

UDC 621.31-21

SCOPUS CODE 2102

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-2-164-171>

## აირტურბინული კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის ახალი შესაძლებლობები

**თემურ მიქიაშვილი** თბოენერგეტიკისა და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75  
E-mail: temurmikiashvili@yahoo.com

**ნინო ჩაღმელაშვილი** თბოენერგეტიკისა და ენერგოეფექტურობის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 75  
E-mail: chagmela@gmail.com

### რეცენზენტები:

**თ. ჯიშკარიანი**, სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის პროფესორი  
E-mail: tengish@yahoo.com

**თ. მუსელიანი**, სტუ-ის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის პროფესორი  
E-mail: museliani@yahoo.com

**ანოტაცია.** ელექტროსისტემების მუშაობის ეფექტიანობის განმსაზღვრელი ფაქტორი მათი სტაბილურობაა. სტაბილურობის უზრუნველსაყოფად მნიშვნელოვანია მეზობელი ელექტროსისტემების დაკავშირება, ელექტროსადგურების გადატვირთვისა და განტვირთვის შესაძლებლობების გაძლიერება, დანადგარების სამანევრო მაჩვენებლების გაუმჯობესება და სხვა.

მაღალი ავტონომიურობის ელექტროსისტემებისთვის მნიშვნელოვანია ასევე სიმძლავრის რეგულირების ამოცანების გადაწყვეტა სისტემაში არსებული დანადგარებით, მათ შორის კომბინირებული

ციკლის ენერგობლოკებით, რომელთა ძირითადი დანიშნულება საბაზისო დატვირთვის დაფარვაა. ავტორებმა ჩატარებული კვლევებით აჩვენეს, რომ ელექტროსისტემების დატვირთვის რეგულირების ამოცანების გადაწყვეტა შესაძლებელია აირტურბინული კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების გამოყენებით. ამისათვის საჭიროა ასეთი ენერგობლოკების ღრმა განტვირთვის შესაძლებლობების გამოვლენა და რეალიზება. სტანდარტულ პირობებში კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკებს იყენებენ საბაზისო დატვირთვის დაფარვისთვის და არ განიხილავენ მათ მონაწილეობას ელექტროსისტემების დატვირთვის სადღეღამისო რეგულირებაში. თუმცა

სიმძლავრის მართვის კომბინირებული მეთოდის კონცეფცია, რომელიც შემოგვთავაზებს სტატიის ავტორებმა, ითვალისწინებს აირტურბინული კომპონენტის რეგულირების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მეთოდების შეხამებას, რაც მნიშვნელოვნად აფართოებს ასეთი ენერგობლოკების განტვირთვის დიაპაზონს და ზრდის მათ ჩართულობას ელექტროსისტემის დატვირთვის რეგულირებაში.

**საკვანძო სიტყვები:** აირტურბინა, განტვირთვა, დანადგარი, ელექტროსისტემა, ენერგობლოკი, კომბინირებული, ციკლი.

### შესავალი

თანამედროვე თბოელექტროსადგურებში სათბობის ქიმიური ენერჯიის ელექტრულ ენერჯიად გარდაქმნისთვის ფართოდ იყენებენ აირი-ორთქლის კომბინირებული ციკლის დანადგარებს, რომელშიც აირისა და ორთქლის ტურბინები ერთმანეთს ორთქლის ქვაბ-უტილიზატორით უკავშირდება: აირტურბინებში ნამუშევარი აირები მიემართება ორთქლის ქვაბ-უტილიზატორში, რომლის ორთქლწყლიან ტრაქტში ჩართულია ორთქლის ტურბინა (ტურბინები). ნამუშევარი აირების სითბოს ხარჯზე ქვაბ-უტილიზატორში მიიღება მაღალი პარამეტრების წყლის ორთქლი, რომელიც მიემართება ორთქლის ტურბინაში, ხოლო გაგრილებული აირები გადადის ატმოსფეროში. ასეთ ციკლებში, რომლებსაც აირტურბინულ კომბინირებულ ციკლებსაც უწოდებენ, ელექტროენერჯიას გამოიმუშავენ როგორც აირტურბინა (აირტურბინები), ისე ორთქლის ტურბინა (ტურბინები). ამას-

თან, სათბობის წვა ხორციელდება მხოლოდ აირტურბინებში (აქ არ განვიხილავთ შუალედურ შემთხვევას, როდესაც ორთქლის ტურბინების სიმძლავრის ფორსირებისთვის ქვაბ-უტილიზატორებზე იყენებენ დამატებითი სათბობის წვის სანთურებს). შესაბამისად, აირი-ორთქლის კომბინირებული ციკლის დანადგარების (ენერგობლოკები) სითბური ეფექტიანობა უფრო მაღალია (47–62%), ვიდრე განმხოლოებული რენკინის ციკლის დანადგარების (40–45%). მაღალი სითბური ეფექტიანობის გამო, კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკებს იყენებენ ელექტროსისტემების საბაზისო დატვირთვის დაფარვისთვის და არა ცვლადი დატვირთვების უზრუნველსაყოფად. ასეთი მიდგომის გამო, კომბინირებულ ციკლში აირტურბინების სიმძლავრის მართვის ალგორითმი შედგენილია ისე, რომ ის ითვალისწინებს დანადგარების მხოლოდ უმნიშვნელო განტვირთვას [1,2], რომლის დროსაც ინარჩუნებენ აირტურბინ(ებ)ის მაღალ საწყის და საბოლოო ტემპერატურებს (ნამუშევარი აირების ტემპერატურა), რათა მაქსიმალურად გამოიყენონ აირების სითბური პოტენციალი და ენერგობლოკის ეფექტიანობა შეინარჩუნონ მაღალ ნიშნულზე. მაგრამ, დანადგარების უფრო ღრმა განტვირთვა (ამორთვის გარეშე) შეუძლებელია, რადგან საბაზისო დატვირთვაზე ორიენტირებული მართვის ალგორითმი ამის საშუალებას არ იძლევა.

საქართველოს ელექტროსისტემაში კომბინირებული ციკლის თბოელექტროსადგურის ექსპლუატაციის (გარდაბანი-1) პრაქტიკამ აჩვენა, რომ, ხშირ შემთხვევებში, საჭიროა ენერგობლოკის ღრმა განტვირთვა, რომლის საშუალებას არ იძლევა სიმძლავრის მართვის სტანდარტული ალგორითმი. იმავე

დროულად, ღია ციკლით მოქმედ აირტურბინულ ენერგობლოკებზე შესაძლებელია დანადგარის ღრმა განტვირთვა, რამდენადაც აქ არ დგას ნამუშევარი აირების მაღალი ტემპერატურის შენარჩუნების ამოცანა.

სტატიის ავტორთა მიზანია კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკის სიმძლავრის მართვის ისეთი სცენარის შემუშავება, რომელიც თავისუფალი იქნება სტანდარტული ალგორითმის შეზღუდვებისგან და, როგორც ღია ციკლის ენერგობლოკებზე, შექმნის კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების ღრმა განტვირთვის შესაძლებლობას. ამ ამოცანის გადაწყვეტისთვის საკვანძო საკითხია აირტურბინების წვის კამერის დატვირთვის მოდელირება, რომლითაც დადგინდება კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის თეორიული საზღვრები მართვის არასტანდარტული (ახალი) სცენარის გამოყენებისას.

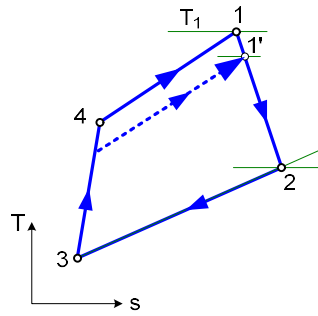
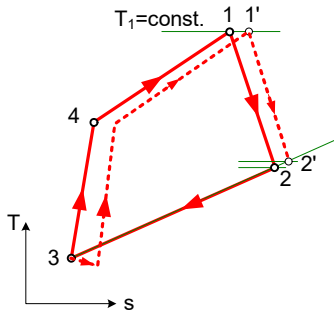
### ძირითადი ნაწილი

#### კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების სიმძლავრის მართვა

სტანდარტული სტრუქტურის (2 აირტურბინა, 2 ქვაბ-უტილიზატორი, 1 ორთქლის ტურბინა) კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკის სიმძლავრის მართვის ალგორითმი ითვალისწინებს მის განტვირთვისას ~73%-მდე დანადგარების ამორთვის გარეშე და განტვირთვისას ~41%-მდე ნაწილი დანადგარების ამორთვით, რაც ხორციელდება ე.წ. საბოლოო ტემპერატურის მართვის პროგრამით (რაოდენობ-

რივი რეგულირება). ამ პროგრამით განტვირთვისთვის აირტურბინების წვის კამერაში პროპორციულად ამცირებენ ჰაერისა და სათბობის მიწოდებას, რა დროსაც აირების საწყისი ტემპერატურა პრაქტიკულად უცვლელია, ხოლო ნამუშევარი აირების ტემპერატურა იზრდება 2-დან 2' ტემპერატურამდე (სურ. 1, ა). ნამუშევარი აირების ტემპერატურის გადიდება იწვევს ქვაბ-უტილიზატორის ორთქლგადამხურებელი ზედაპირების გადახურებას და ამჟამად გამოყენებული ლითონებისთვის შეზღუდულია ~610–630°C-ით. ეს, თავის მხრივ, ზღუდავს კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის სიდიდეს. ღია ციკლის აირტურბინული ენერგობლოკების განტვირთვისას წვის კამერაში ამცირებენ სათბობის მიწოდებას ჰაერის მიწოდების შეუცვლელად, რა დროსაც მცირდება აირების საწყისი ტემპერატურა (ხარისხობრივი რეგულირება) ნამუშევარი აირების უცვლელი ტემპერატურის პირობებში (უკანასკნელი შესაძლებელია დავაფიქსიროთ ჩვენთვის სასურველ მნიშვნელობაზე წვის კამერაში სათბობისა და ჰაერის მიწოდების რეგულირებით (სურ. 1, ბ).

ზემოთ ნაჩვენები ხარისხობრივი დამოკიდებულების რაოდენობრივში გადაყვანა, რაც საჭიროა კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის თეორიული საზღვრების დასადგენად, მოითხოვს წვის კამერის სითბურ მოდელირებას და გაანგარიშებითი კვლევის ჩატარებას, რომლის შედეგები ნაჩვენებია ქვემოთ.



ა) კომბინირებული ციკლი: რაოდენობრივი რეგულირება (საბოლოო ტემპერატურის მართვის პროგრამით)

ბ) ღია ციკლი: ხარისხობრივი რეგულირება

სურ. 1. ტემპერატურების ცვლილება აირტურბინული ენერგობლოკის განტვირთვისას კომბინირებულ და ღია ციკლში:

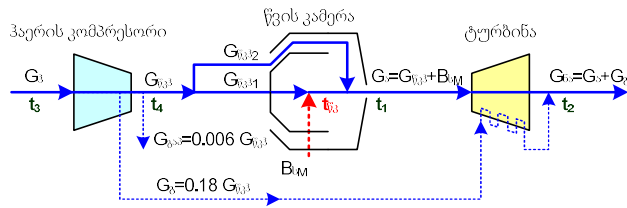
— ნომინალური დატვირთვა; - - - - - არასრული დატვირთვა

**აირტურბინული დანადგარის წვის კამერის სითბური მოდელი**

წვის კამერის სითბური მოდელი, რომლის ფარგლებშიც განხორციელდა ბალანსური გაანგარიშება, მოცემულია ქვემოთ:

- ბუნებრივი აირის მასური ხარჯი წვის კამერაში –  $B_{LM} = Q_{ბ.ა.ტ} * \rho_{ბ} / Q_{უღ}$  კგ ბ.ა./წმ;
- პირველადი ჰაერის მასური ხარჯი წვის კამერაში –  $G_{წკჰ1} = q_{წკჰ1} B_{LM}$ , კგ ჰ/წმ, სადაც  $q_{წკჰ1}$  არის პირველადი ჰაერის ნამდვილი რაოდენობა 1 მ<sup>3</sup> სათბობზე, სტმ<sup>3</sup> ჰაერი/სტმ<sup>3</sup> ბ.ა. (მიიღება წვის პროცესის სტექიომეტრიული გაანგარიშებით);
- ბუნებრივი აირის წვის ტემპერატურა (წვის კამერაში) –  $t_{წკ}$ , °C;
- მეორეული ჰაერის მასური ხარჯი წვის კამერაში (სითბ. ბალანსიდან)  $G_{წკჰ2} = (G_{წკჰ1} + B_{LM}) (c_{pჰ} T_{წკ} - c_{pჰ} T_1) / (c_{pჰ} T_1 - c_{pჰ} T_4)$ , კგ ჰ/წმ;

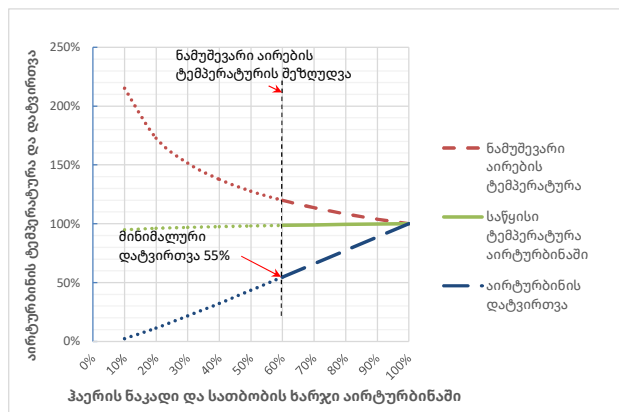
- ჰაერის სრული მასური ხარჯი წვის კამერაში –  $G_{წკჰ} = G_{წკჰ1} + G_{წკჰ2}$ , კგ ჰ/წმ;
- ჰაერის ხარჯი აირტურბინების ნიჩბების გაგრილებისთვის –  $G_{გ} = 0.18 G_{წკჰ}$ , კგ ჰ/წმ (სტანდარტულია ჰაერით საგრილებელი აირტურბინებისთვის);
- ჰაერის გაპარვა კომპრესორის შემჭიდროებიდან –  $G_{გაპ} = 0.006 G_{წკჰ}$ , კგ ჰ/წმ (სტანდარტულია ჰაერით საგრილებელი აირტურბინებისთვის);
- ჰაერის სრული ხარჯი კომპრესორში  $G_{ჰ} = G_{წკჰ} + G_{გ} + G_{გაპ}$ , კგ ჰ/წმ;
- მუშა აირების ნაკადი აირტურბინაში  $G_{ა} = G_{წკჰ} + B_{LM}$ , კგ ა/წმ;
- აირტურბინაში ნამუშევარი აირები  $G_{ბა} = G_{ა} + G_{გ}$ , კგ ნა/წმ.



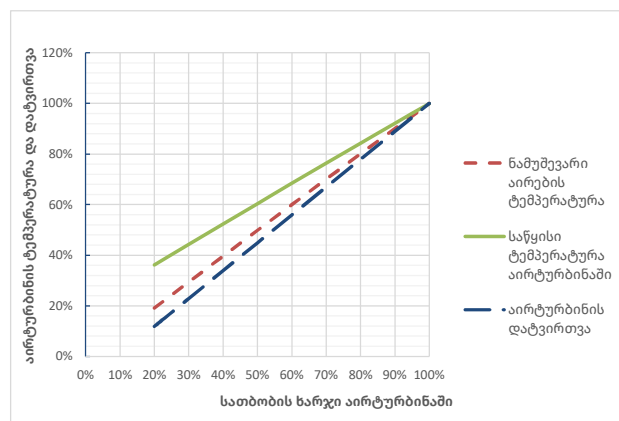
სურ. 2. აირტურბინის სადენი ნაწილის ნაკადების გამარტივებული სქემა

განგარიშების შედეგები ნაჩვენებია მე-3 სურათზე: ა) გრაფიკზე მოცემულია საწყისი და ნამუშევარი აირების ტემპერატურის, ასევე აირტურბინის დატვირთვის დამოკიდებულება მასში ჰაერისა და სათბობის მასურ ხარჯზე, კომბინირებული

ციკლის ენერგობლოკის რაოდენობრივი რეგულირებისას; ბ) გრაფიკზე ნაჩვენებია იგივე პარამეტრების დამოკიდებულება სათბობის მასურ ხარჯზე, ლია ციკლის ენერგობლოკის ხარისხობრივი რეგულირებისას.



ა) კომბინირებული ციკლი: რაოდენობრივი რეგულირება (საბოლოო ტემპერატურის მართვის პროგრამით)



ბ) ლია ციკლი: ხარისხობრივი რეგულირება

სურ. 3. საწყისი და ნამუშევარი აირების ტემპერატურების დამოკიდებულება ჰაერისა და სათბობის მასურ ხარჯებზე კომბინირებულ და ლია აირტურბინულ ციკლებში სიმძლავრის რაოდენობრივი და ხარისხობრივი რეგულირების დროს

როგორც გრაფიკებიდან ჩანს, რაოდენობრივი რეგულირებისას, რომელიც სიმძლავრის მართვის სტანდარტული მეთოდია კომბინირებულ ციკლში, აირტურბინის დატვირთვის 55%-ის დროს (ეს შეესაბამება კომბინირებული ციკლის ~73% დატვირთვას) დგება შეზღუდვა ნამუშევარი აირების ტემპერატურის ზრდის მიხედვით და ენერგობლოკის განტვირთვა დანადგარების ამორთვის გარეშე შეუძლებელი ხდება. მეორე მხრივ, ხარისხობრივი რეგულირებისას ასეთი შეზღუდვა არ არსებობს, რაც თეორიულად კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკის სრული განტვირთვის შესაძლებლობას იძლევა. ასეთი რეგულირებისას პრაქტიკული შეზღუდვები აღარ უკავშირდება ქვაბუტილიზატორის ორთქლგადამხურებელი ზედაპირების შესაძლო დაზიანებას გადახურების გამო და განისაზღვრება ნაკლებად კრიტიკული საკითხებით, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის შესაძლებლობას.

აირტურბინული ენერგობლოკების სიმძლავრის რეგულირების რაოდენობრივი და ხარისხობრივი მეთოდების შედარება აჩვენებს ხარისხობრივი მეთოდის უპირატესობას ენერგობლოკის განტვირთვის თვალსაზრისით.

აღნიშნულიდან გამომდინარე, შესაძლებელია სიმძლავრის მართვის ისეთი ალგორითმის შემუშავება,

რომელიც გააერთიანებს რაოდენობრივი და ხარისხობრივი რეგულირების უპირატესობას და უზრუნველყოფს კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების ღრმა განტვირთვას ორეტაპიანი სცენარით: პირველ ეტაპზე – განტვირთვა ~73%-მდე რაოდენობრივი მეთოდით; მეორე ეტაპზე – შემდგომი განტვირთვა («73%») ხარისხობრივი მეთოდით. ასეთ სცენარს შეიძლება ვუწოდოთ კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკის ღრმა განტვირთვის კომბინირებული მეთოდი.

### დასკვნა

აირტურბინული კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების განტვირთვის კომბინირებული მეთოდი განვიხილოთ, როგორც ეფექტური ინსტრუმენტი ენერგობლოკის არასრული დატვირთვის რეალიზაციისთვის (ცალკეული დანადგარების ამორთვის გარეშე) და შემდგომი შესამოწმებელი გამოცდების საფუძველზე ჩამოვყალიბოთ ასეთი ენერგობლოკების რეგულირების დიაპაზონის გაფართოების ახალი შესაძლებლობა. განტვირთვის აღნიშნული მეთოდის დანერგვა გაზრდის კომბინირებული ციკლის ენერგობლოკების მანევრულობას და როლს ელექტროსისტემების დატვირთვის რეგულირებაში, რაც მნიშვნელოვანია მათი კომერციული გამოყენების არეალის გაფართოებისთვის.

### ლიტერატურა

1. Temur K. Mikiashvili, Baadur Sh.Chkhaidze, Tengiz S. Jishkariani, Omar D. Kiguradze, Gia O. Arabidze. Grid Power Daily Regulation by Combined-Cycle Power Plant. International Journal of Energy Management, Vol.:2, Issue 4, 2020.
2. T. Mikiashvili, Thermal power plant technology. 437 p. Tbilisi, 2020 / ISBN 978-9941-28-560-8.

UDC 621.31-21

SCOPUS CODE 2102

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-2-164-171>

## New Unloading Possibilities of Gas Turbine Combined Cycle Power Generating Units

**Temur Mikaishvili** Department of Thermal Energy and Energy Efficiency, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75 M. Kostava str  
E-mail: temurmikaishvili@yahoo.com

**Nino Chagmelashvili** Department of Thermal Energy and Energy Efficiency, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 75 M. Kostava str  
E-mail: chagmela@gmail.com

### Reviewers:

**T. Chishkariani**, Professor, Faculty of Power Engineering and Telecommunications, GTU  
E-mail: tengish@yahoo.com

**T. Museliani**, Professor, Faculty of Power Engineering and Telecommunications, GTU  
E-mail: museliani@yahoo.com

**Abstract.** The determining factor for the efficient operation of electrical systems is their stability. To ensure stability, it is important to establish links between neighboring electrical systems, enhance the capacity of overloading and unloading power plants, improving the flexibility of power plants, etc.

For electrical systems with high autonomy, it is also important to solve the problems of power control by the installations of the system itself, including the combined cycle power units, the main purpose of which is to cover the base load of the grid. The studies carried out by the authors of the article have shown that the tasks of regulating the load of electric power systems can be solved by using power units of a gas turbine combined cycle. In order to achieve this, it is required to identify and realize deep unloading capabilities of such power generating units. In standard conditions the combined cycle power generating units are utilized for covering base loads, and their participation in a daily regulation of the grid load is not considered. However, the concept of the combined power control method suggested by the authors of this article involves combination of quantitative and qualitative regulation methods of the gas turbine component which significantly expands the unloading range of such power generating units and increases their engagement in regulating the power system loads.

**Key words:** cycle; combined; equipment; gas producer; gas turbine; power generating unit; power grid; power system; unloading.

UDC 621.31-21

SCOPUS CODE 2102

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2021-2-164-171>

### Новые возможности разгрузки энергоблоков газотурбинного комбинированного цикла

**Темур Микаишвили** Департамент тепловой энергии и энергоэффективности, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава 75  
E-mail: temurmikaishvili@yahoo.com

**Нино Чагмелашвили** Департамент тепловой энергии и энергоэффективности, Грузинский технический университет, Грузия, 0160, Тбилиси, ул. М. Костава 75  
E-mail: chagmela@gmail.com

#### Рецензенты:

**Т. Чижкариани**, профессор факультета энергетики и телекоммуникации ГТУ  
E-mail: tengish@yahoo.com

**Т. Муселиани**, профессор факультета энергетики и телекоммуникации ГТУ  
E-mail: museliani@yahoo.com

**Аннотация.** Определяющим фактором эффективной работы электросистем является их стабильность. Для обеспечения стабильности важное значение имеет установление связей между соседними электросистемами, усиление возможностей перегрузки и разгрузки электрических станций, улучшение показателей маневренности энергетических установок и т.д.

Для электрических систем с высокой автономностью важное значение имеет также решение задач регулирования мощности установками самой системы, в том числе энергетическими блоками комбинированного цикла, основное предназначение которых покрытие базовой нагрузки графика. Исследования, проведенные авторами работы, показали, что задачи регулирования нагрузки электроэнергетических систем могут быть разрешены путем использования энергоблоков газотурбинного комбинированного цикла. Для этого необходимы выявление и реализация возможностей глубокой разгрузки таких энергоблоков. В стандартных условиях энергоблоки комбинированного цикла используются для покрытия базовой части графика нагрузки электросистемы – их участие в суточном регулировании нагрузки системы не рассматривается. Хотя концепция комбинированного метода управления мощностью, которая предлагается авторами данной работы, предусматривает совмещение количественного и качественного методов управления газотурбинным компонентом энергоблока, что существенно расширяет разгрузочный диапазон таких энергоблоков и увеличивает степень их участия в регулировании нагрузки электросистемы.

**Ключевые слова:** газовая турбина; комбинированный; разгрузка; установка; цикл; электрическая система; энергоблок.

*განხილვის თარიღი 05.02.2021*

*შემოსვლის თარიღი 24.02.2021*

*ხელმოწერილია დასაბეჭდად 21.07.2021*