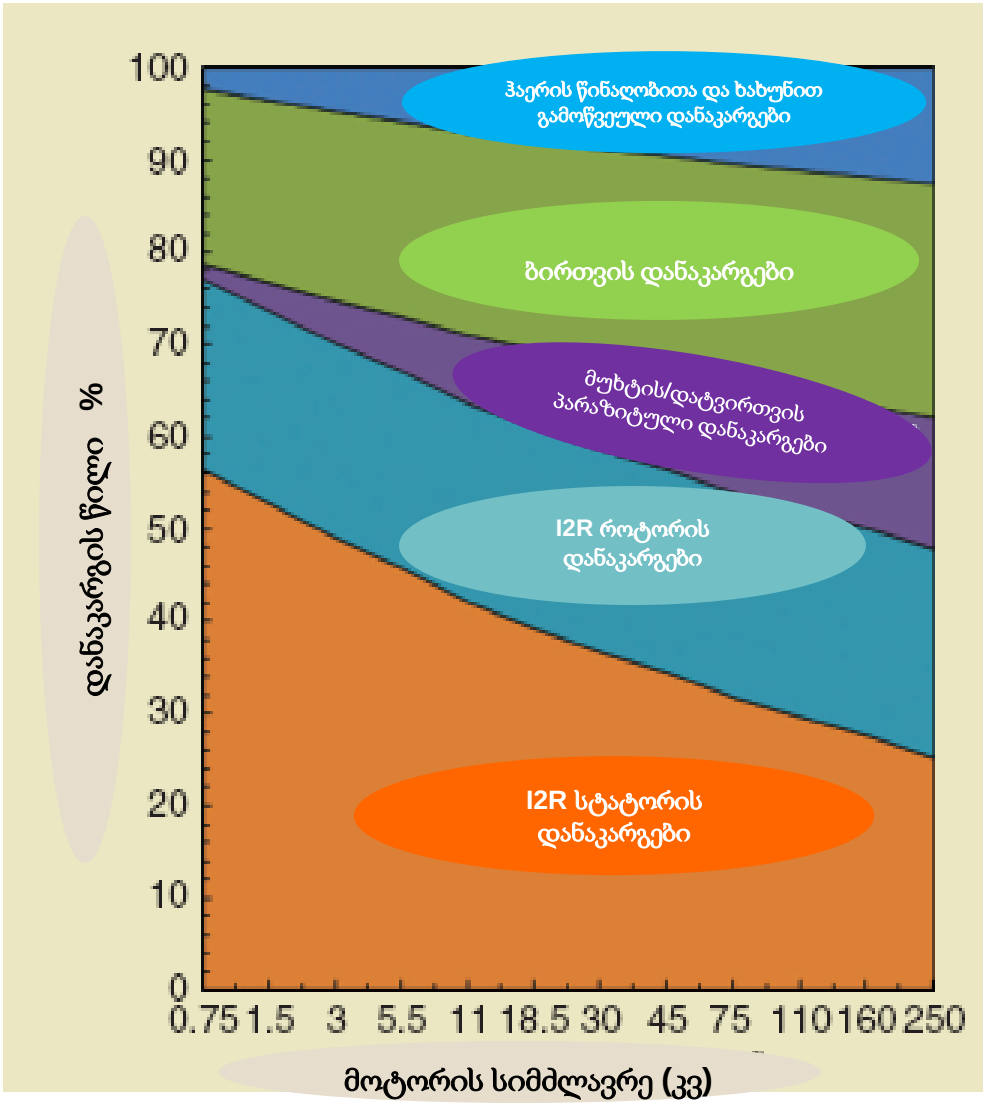
სადენის/გამტარის გაცილებით დიდი ღეროები და ბოლო რგოლები როტორული წინაღობის დანაკარგებს ამცირებს

სტატორის ღარის შეცვლილი, მოდიფიცირებული დიზაინი ამცირებს მაგნიტურ დანაკარგებს და ადგილს უთმობს უფრო დიდი დიამეტრის მავთულს.

პრემიუმ ხარისხის სპილენძის ბირთვი ჰისტერეზიული/დაგვიანებული ძაბვის დანაკარგებს ამცირებს



ძრავის დანაკარგები დატვირთვასთან/მუხტთან მიმართებაში

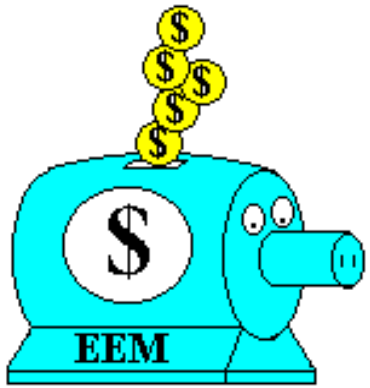


ძრავის დანაკარგები ძრავის სიმძლავრესთან მიმართებაში

დანაკარგების ტიპიური წილი **50** მეგაჰერცზე, ოთხპოლუსიანი ასინქრონული ძრავების შემთხვევაში

ენერგოეფექტური ასინქრონული ძრავები

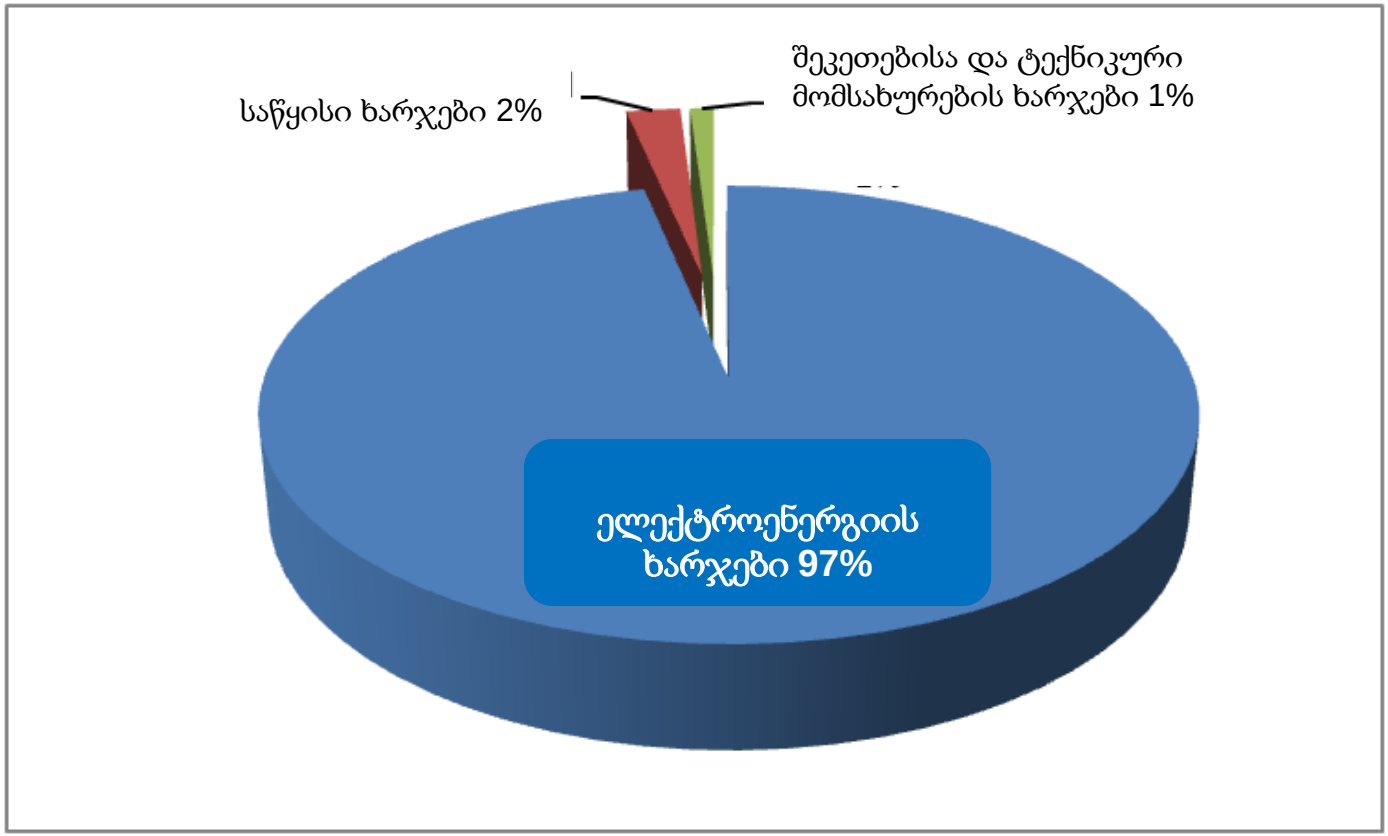
- გაცილებით მაღალეფექტურია (2-10% -ზე მეტი დამოკიდებულია ძრავის სიმძლავრეზე);
- შეუძლიათ გადასახადებისა და ტექნიკური მომსახურების ხარჯების შემცირება;
- მეტი ხარისხიანი მასალა – შედარებით ძვირი (25-30%-ით);
- უფრო ხანგრძლივი გამძლეობა (მუშაობისთვის ნაკლები ტემპერატურა სჭირდება);
- ჩვეულებრივ, უფრო მცირე საწყისი მაბრუნი მომენტი (გააჩნია როტორის ღარის ფორმას);
- უფრო მეტი საწყისი დენი ;
- სრიალის უფრო დაბალი დონე;
- როტორის მაღალი ინერცია.



ცხაურიანი ასინქრონული ძრავების ექსპლუატაციის ვადის მთლიანი ხარჯი

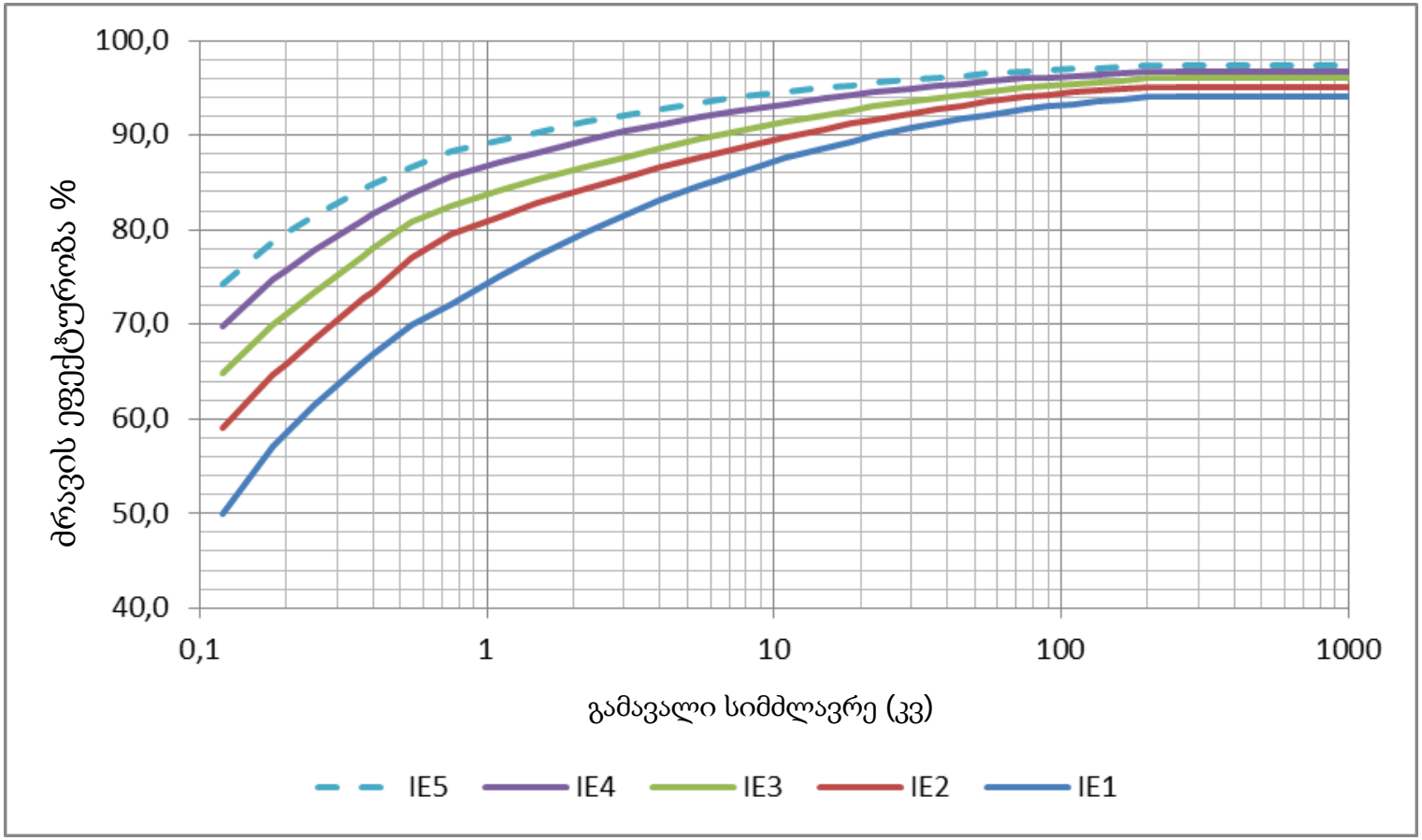
- ინდუსტრიის სფეროში, ასინქრონულ ძრავას შეუძლია, წელიწადში იმ რაოდენობის ენერგია დახარჯოს, რომელიც ეკვივალენტურია 5-10-გამრავლებული მისი საწყისი ღირებულებისა და მთელი მისი ექსპლუატაციის მანძილზე, დაახლოებით 12-20 წლის განმავლობაში, თავდაპირველ ღირებულებაზე 60-200-ჯერ მეტად წარმოგვიდგება.
- ეს ფაქტი ადასტურებს ექსპლუატაციის მთლიანი ხარჯის ანალიზს ტექნიკური მომსახურების ჩათვლით.

ძრავის სისტემების ენერგიის მოხმარება



11 kW IE3 ძრავა, 4000 საექსპლუატაციო საათი წელიწადში, 15-წლიანი საექსპლუატაციო ვადა 0,0754 €/კვ.სთ.
წყარო: სისტემებისა და რობოტოტექნიკის ინსტიტუტი – კოიმბრას უნივერსიტეტი

ასინქრონული ძრავების ეფექტურობის კლასიფიკაცია IEC 60034-30-1 (2014)



პარამეტრების მედეგობა

პარამეტრების მედეგობა NEMA-ს MG 1 და IEC-ის 600034-1 სტანდარტების მიხედვით		
პარამეტრი	მედეგობა - NEMA*	მედეგობა - IEC**
ძაბვა	ნომინალური ძაბვის ±10%	ნომინალურის ±5% A ზონაში ნომინალურის ±10% ზონა B-ში
სიხშირე	ნომინალური სიხშირის ±5%. იხ. შენიშვნა 1	ნომინალურის ±2% A ზონაში ნომინალურის ±3% და -5% B ზონაში
დენი	ნომინალური დენის ±10%	(სტანდარტში ვარიაციული მედეგობა არ გვხვდება)
სიჩქარე	ნომინალური სრიალი - rpm - ბრუნი წუთში - ±20%	ნომინალური სრიალი- ბრუნი წუთში -±20
ეფექტურობა	მინიმუმ, 20%-ით მეტ დანაკარგს ემყარება, ვიდრე - ნომინალურს	ძრავის (1 ეფექტურობის) -15% ≤ 150კვ/სთ ძრავის (1 ეფექტურობის) -10% ≤ 150კვ/სთ

*NEMA- ელექტრომწარმოებლების ეროვნული ასოციაცია
**IEC- საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისია

სავარჯიშო

ეკონომიკური ანალიზი – მაღალი ეფექტურობის IE3 ძრავის მარტივი სარგებელი სტანდარტულ ძრავასთან მიმართებაში:

1- ხელახალიგამოყენება

2- ძრავა ფუჭდება

3- არსებული ძრავის გაუმჯობესება

ძრავის სიმძლავრე-75 კვ, 8400 სთ/წ, 80% დატვირთვა

აშშ $ 0.06/კვ.სთ

IE3 ძრავის ეფექტურობა – 95%

ძველი ძრავის ეფექტურობა – 91% (იმის დაშვებით, რომ ძრავები 15 წელზე მეტი ხნისაა)

სავარჯიშო

საჭირო მონაცემები:

ძრავის სიმძლავრე -75 კვ

ფუნქციონირების დრო - 8400 სთ/წ,

დატვირთვის ფაქტორი -80%

ელექტროენერგიის ღირებულება -0.06 აშშ დოლარი/კვტ.სთ

ახალი IE3 ძრავის ეფექტურობა – 95%

ძველი ძრავის ეფექტურობა – 91% (იმის დაშვებით, რომ ძველი ძრავები 15 წელზე მეტი ხნისაა)

ახალი ძრავის ღირებულება

რემონტის/შეკეთების ღირებულება

დანაზოგები და სარგებელი

ელექტროენერგიის დანაზოგები [კვ.სთ/წ]

$$= Hr \times LF \times \left(\frac{P}{\eta_1} - \frac{P}{\eta_2} \right)$$

$$\text{მარტივი სარგებელი} = \frac{\text{განსხვავება ახალი ძრავის ღირებულების/ხარჯის მხრივ (აშშ დოლარი)}}{\text{დანაზოგები ენერგიის მხრი (კვ.სთ/წ) X ელ-ენერგიის ხარჯებზე (აშშ.დ/კვ.სთ}}$$

Hr –მუშაობის საათების რაოდენობა წლის განმავლობაში
LF – დატვირთვის ფაქტორი
P –ძრავის მექანიკური გამავალი სიმძლავრე
η – ძრავის ეფექტურობა

მუდმივი დენის ძრავები

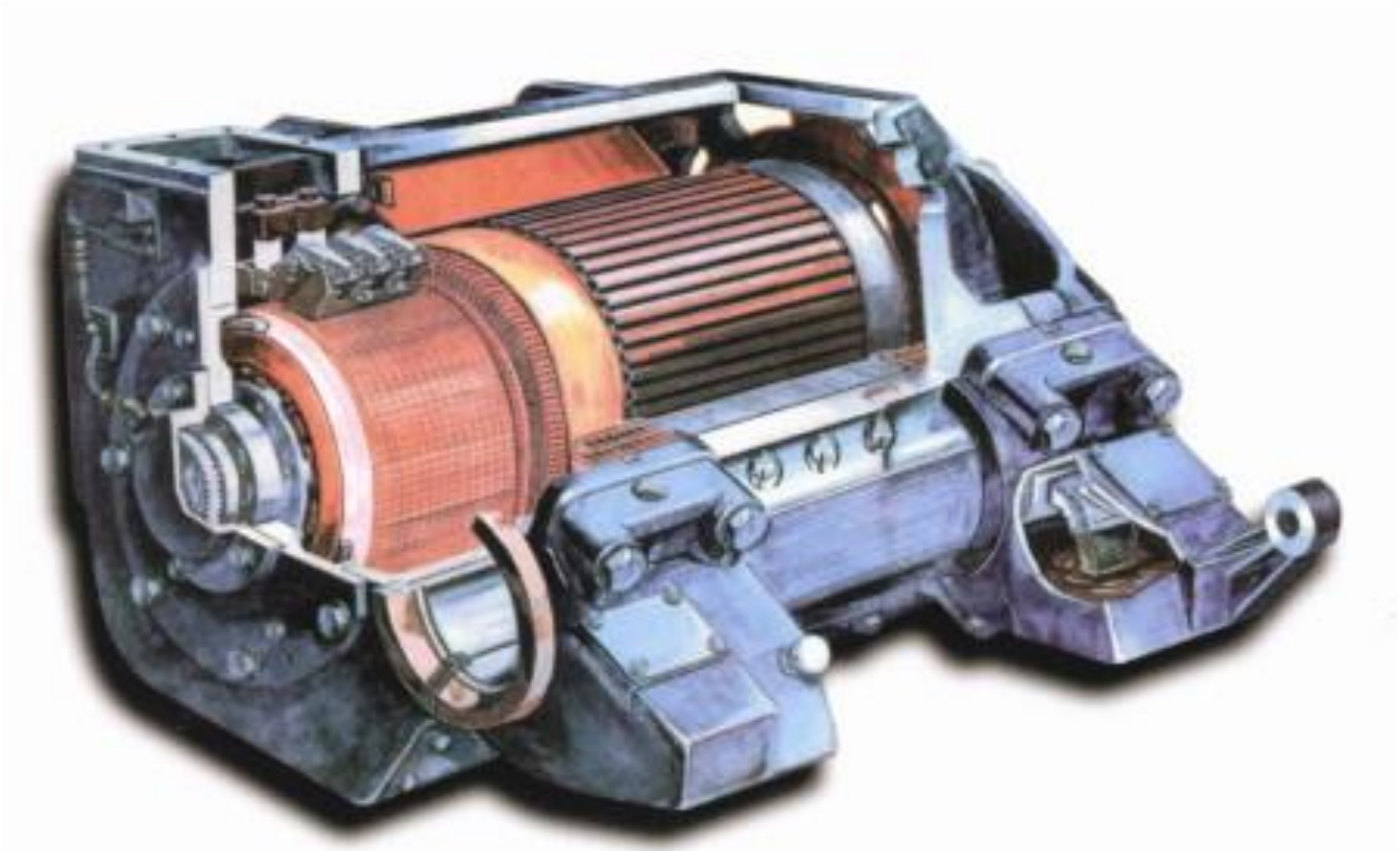
- ჯაგრისული ძრავა სტატორის გრაგნილით
- ჯაგრისული ძრავა მუდივმაგნიტიანი სტატორით
- უჯაგრისო

ადვილად სამართავი

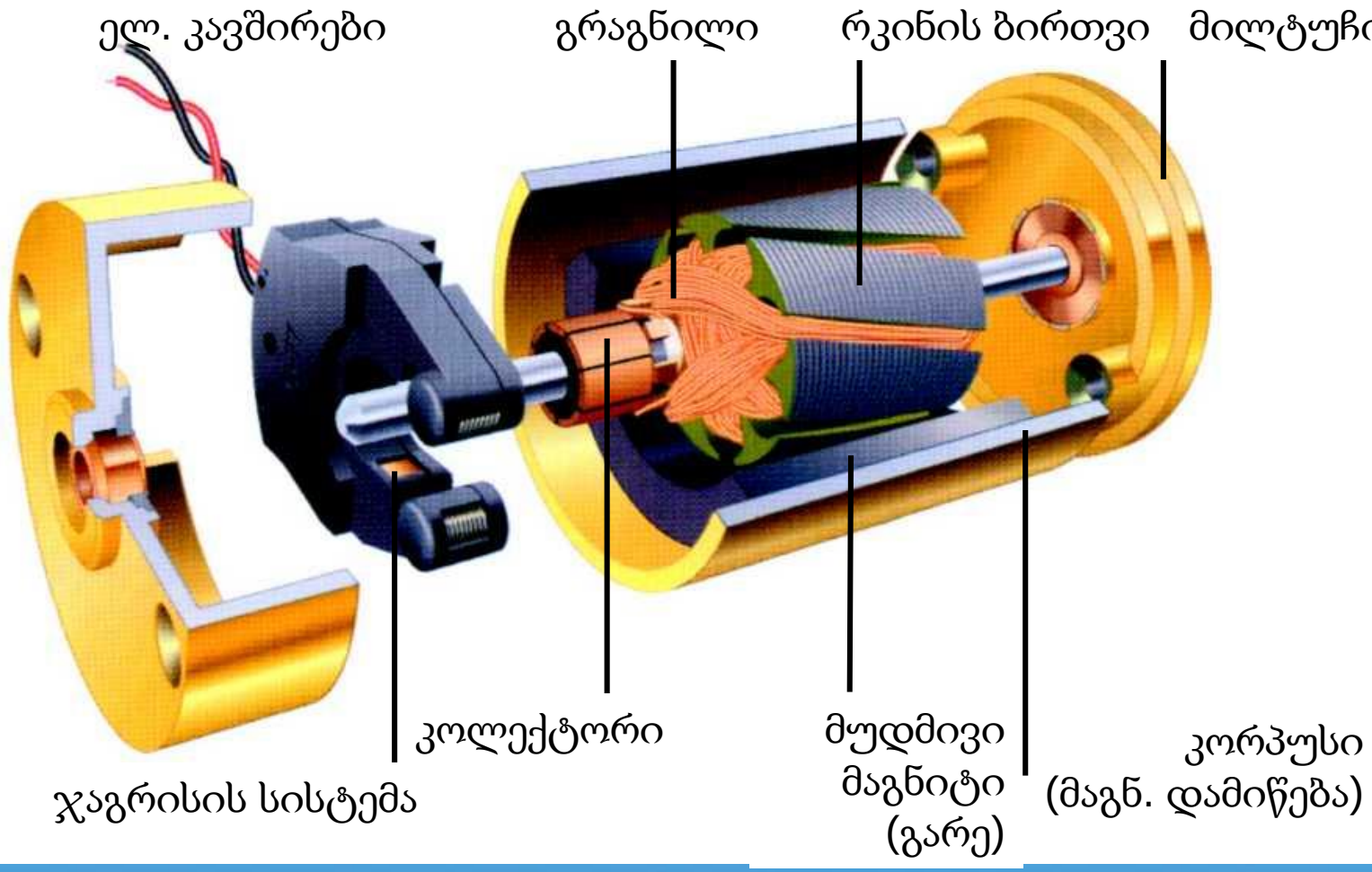
ტექნიკური მომსახურების მაღალი მოთხოვნები

დაბალი სანდოლობა (ჯაგრისის პრობლემები)

მუდმივი დენის ჯაგრისული ძრავები სტატორის გრაგნილით



ჩვეულებრივი, მუდმივმაგნიტური მუდმივი დენის სერვოძრავა



მუდმივმაგნიტური სინქრონული ძრავები(PMSM) / მუდმივი დენის ძრავები უჯაგრისო (BLDC) / ელექტრონულად კომუტირებული ძრავები (ECM)

ბევრი სახეობა გვხვდება, თუმცა უპირატესობას მუდმივმაგნიტურ სინქრონულ ძრავებს (PMSM) ანიჭებენ

- მუდმივი დენის ძრავის მსგავსად მოქმედებს, თუმცა, ჯაგრისი არ აქვს
  - სტატორის კონსტრუქცია ასინქრონული ძრავის მსგავსია (სამფაზიანი სტატორის გრაგნილი)
  - როტორში განთავსებულია მბრუნავი მუდმივი მაგნიტი
  - როტორის პოზიციის მიხედვით, სიმძლავრე სამ ფაზას მიეწოდება

- სინქრონული მუშაობა აღმოფხვრის ელექტრულ და მაგნიტურ დანაკარგებს როტორში - ჩვეულებრივ, ძრავის დანაკარგები 20%-ით მცირდება

- შესაძლოა, უფრო მომხიბვლელად მოგეჩვენოთ: ხარჯის შემცირება იაფი მაგნიტისა და მასობრივ წარმოებასთან ერთად შესაძლებელია

მუდმივმაგნიტური სინქრონული ძრავები (PMSM)

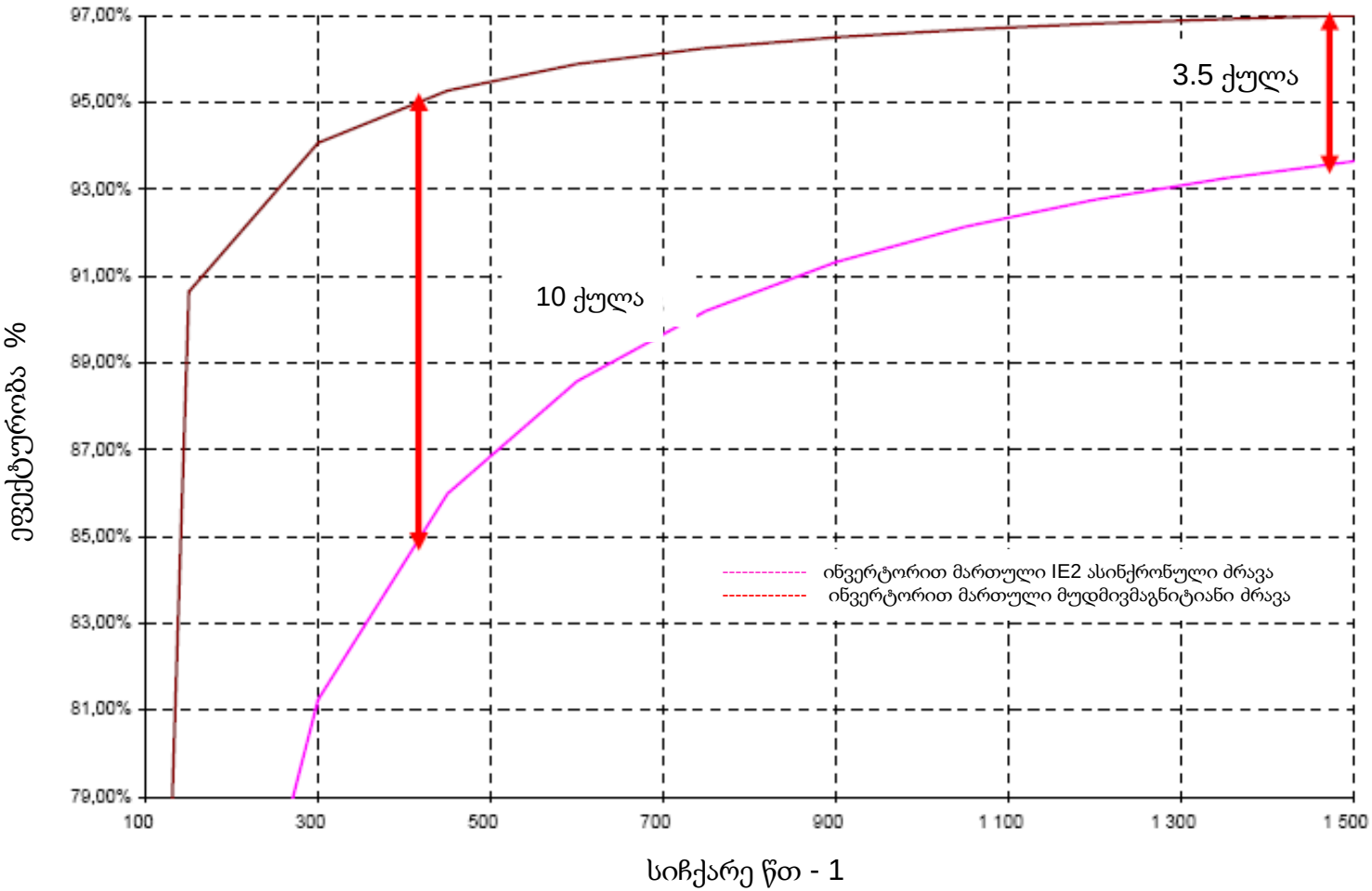
მუდმივი დენის/ ელექტრონულად კომუტირებული უჯაგრისო ძრავები

ძირითადი უპირატესობანი:

•მაბრუნი მომენტის სიჩქარის შესანიშნავი გრაფიკი (მაგ.: პირდაპირი გადაცემაც შესაძლებელია)
•შესანიშნავი დინამიური რეაქცია;
•მაღალი ეფექტურობა და სანდოობა=> ტექნიკური მომსახურების დაბალი საჭიროება;
•ხანგრძლივი გამძლეობა;
•მცირე აკუსტიკური ხმაური;
•მაღალი სიჩქარის განვითარების უნარი;
•მაბრუნი მომენტის/მოცულობის მაღალი შეფარდება ან სიმძლავრის მაღალი სიმჭიდროვე.

ძირითადი უარყოფითი მხარეები: მაღალი ხარჯი და ავტომატური რეგულატორის მუდმივი საჭიროება (ცვლადი სიჩქარის ამძრავი).

მუდმივმაგნიტური ძრავის ნაწილობრივი დატვირთვის ეფექტურობა (11 კვ)



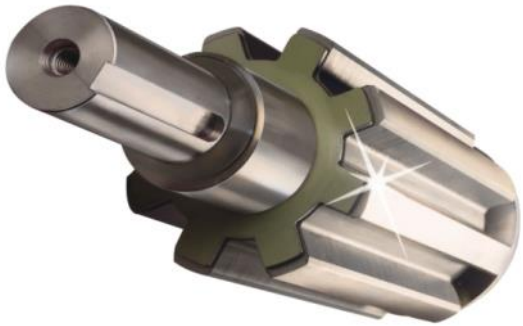
პირდაპირი გაშვების მუდმივმაგნიტური ძრავები

•ჰიბრიდული მაღალი ენერგიის მუდმივი მაგნიტებით (NeFeB*) გაწყობილი ძრავა ცხაურიანი როტორით პირდაპირი გაშვების საშუალებას იძლევა.

•ასინქრონულ ძრავებთან ურთიერთშენაცვლებადია (იგივე გამომავალი სიმძლავრე X სიხშირის თანაფარდობაზე)

*ნეოდიმის, რკინისა და ბორის შენადნობი

რეგულირებადი მაგნიტური წინაღობის მქონე ძრავები (SR)

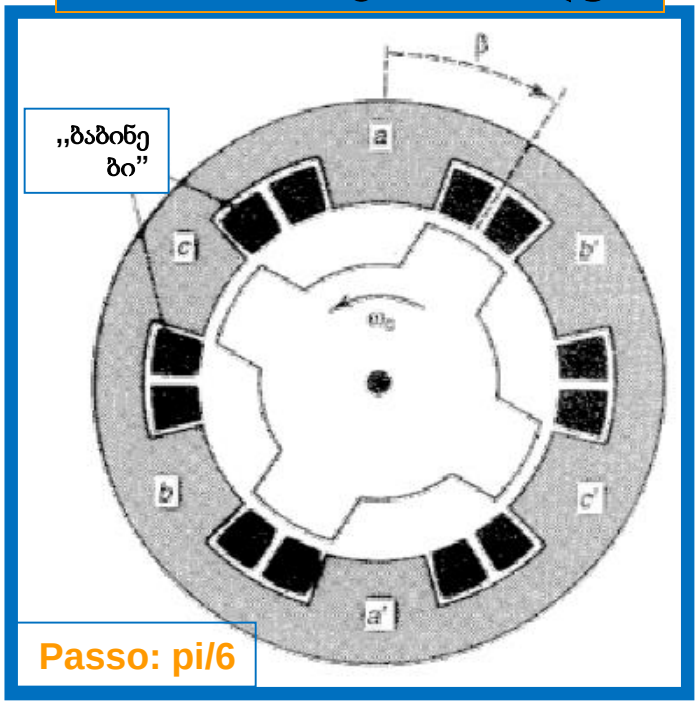


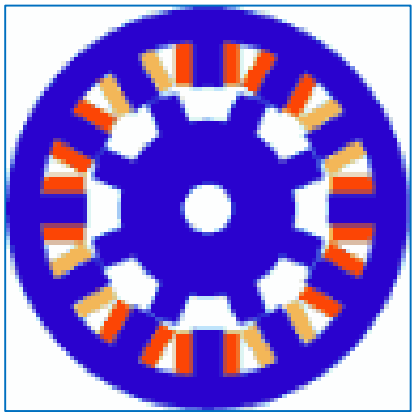
რეგულირებადი მაგნიტური წინაღობის მქონე ძრავა წარმოადგენს ძრავას წინ გამოშვერილი კონსტრუქციის ფაზური კოჭებით, რომლებიც განლაგებულია სტატორის საპირისპირო პოლუსების გარშემო, მთელ დიამეტრზე. ფაზისადმი ენერგიის მიწოდება როტორს სტატორის პოლუსებთან თანხვედრაში ამოძრავებს და ამგვარად მაგნიტური წინაღობის მინიმუმამდე დაყვანა ხდება. როგორც მაღალი ეფექტურობის ცვალებადი სიჩქარის ამძრავის შემთხვევაში, ძრავის მაგნიტური სისტემაც ოპტიმიზირებულია დახურულ მდგომარეობაში ფუნქციონირებისათვის. როტორის პოზიციის უკუკავშირის მეშვეობით ფაზისთვის ენერგიის ოპტიმალურად მიწოდება უპრობლემო, უწყვეტი მაბრუნი მომენტისა და მაღალი ეფექტურობის უზრუნველსაყოფად ხორციელდება.

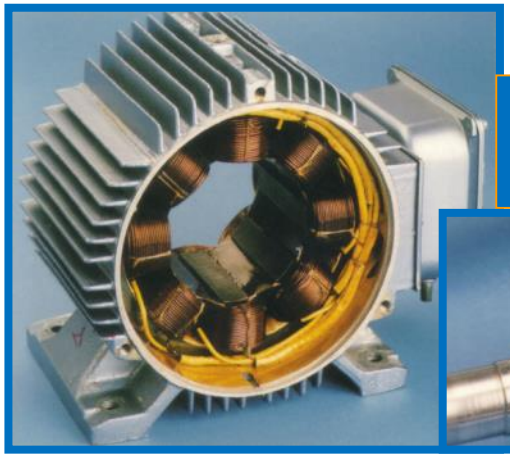
რეგულირებადი მაგნიტური წინაღობის მქონე ძრავები

სტატორი: 6 პოლუსი (3 ფაზა)

როტორი: 4 პოლუსი

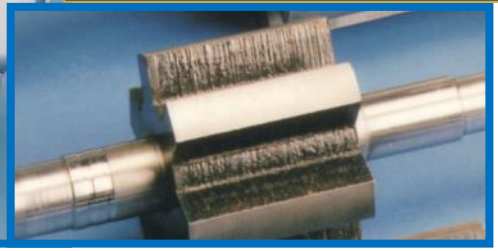






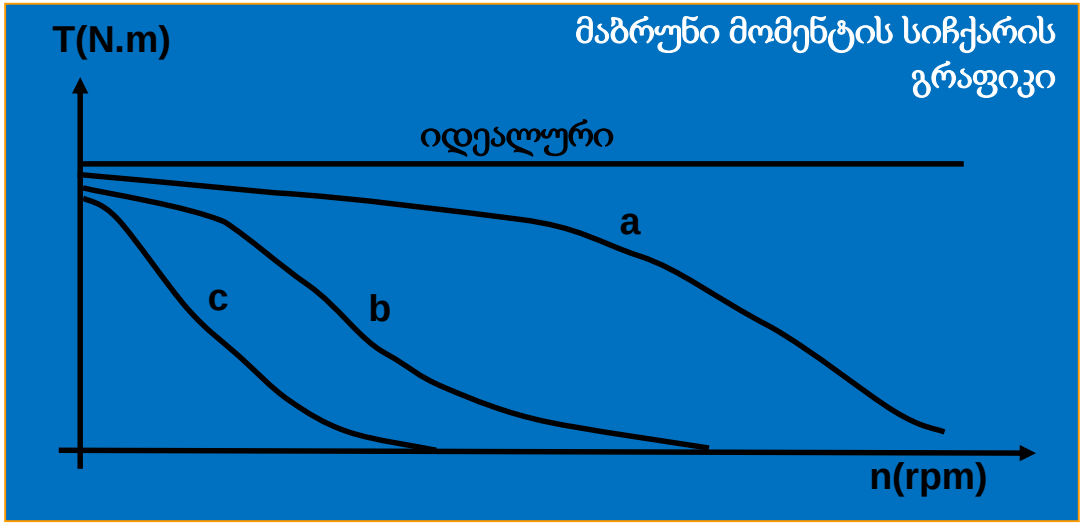
სტატორი: 8 პოლუსი

როტორი: 6 პოლუსი



რეგულირებადი მაგნიტური წინაღობის მქონე ძრავები

- 75 კვ.სთ.-მდე გამოყენება: მაღალსიჩქარიანი ცენტრიდანული მოწყობილობები, კომპრესორები, სარეცხი მანქანები, მტვერსასრუტები, ვაკუუმტუმბოები, HVAC*, ლითონსაჭრელი ჩარხები, ავტომატური მართვა, წევის/ელექტრო ძრავა და ა.შ.



* გათბობა, ვენტილაცია, კონდიცირება

რეგულირებადი მაგნიტური წინაღობის მქონე ძრავები

ძირითადი უპირატესობანი:

- მაღალი ეფექტურობა;
- მაღალი მაბრუნი მომენტისა და დიდი სიჩქარის განვითარების უნარი;
- მაღალი სანდოობა და ხანგრძლივი გამძლეობა;
- მარტივი კონსტრუქცია, სიმძლავრე;
- დაბალი ღირებულება;
- მარტივი მართვის რეგულატორი (1 შესაერთებელი);
- მაღალი სიმჭიდროვის სიმძლავრე;
- სხვადასხვა ფორმასა და ზომაში ხელმისაწვდომობა.

ძირითადი უარყოფითი მხარე: ნელი მაბრუნი მომენტი და მაღალი აკუსტიკური ხმიანობა, რომელიც გამოწვეულია ვიბრაციის მაღალი დონით – ამ ასპექტების გაუმჯობესების მიზნით ხორციელდება კვლევა. რეგულატორი მუდმივად საჭიროა.

მაგნიტური წინაღობის მქონე სინქრონული ძრავები

- მაგნიტური წინაღობის მქონე ახალი სინქრონული ძრავა (SynRM) და ამძრავის პაკეტები ოპტიმიზირებულია ტუმბოსა და ვენტილატორის გამოყენებისთვის
- ახალ როტორს არც მაგნიტები აქვს და არც გრაგნილები და შესაბამისად, არც სიმძლავრის დანაკარგის პრობლემა - ეს ყოველივე მას უნიკალურსა და განსაკუთრებულს ხდის
- ახალი როტორით აღჭურვილი სტანდარტული ასინქრონული ძრავა, რომელიც ახალი პროგრამული უზრუნველყოფით სტანდარტულ ამძრავთანაა კომბინირებული, შედეგად კი მაღალი გამავლობა და მაღალი ეფექტურობის მქონე ცვლადი სიჩქარის ამძრავი მოაქვს.

მაგნიტური წინაღობის მქონე სინქრონული ძრავები

უპირატესობები:

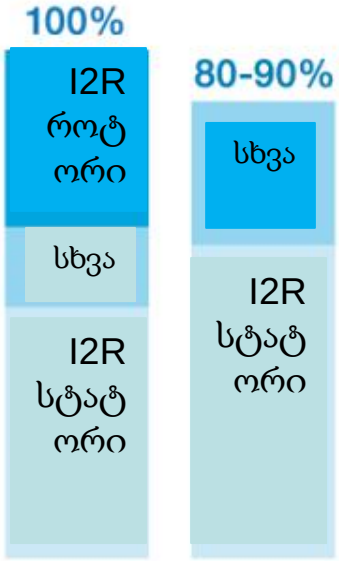
- როტორში არ გვხვდება გრაგნილი და მუდმივი მაგნიტი
- მცირე ინერცია
- აჩქარების, აქსელერაციის კარგი მაჩვენებელი
- ნაკადის შესუსტების წარმატებული ფუნქცია
- დაბალი საწარმოო ღირებულება

უარყოფითი მხარეები:

- მცირე სიმძლავრის ფაქტორი
- ნელი მაბრუნი მომენტი

მაგნიტური წინაღობის მქონე სინქრონული ძრავები

ტრადიციული ასინქრონული ძრავა



დანაკარგები

მაღალი გამავლობის, მაგნიტური წინაღობის მქონე სინქრონული ძრავები