

UDC 629.4

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-3-152-160>

ასინქრონული წვევის ძრავების მქონე მუდმივი და ცვლადი დენის ელექტრომოდრავი შემადგენლობების სიჩქარის ავტომატური ოპტიმალური რეგულირება

სერგო კარიპიდი- კარიბოვი	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო E-mail: s.karipidisi-karibovi@gtu.ge
ავთანდილ შარვაშიძე	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო E-mail: a.sharvashidze@gtu.ge
მირიან ცოცხალაშვილი	შპს „სპია ტექნიკ“ აშშ, კონტრაქტით დასაქმებული ინჟინერი, საქართველო E-mail: miriantsotskhalashvili05@gtu.ge
არჩილ ზერეკიძე	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის, ენერგეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი, საქართველო E-mail: archilzerekidze@gmail.com
გიორგი ცხომელიძე	საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის დოქტორანტი, საქართველო E-mail: tskhomelidze.giorgi22@gtu.ge

რეცენზენტები:

მ. გოცაძე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი
E-mail: m.gotsadze@gtu.ge

ნ. კერესელიძე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკის ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი
E-mail: nata.kereselidze@gmail.com

ანოტაცია. ნაშრომში გაანალიზებულია თანამედროვე მუდმივი და ცვლადი დენის ასინქრონულამდრავიანი ელექტრომოდრავი შემადგენლობების სიჩქარის რეგულირება და ამ ფუნქციის გან-

მახორციელებელი გარდამქმნელების ინვერტორებზე ძაბვის ცვლილების დღემდე არსებული ხერხები. ნაჩვენებია აღნიშნულ გარდამქმნელებში ძაბვის რეგულირებისთვის გამოყენებული განვიმპულსური მოდულაციის ნაკლოვანი მხარეები;

ცვლადი ძაბვის ნახევარპერიოდის განმავლობაში ინვერტორის ტრანზისტორები მრავალჯერ ჩაირთვება და გამოირთვება, რაც ამცირებს თვით ინვერტორის მარგი ქმედების კოეფიციენტს (მქკ), რამდენადაც ძაბვის ვარდნა IGBT ტიპის (6500 ვ, 600 ა) ძალურ ტრანზისტორებზე 4 - 7 ვ-ის ტოლია. გარდა ამისა, ეს ყოველივე საჭიროებს ურთულეს მართვის სისტემას. დაბალია ასევე ასინქრონული წვეის ძრავას მქკ, მკვებავი სამფაზა ძაბვის არასინუსოიდური ფორმის გამო. შემოთავაზებულია ძაბვისა და სიხშირის ოპტიმალური რეგულირების კონკრეტული სქემები ორივე სისტემის (მუდმივი და ცვლადი) ელექტრომოდრავი შემადგენლობისთვის.

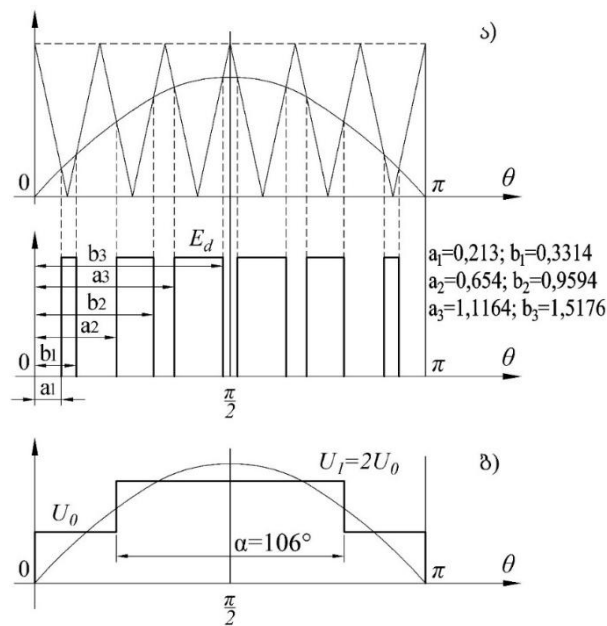
საკვანძო სიტყვები: ავტომატური რეგულირება; ასინქრონული ამძრავი; გარდამქმნელი; ელექტრომოდრავი შემადგენლობა; ინვერტორი; მუდმივი დენი; ოპტიმალური; სიჩქარის რეგულირება; ცვლადი ძაბვა.

შესავალი

აუცილებელად უნდა აღინიშნოს, რომ დღემდე მუდმივი და ცვლადი დენის სისტემებში, სადაც ამძრავად გამოყენებულია მუდმივი და პულსირე-

ბული დენის მიმდევრობითი აგზნების კოლექტორიანი წვეის ძრავები, ელექტრომოდრავი შემადგენლობის (ემშ) სიჩქარის რეგულირება ხდება წვეის ძრავას ღუზის ბრუნთა რიცხვის ცვლილებით. ეს უკანასკნელი ხორციელდება ძრავას მკვებავი ძაბვისა და მაგნიტური ნაკადის ცვლილების ხარჯზე. კონტაქტორულ-რეოსტატული მართვის ემშ-ზე ძრავას მკვებავი ძაბვის ცვლილება ხდება ღუზის წრედში მიმდევრობით ჩართული წინაღობის (ე.წ. გამშვები რეოსტატის) საშუალებით, ხოლო მაგნიტური ნაკადის ცვლილება – აგზნების გრაგნილის დაშუნტებით (აგზნების გრაგნილის პარალელურად დამატებითი წინაღობის ჩართვით). რაც შეეხება ასინქრონულ წვეისძრავებთან ემშ-ს, ასეთ სისტემებშიც სიჩქარის რეგულირება ხორციელდება ასინქრონული წვეის ძრავების ბრუნთა რიცხვის ცვლილების ხარჯზე, რაც მოითხოვს განსაკუთრებულ პირობებს.

ასინქრონული ძრავას საუკეთესოდ გამოყენებისა და მისი მუშაობისას მაღალი ენერგეტიკული მაჩვენებლების – სიმძლავრის კოეფიციენტის, მარგი ქმედების კოეფიციენტის, გადატვირთვის უნარის მისაღებად აუცილებელია სიხშირესთან ერთად იცვლებოდეს მკვებავი ძაბვაც.



სურ. 1. გიმ ფორმირებული სინუსოიდური ა), და ძაბვის ოპტიმალური ფორმის ბ),
დიაგრამები ასინქრონული მრავალფაზის.

ამასთან ერთად ძაბვის ცვლილების კანონი დამოკიდებულია დატვირთვის ხასიათზე. მაგალითად, მუდმივი დატვირთვისას $M(F) = Const$, სტატორზე მიწოდებული ძაბვა უნდა შეიცვალოს სიხშირის პროპორციულად, შემდეგი დამოკიდებულებით:

$$\frac{U}{f} = Const. \quad (1)$$

ვენტილატორული (პარაბოლისებური $M(F) = n^2$) დატვირთვისას ამ დამოკიდებულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$\frac{U}{f^2} = Const. \quad (2)$$

ეს პირობა (1) და (2) უზრუნველყოფს მომენტის (წევის ძალის) მუდმივობას ამძრავის ამუშავებისას, რამდენადაც:

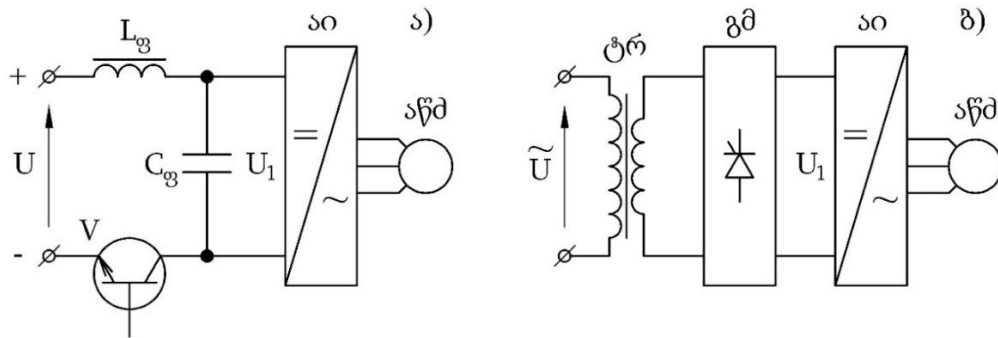
$$F = M \equiv \frac{U^2}{f^2} = \frac{U}{f}. \quad (3)$$

აუცილებელია აღინიშნოს, რომ დღემდე არსებულ ემშ-ებზე მომუშავე ავტონომიური ინვერ-

ტორებიდან მიღებული მკვებავი ძაბვის სიდიდე იცვლება 1-ელ, ა სურ-ზე ნაჩვენები განვიმპულსური მოდულაციის (გიმ) რთული სისტემის მეშვეობით. როგორც სურათიდან ჩანს, ნახევარპერიოდის განმავლობაში ინვერტორის ტრანზისტორები მრავალჯერ ჩაირთვება და გამოირთვება, რაც ამცირებს თვით ინვერტორის მქკ-ს, რამდენადაც ძაბვის ვარდნა IGBT ტიპის (6500 ვ, 600 ა) ძალურ ტრანზისტორებზე 4 - 7 ვ-ის ტოლია. გარდა ამისა, ეს ყოველივე საჭიროებს ურთულეს მართვის სისტემას.

ძირითადი ნაწილი

წარმოდგენილ ნაშრომში გიმ-ის ნაცვლად შემოთავაზებულია ძაბვის რეგულირების უმარტივესი სისტემები. მე-2 სურ-ზე ნაჩვენებია ეს სქემები ორივე სისტემის ემშ-სთვის.



სურ. 2. ავტონომიური ინვერტორის მკვებავი ძაბვის რეგულირების სქემები ემშ-ს ორივე სისტემისათვის: მუდმივი დენის ა), ცვლადი დენის ბ). შენარჩუნებულია ინვერტორიდან მიღებული ცვლადი ძაბვის ოპტიმალური ფორმა.

პირობითი აღნიშვნები სურათზე: აი - ავტონომიური ინვერტორი, აწმ - ასინქრონული წევის ძრავა, გმ - გამმართველი, ტრ - ტრანსფორმატორი.

როგორც მე-2, ა სურ-დან ჩანს, ფილტრის (L_g , C_g) და V ტრანზისტორის საშუალებით ინვერტორს მიეწოდება მუდმივი U ძაბვა. V ტრანზისტორი მუშაობს განივ-იმპულსურ რეჟიმში. ავტომატური რეგულირების სისტემის მოთხოვნის შესაბამისად, ტრანზისტორი არეგულირებს ინვერტორის კვებისათვის საჭირო ძაბვას.

მე-2, ბ სურ-ზე მოცემულია ცვლადი დენის სისტემის ემშ-ს სქემა. როგორც სქემიდან ჩანს, ინვერტორის კვებისათვის საჭირო ძაბვას უზრუნველყოფს მარტივი გამმართველი „გმ“ ჩვეულებრივი ტირისტორებით.

ქვემოთ მოკლედ განვიხილოთ სიჩქარის ავტომატური რეგულირების სტრუქტურული სქემები ორივე სისტემაში.

როგორც ცნობილია, ასინქრონულ წევის ძრავას აქვს ისეთივე ხისტი მახასიათებლები, როგორიც მუდმივი დენის დამოუკიდებელი აგზნების კოლექტორულ წევის ძრავას. ამის გამო ასეთი ტიპის ძრავები მიმდევრობით ან პარალელური ჩართვით

მარტივად ხელით არ იმართება, ორივე შემთხვევაში აუცილებელია ძრავებს შორის დატვირთვის მათანაბრებელი რთული ავტომატური სისტემა. მაგალითად, მუდმივი დენის მიმდევრობითი აგზნების ძრავას ეს ყოველივე არ სჭირდება. ძრავების ნებისმიერი რიცხვის შემთხვევაში მათ შეუძლიათ იმუშაონ პარალელური და მიმდევრობითი ჩართვით ყოველგვარი დამატებითი დატვირთვის მათანაბრებელი მოწყობილობის გარეშე.

მე-3 სურ-ზე მოცემულია ასინქრონული წევის ძრავების მქონე მუდმივი დენის ემშ-ს სიჩქარის ავტომატური რეგულირების სისტემის სტრუქტურული სქემა. როგორც სურათიდან ჩანს, ძალური სქემა შედგება ფილტრისაგან (L_g , C_g), ძალური IGBT ტრანზისტორის (V) 6500 ვ, 600 ა, ავტონომიური ინვერტორისაგან (აი) და ასინქრონული წევის ძრავებისაგან (აწმ).

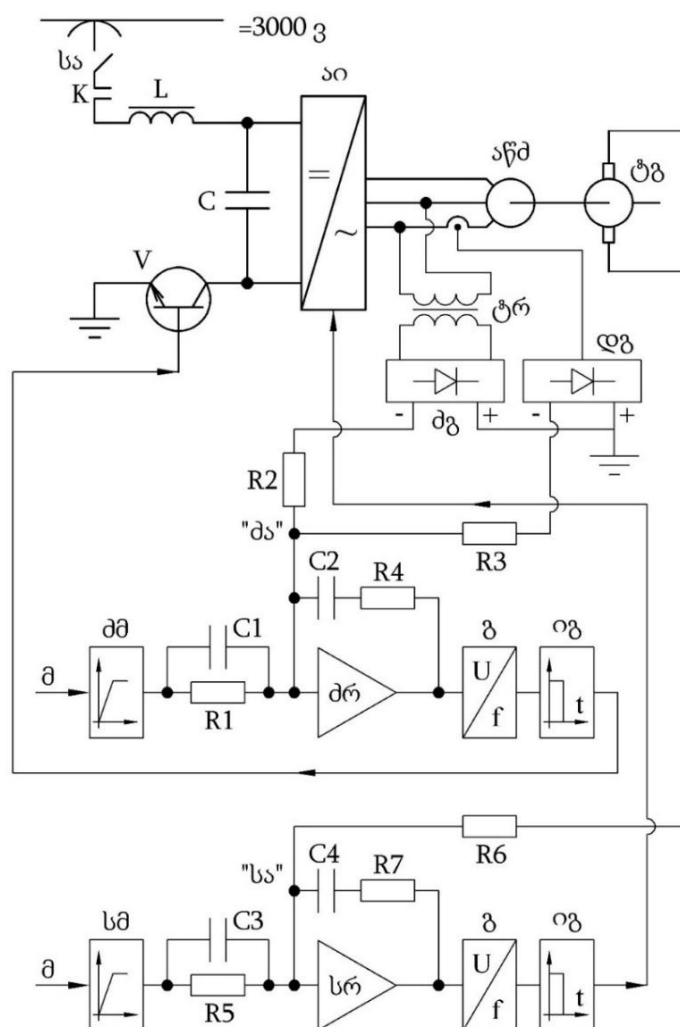
სიჩქარის რეგულირების სისტემა შედგება ორი შტოსაგან (არხისაგან): ერთი ძაბვის (ძმ) რეგულირების და მეორე სიხშირის (სმ) რეგულირების.

ასინქრონული ძრავას ძაბვა იზომება ძაბვის გადამწოდის (ძგ) საშუალებით, სიხშირე - ტაქოგენერატორის (ტგ) საშუალებით, რამდენადაც:

$$f = \frac{P \cdot n}{60}; \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi n}{P} f. \quad (4)$$

მაბვის (მბ) და სიხშირის (ტბ) სიგნალები მიეწოდება მაბვის (მა) და სიხშირის (სა) შესაბამის არხებს. მაბვისა და სიხშირის მავალელების დახმა-

რებით ეს პარამეტრები თანაბრად (პროპორციულად) მაღლდება იმგვარად, რომ ფარდობა U/f რჩება მუდმივი.



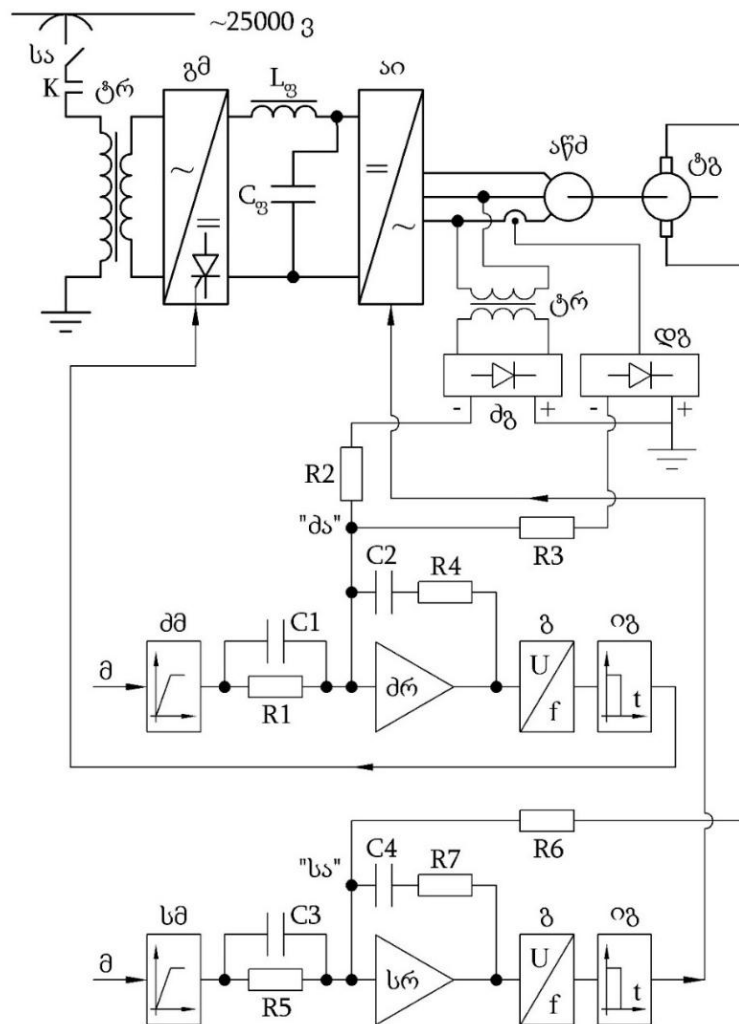
სურ. 3. მუდმივი დენის ასინქრონულ წვეისძრავებიანი ემშ-ს სიჩქარის ავტომატური

რეგულირების სისტემის სტრუქტურული სქემა.

წინა სურათისგან განსხვავებული პირობითი აღნიშვნები: გ - გარდამქმნელი, დგ - დენის გადამწოდი, იგ - იმპულსური გარდამქმნელი, მ - მავალელები სიგნალი, სა - სიხშირის არხი, სმ - სიხშირის მავალელები, სრ - სიხშირის რეგულატორი, ტბ - ტაქოგენერატორი, მა - მაბვის არხი, მბ - მაბვის გადამწოდი, მრ - მაბვის რეგულატორი.

მე-4 სურ-ზე მოცემულია სიჩქარის ავტომატური რეგულირების სისტემის სტრუქტურული სქემა ცვლადი დენის ემშ-სთვის. როგორც სურათიდან ჩანს, ძალური ნაწილი შედგება წვეის ტრანსფორმატორისაგან (ტრ), მართვადი გამმართველისაგან (გმ), ფილტრისაგან ($L_{ფ}$, $C_{ფ}$), ავტონომიური ინვერ-

ტორისა (აი) და ასინქრონული წვეის ძრავასაგან (აწმ). ავტონომიური ინვერტორის (აი) კვების ძაბვა რეგულირდება მართვადი გამმართველის (გმ) საშუალებით, ხოლო სიხშირე - სიხშირის ავტომატური რეგულირების სისტემით.



სურ. 4. ცვლადი დენის ასინქრონულ წვეისძრავებიანი ემშ-ს სიჩქარის ავტომატური რეგულირების სისტემის სტრუქტურული სქემა.

მე-3 და მე-4 სურათიდან ჩანს, რომ ორივე სისტემის ემშ-სთვის სიჩქარის ავტომატური რეგულირების სისტემები ერთნაირია.

დასკვნა

შემოთავაზებულია ინვერტორების ძაბვის რეგულირების ოპტიმალური ხერხი ემშ-ს ორივე, მუდმივი და ცვლადი დენის სისტემებისთვის,

თვით ინვერტორის და წევის ძრავას ამალელებული მქვ-ით, რაც მიღწეულია ძაბვის ფორმით, რომელიც ახლოს არის სინუსოიდასთან;

წარმოდგენილია მუდმივი და ცვლადი დენის სისტემის ემშ-ს ინვერტორებში ძაბვისა და სიხშირის ავტომატური რეგულირების სისტემის კონკრეტული სქემები, რომლებშიც გამოყენებულია მაკორექტირებელი მოწყობილობა „პიდ“ რეგულატორი.

ლიტერატურა

1. *Transport and Mechanical Engineering*. (2025). Optimal speed control in traction electric drives of DC and AC systems with asynchronous traction motors. *Transport and Mechanical Engineering*, 2(63), 5–10.
2. Karipidis, S., & Sanikidze, J. (2014). *Fundamentals of electric traction*. Tbilisi Technical University.
3. Rotanov, N. A. (Ed.). (1991). *Electric rolling stock with asynchronous traction motors*. Transport.
4. Rotanov, N. A. (Ed.). (1991). *Electric rolling stock with asynchronous traction motors*. Transport.
5. Zarifyan, A. A. (Ed.). (2013). *Asynchronous traction drive of locomotives*.
6. Karipidis, S. I. (2015). *Static converters of electric rolling stock*. Technical University.
7. Karipidis, S. I. (2012). *Dynamics of nonlinear systems of direct current traction electric drive*. Technical University.

UDC 629.4

SCOPUS CODE 2201

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-3-152-160>

Automatic Optimal Speed Control of DC and AC Electric Rolling Stock with Asynchronous Traction Motors

- Sergo Karipidis-Karibov** Georgian Technical University, Faculty Of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor, Georgia
E-mail: s.karipidisi-karibovi@gtu.ge
- Avtandil Sharvashidze** Georgian Technical University, Faculty Of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor, Georgia
E-mail: a.sharvashidze@gtu.ge
- Mirian Tsotskhalashvili** "Spia Technik" LLC, USA, Contract Engineer, Georgia
E-mail: miriantsothkhalashvili05@gtu.ge
- Archil Zerekidze** Georgian Technical University, Faculty of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor, Georgia
E-mail: archilzerekidze@gmail.com
- Giorgi Tskhomelidze** Georgian Technical University, Faculty Of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor, Georgia
E-mail: tskhomelidze.giorgi22@gtu.ge

Reviewers:

M. Gotsadze, Georgian Technical University, Faculty of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor

E-mail: m.gotsadze@gtu.ge

N. Kereselidze, Georgian Technical University, Faculty of Transport Systems and Mechanical Engineering, Professor

E-mail: nata.kereselidze@gmail.com

Abstract. The paper analyzes the speed control of modern electric rolling stock of direct current and alternating current with an asynchronous traction drive, as well as the currently existing methods of voltage variation in converter inverters that implement this function. The disadvantages of pulse-width modulation used for voltage regulation in the specified converters are shown; during one half-period of alternating voltage, the inverter transistors are repeatedly switched on and off, which reduces the efficiency (η) of the inverter itself, since the voltage drop across IGBT-type power transistors (6500 V, 600 A) is 4–7 V. In addition, all of this requires an extremely complex control system. The efficiency of the asynchronous traction motor is also low due to the non-sinusoidal

form of the supplied three-phase voltage. Specific circuit schemes for optimal voltage and frequency regulation are proposed for electric rolling stock of both types (direct current and alternating current).

Keywords: Alternating Voltage, Automatic Regulation, Asynchronous Drive, Converter, Invertor direct Current, Speed Control, Alternating Voltage.

განხილვის თარიღი 12.06.2026

შემოსვლის თარიღი 22.06.2026

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2026