

UOT 629.12.066

## ELEKTRİK ENERJİSİ SABİT CƏRƏYANLA PAYLANILAN GƏMİ ELEKTROENERGETİKA SİSTEMLƏRİNDƏ QISAQAPANMA CƏRƏYANLARININ HESABATININ NƏZƏRİ MƏSƏLƏLƏRİ

Səlimova A.K., Sultanov E.F., İsmayılov S.S.

Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası

AZ1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18

E-mail: afag\_sk@mail.ru, elshen\_sultanov@mail.ru, sahib-ismayil@bk.ru

**Xülasə.** Məqalədə elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylanılan gəmi elektroenergetika sistemlərində qısaqapanma cərəyanlarının axınının nəzəri məsələlərinə baxılmışdır. Bu sistemlərdə elektrik enerjisi, çıxışlarına yarımkeçirici düzləndiricilər qoşulmuş üçfazlı sinxron generatorlar vasitəsi ilə istehsal edilir, elektrik enerjisinin paylanması isə sabit cərəyanla həyata keçirilir. Dəyişən cərəyan avar elektrik mühərrikinin və ümumi gəmi elektrik enerjisi qəbuledicilərinin qidalanması üçün yarımkeçirici inverterlər istifadə olunur.

**Abstract.** The theoretical issues of short-circuit current flow in ship power systems where electricity on the direct current is distributed, are discussed in the article. These systems use three-phase synchronous generators connected to semiconductor rectifiers to generate electricity, distribute electricity on the direct current, and use semiconductor inverters to power the alternating current paddle electric motor and common ship power receivers.

**Аннотация.** Рассмотрены теоретические вопросы протекания токов короткого замыкания в судовых электроэнергетических системах с распределением электроэнергии на постоянном токе. Здесь выработка электроэнергии производится трехфазными синхронными генераторами, с подключенными полупроводниковыми выпрямителями. Ввиду того, что распределение электрической энергии осуществляется на постоянном токе, для питания гребного электродвигателя переменного тока, а также других судовых потребителей используются полупроводниковые инверторы.

**Açar sözlər:** gəmi elektroenergetika sistemləri, elektrik enerjisinin paylanması, yarımkeçirici tezlik çeviriciləri, avar elektrik qurğuları, qısaqapanma, elektrik cərəyanı

**Key words:** ship power systems, power distribution, semiconductor frequency converters, oar electrical installations, short circuit, electric current

**Ключевые слова:** судовые электроэнергетические системы, распределение электроэнергии, полупроводниковые преобразователи частоты, гребные электрические установки, короткое замыкание, электрический ток

---

**Giriş.** Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşıdırılan gəmi elektroenergetika sistemlərində qısaqapanma (QQ) cərəyanlarının hesabında ənənəvi üsullar uyğun gəlmir. Bu onunla bağlıdır ki, bu sistemlərdə generator dəyişən fırlanma tezliyi ilə işləyir, lakin avar elektrik mühərriki (AEM) avtonom inverterlərin əks diodları vasitəsilə baş paylayıcı şitin (BPS) şinlərində qısaqapanmanın baş verdiyi yeri qidalandıra bilər. Sinxron generatorun fırlanma sürətinin azalması zamanı qısaqapanma cərəyanı artır. Qısaqapanma baş verdiyi əraziyə AEM-dən dəstəkləyici qida cərəyanının qiyməti, onun fırlanma tezliyindən və yüklənməsindən asılıdır [1, 2, 3].

Avar elektrik qurğularını (AEQ) qidalandıran yarımkeçirici inverterlərinin girişində yerləşən kondensatorlar qısaqapanma cərəyanlarına əhəmiyyətli təsir göstərir. Qısaqapanma cərəyanlarının hesabında, girişində kondensatorlar yerləşmiş yarımkeçirici inverterlərdən qida alan ümumi gəmi elektrik enerjisi qəbuledicilərindən dəstək cərəyanını nəzərə almaq lazımdır. Məqalədə elektrik enerjisinin paylaşıdırılması sabit cərəyanla yerinə yetirilən gəmi elektroenergetika sistemlərində

qısaqapanma cərəyanlarının fiziki prosesləri nəzərdən keçirilir. Bu sistemlərdə qısaqapanma cərəyanlarının hesabı üzrə tövsiyələr hazırlanmışdır.

**Əsas hissə.** Hal-hazırda bir çox inkişaf etmiş ölkələrdə vahid elektrotroenerji sistemi (VEES) və elektrik enerjisinin paylanması sabit cərəyanla olan, “*Onboard DC Grid*” adı verilmiş gəmilər istismara verilir. Bu gəmilərdə gəmi elektrik stansiyası BPŞ və tiristor düzləndiriciləri vasitəsilə işləyən dizel generatorlardan ibarətdir. Burada iki azipodun (elektrik mühərriki gəminin gövdəsi xaricindəki kapsulada yerləşən reduktorsuz vintli hərəkətverici sistemi) hər biri avtonom inverterlardan qidalanır.

Mühafizə-kommunikasiya avadanlıqlarının seçilməsi və BPŞ yığma şinlərinin dinamik dayanıqlığının yoxlanılması məqsədilə qısaqapanma cərəyanlarının hesabı texniki layihələndirmə mərhələsində normativ sənədlərdən istifadə etməklə aparılır. Elektrik hərəkətverici sistem (EHS) əsasında ənənəvi vahid gəmi elektroenergetika sistemli gəmi (VGES) şəkil 1-də göstərilmişdir [4, 5].



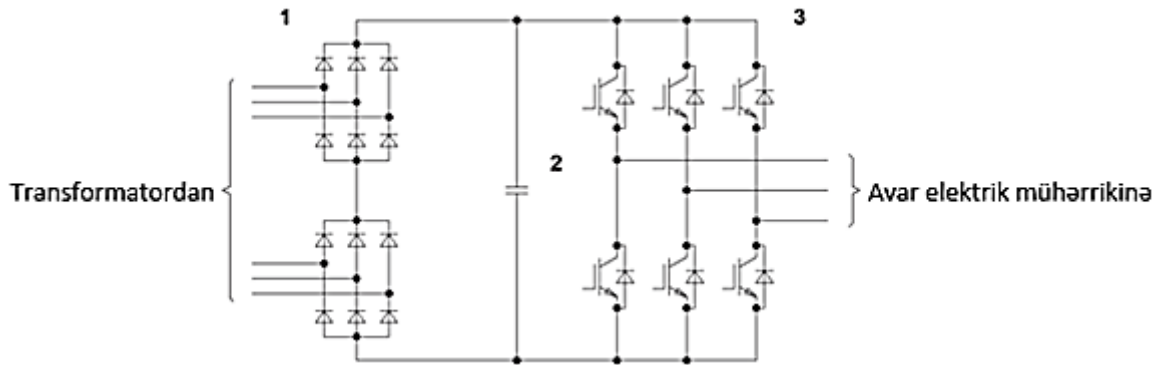
**Şəkil 1.** Elektrik hərəkətverici sistemi (EHS) əsasında vahid elektroenergetika sistemli gəminin görünüşü

**Metodlar və materiallar.** Gəmi elektrik enerjisi sistemlərində qısaqapanma cərəyanlarının hesabına ənənəvi üsullarla yanaşma elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşıldığı halda tətbiq edilə bilməz, bu da bir sıra səbəblərlə, xüsusilə də, dönmə (əks) qabiliyyətinə malik olan müasir yarımkeçirici çeviricilərin düzləndirici və inverterlərin tətbiqi ilə bağlıdır [3, 4, 5].

Ənənəvi avtonom GEES -in tərkibinə iki və ya daha çox generatordan ibarət aqreqatlar, bir qayda olaraq, dizel generatorları, BPŞ və alçaldıcı transformatorlar daxildir. QQ cərəyanlarının hesabı generatorların tək və paralel işində məlum metodikalar əsasında aparılır. QQ cərəyanlarının hesabı zamanı ekvivalent elektrik mühərriki şəklində göstərilən gəmi işlədicilərinin dəstəkləyici cərəyanı nəzərə alınır. Qeyd etmək lazımdır ki, vahid elektroenergetika sistemlərinin yaranması QQ cərəyanlarının hesabına olan yanaşmanı dəyişməyib.

Elektrik hərəkətverici sistemi (EHS) əsasında VEES -nin tərkibinə generator aqreqatı (GA) və BPŞ olan gəmi elektrik stansiyası daxildir. EHS iki və ya daha çox avar elektrik intiqallarından ibarətdir. Müasir AEQ tərkibinə, bir qayda olaraq üçdolaqlı, birləşdirici transformatorlar, sabit cərəyan bəndli yarımkeçirici tezlik çeviriciləri, sinxron və ya asinxron tipli üçfazlı dəyişən cərəyan avar elektrik mühərrikləri daxildir [6, 7].

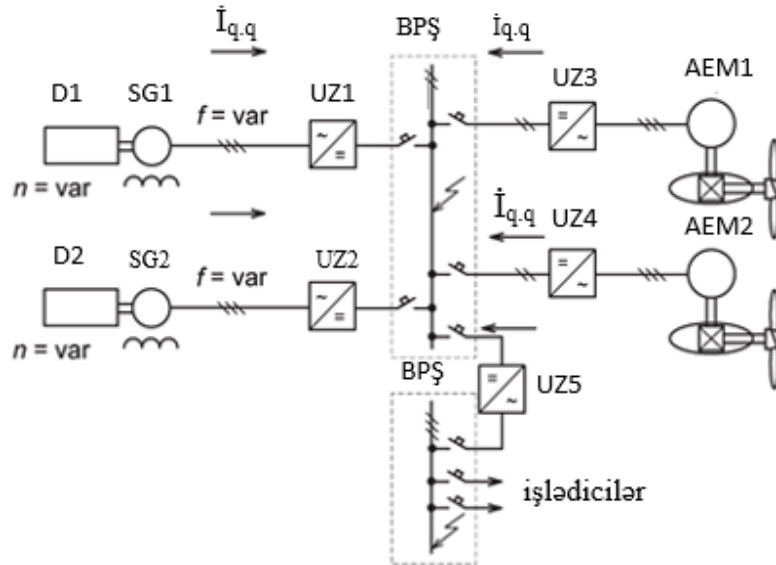
Gəmilərdə idarə edilməyən düzləndirici və avtonom inverterlərin bazasında qurulmuş sabit cərəyan bəndli və iki istiqamətli yarımkeçirici tezlik çeviricisi tətbiq olunduğundan, QQ cərəyanı AEM-dən BPŞ-də QQ nöqtəsinə axmır. VEES-nin məlumatlarında QQ cərəyanlarının hesabı avtonom GEES-lər üçün olduğu kimi həyata keçirilir. Bir istiqamətli yarımkeçirici tezlik çeviricisinin elektrik sxemi şəkil 2-də təqdim edilmişdir.



**Şəkil 2.** Sabit cərəyan bəndli əks əlaqəsi olmayan yarımkeçirici tezlik çevricisinin struktur sxemi  
 1 - tənzimlənməyən düzləndirici; 2 - kondensator; 3 - avtonom inverter

**Nəticələr və müzakirələr.** Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşılan EHS olan gəmi elektroenergetika sistemlərinin qurulması QQ cərəyanlarının hesabına yanaşmalara prinsipial təsir göstərən bir sıra xüsusiyyətlərə malikdir. VGES -nin məlumatlarında üçfazlı GA dəyişən elektrik enerjisi istehsal edir ki, bu da düzləndiricidən keçərək BPŞ şinlərinə daxil olur. BPŞ-dən sabit cərəyan elektrik enerjisi avtonom inverterlər vasitəsilə dəyişən cərəyana çevrilərək AEQ -nu və ümumi gəmi elektrik qəbuledicilərini qidalandırır [7, 8, 9].

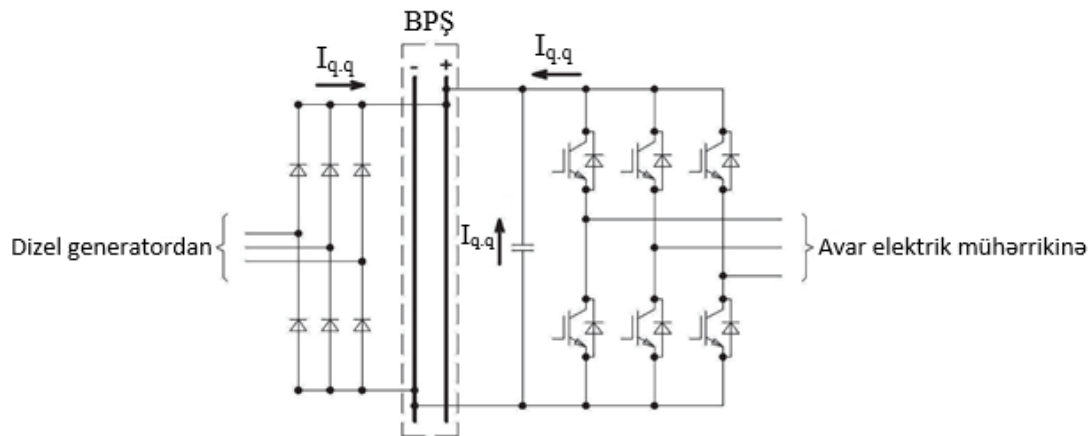
Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşılan EHS olan VGES -nin struktur sxemi şəkil 3-də göstərilmişdir.



**Şəkil 3.** Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşılan gəmi elektroenergetika sistemlərinin struktur sxemi

İntiqallı mühərrik, dəyişən cərəyan generatoru və yarımkeçirici düzləndiricidən ibarət olan ventilli GA-nın istifadəsi yanacağa əhəmiyyətli dərəcədə qənaət etməyə imkan verir. Bu pay yükü ilə işləyən və ya yüksüz işləmə gücünə yaxın güclə işləyən zamanı GA-nın istismar tezliyinin azalması hesabına əldə edilir.

Ənənəvi GEES -də generatorlar nominal fırlanma tezliyi ilə işləyir və bu QQ cərəyanlarının hesabında nəzərə alınır. Fırlanma tezliyi azalmasının nəticəsi olaraq elektrik cərəyanının tezliyi azaldıqda üçfazlı generatorun induktiv müqaviməti azalır və QQ cərəyanları artır. Beləliklə, GA dəyişən fırlanma tezliyi ilə işlədikdə QQ cərəyanlarının hesabı intiqal mühərrikinin minimal istismar fırlanma tezliyində yerinə yetirilməlidir.



Şəkil 4. İnvertor girişli sabit cərəyan BPŞ -nin qısaqapanma nöqtəsinin qoşulma sxemi

Yarımkeçirici düzləndiricinin daxili müqaviməti generatorun müqavimətindən əhəmiyyətli dərəcədə azdır. Bununla əlaqədar olaraq, QQ meydana gəlmiş zaman, düzləndirici minimal cərəyan məhdudlaşdırıcı təsir göstərir və yarımkeçirici ventillərin (diodlar, tiristorlar, tranzistorlar) müqavimətləri QQ cərəyanını hesabladığımız nəzərə alınmaya bilər. Lakin nəzərə almaq lazımdır ki, tiristorlar və tranzistorlar maksimal buraxıla bilən nominal cərəyanların yüksəlməsinə imkan vermir və QQ prosesində kommutasiya oluna bilməzlər, lakin müəyyən zaman intervalında (Joul integralı)  $I^2t$  integralının qiyməti yalnız güc diodları üçün sorğu məlumatlarında təqdim olunur.

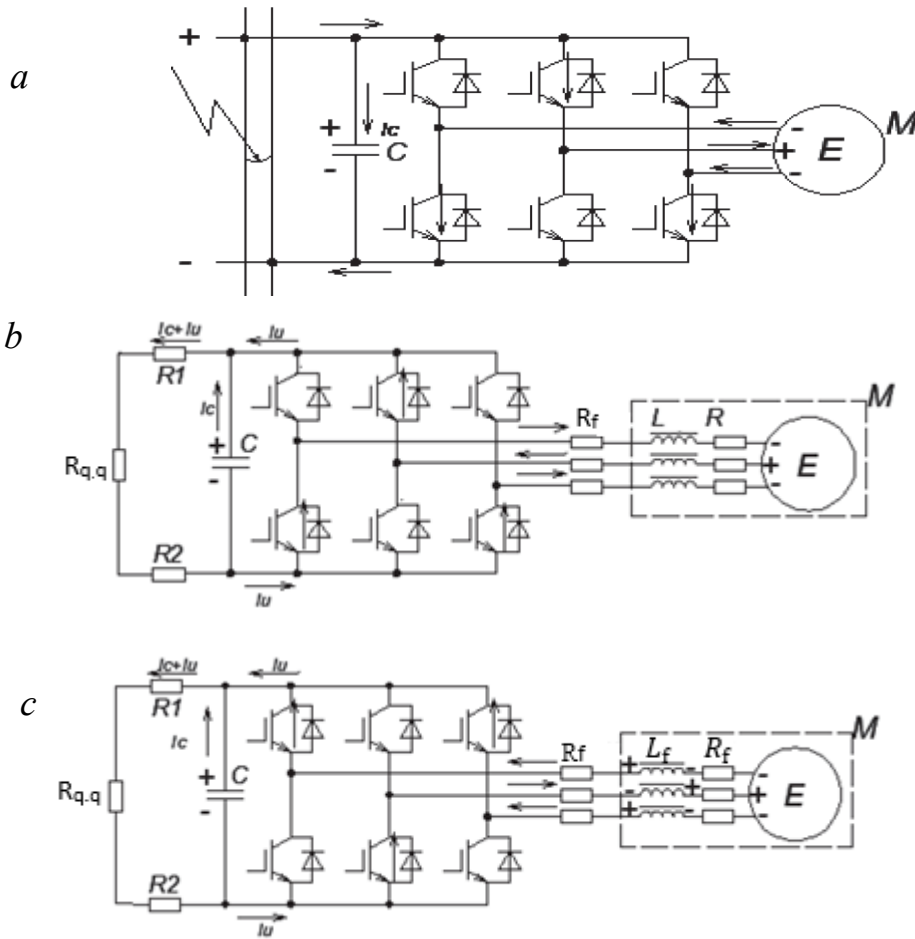
Buna görə də, tərkibində göstərilən yarımkeçirici elementləri olan paylayıcı qurğuların şinlərinə qoşulan avadanlıq QQ rejimi üçün hesablanmalıdır. Sabit cərəyan BPŞ -dən əks əlaqəli və hər iki istiqamətdə elektrik cərəyanını keçirən avtonom inverterlər qidalanır. BPŞ şinlərindəki QQ cərəyanının həcmində əhəmiyyətli təsir göstərdiyinə görə bu şərait prinsipial olaraq zəruridir. Generatordan axan QQ cərəyanlarına çevirici vasitəsilə AEM –dən axan QQ -nin dövrü komponenti əlavə edilir. Bununla yanaşı, AEQ -nin məlumatlarında ənənəvi GEES -də QQ cərəyanlarına cərəyan məhdudlaşdırıcı təsir göstərən əlaqələndirici transformatorlar yoxdur.

Qeyd etmək lazımdır ki, GEES-də olan AEM -in gücü müqayisə edilə bilər və onun gücü çox vaxt əsas generatorların gücündən artıq olur. Bununla yanaşı, hər bir gəmi elektroenergetik sistemində Rusiya Dəniz Rejestrinin qaydalarına uyğun olaraq, ən azı iki AEQ tətbiq edilir. AEM -i dəyişən fırlanma tezliyi ilə istismar olunur. Qəza rejimində QQ avar vintinin istənilən fırlanma tezliyində baş verə bilər. Əgər ventil generatorlarının çıxışında gərginlik sabitdirsə, o zaman avtonom inverterin çıxışında gərginlik və həm də AEM-nin əks EHQ nominal qiymətdən fərqlənə bilər [7, 8, 9].

Bu tip GEES -də elektrik enerjisinin paylanması güc sxemi şəkil 4-də göstərilmişdir.

Şəkil 5(a)-da göstərilən sxemdə AEM -i inverterdən dəyişən cərəyan elektrik enerjisini aldıqda QQ rejimindən əvvəlki müddətdə elektrik intiqalının normal işi təqdim edilir. 4÷5 kHz ətrafında daşıyıcı tezlik ilə hərəkət edən inverterin üç tranzistoru modulyasiya tezliyi dövründə (məsələn, 50Hz) altı keçirici konfigurasiyanı dəyişir. Həmçinin, şəkil 5 (a)-da şərti olaraq mühərrikin ani qütblülüyü və təsadüfi konfigurasiyanın keçirici tranzistorlarının cərəyanlarının istiqamətləri oxlarla göstərilmişdir. C tutumlu kondensator batareyasının elektrik yükünün  $I_c$  budaqlanmış cərəyanlı inverteri və növbəti QQ yeri oxlarla göstərilir.

Qeyd etmək lazımdır ki, kondensator və ya kondensator batareyası inverterin məcburi hissəsidir, parazit induktivliyi minimuma endirmək üçün tranzistorların çıxışlarına qütblər arasında birbaşa bağlanır və tranzistorların kommutasiyası zamanı xarici zəncirlərin induktiv reaksiyasını aradan qaldırmağa xidmət edir [9, 10].



**Şəkil 5.** Avar elektrik intiqalının sxemi

*a - QQ rejimindən əvvəlki zamana uyğun; b - paylayıcı şitin şintlərində QQ baş verdiyi an;  
 c - baş elektrik mühərrikinin EHQ -dən QQ nöqtəsinin qidalanması rejimi*

QQ-nin baş verdiyi anda (bax şəkil 5(b) -yə) toplanmış elektrik enerjisi hesabına cərəyanın istiqaməti və qiymətini saxlayan dolaqların  $L_\Phi$  özünə induktivliyinin EHQ hesabına AEM-nin öz EHQ qarşı qütblülüyü dəyişməz qalır. Bu qiymət QQ anında induktivlik və ondan axan cərəyandan asılıdır.

$$W = LI^2/2$$

Elektrik maşınının faza dolaqlarının induktivliyin bir-biri ilə eyni olduğunu nəzərə alsaq, Kirxhof qanununa görə gələn cərəyan çıxan cərəyanların cəminə bərabərdir:

$$I_2 = I_1 + I_3 = kI_2 + (1-k)I_2;$$

$$W_\Sigma = W_1 + W_2 + W_3 = 1/2 L_\Phi [(kI_2)^2 + (I_2)^2 + \{(1-k)I_2\}^2],$$

Burada: 1, 2, 3 -faza dolaqlarının şərti nömrələridir.

Tranzistorların işi mühafizə qurğusu ilə bloklanır, lakin faza cərəyanları əks diodlar vasitəsilə axır. Kondensator batareyası  $I_c$  cərəyanı ilə  $R$ ,  $R_{QQ}$ ,  $R_2$  dövrəsi boyunca QQ nöqtəsinə boşalır və inverterin  $I_u$  cərəyanı ilə toplanır. Dolaqların  $L_\Phi$  induktivliyinin boşalmasından sonra (bax şəkil 5 (c)-yə) QQ nöqtəsinə  $I_c$  cərəyanı və M maşının EHQ səbəbindən yaranan cərəyanlar qidalandırır. QQ nöqtəsinin qidalanması, həmçinin ümumi gəmi elektrik qəbuledicilərindən girişində kondensatorlar quraşdırılmış yarımkeçirici inverterlər vasitəsilə baş verir.

**Nəticə.**

1. Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşdırılan gəmi elektroenergetika sistemlərində qısaqapanma cərəyanlarının hesabı standart üsul və metodikalar vasitəsilə aparıla bilməz.
2. Elektrik enerjisi sabit cərəyanla paylaşdırılan gəmi elektroenergetika sistemlərində QQ cərəyanlarının hesabı ventillər GA -nın minimal və maksimal fırlanma tezliyi ilə həyata keçirilməlidir. Yarımkeçirici düzəldici ventillərin daxili müqaviməti kiçik olduğundan nəzərə alınmır. Maksimal QQ cərəyanları ventillər GA -nın minimal fırlanma tezliyində gözlənilir.
3. Sabit cərəyan şəbəkəsində QQ cərəyanının hesabı zamanı QQ yerinin yarımkeçirici invertorlar vasitəsilə AEM -dən dəstək cərəyanının qidalandırılmasını nəzərə almaq lazımdır. QQ cərəyanlarının hesabı AEQ -nin müxtəlif əməliyyat rejimlərində aparılmalıdır.
4. QQ cərəyanlarının hesabı zamanı həm AEM-ni, həm də ümumi gəmi elektrik qəbuledicilərini qidalandıran yarımkeçirici gərginlik invertorlarının girişində yerləşən kondensatorların boşalma cərəyanları nəzərə alınmalıdır. Kondensator batareyaları həmçinin GA -nın düzləndiricilərinin çıxışında yerləşdirilə bilər və ya BPŞ yığıma şinlərinə birləşdirilə bilər.
5. QQ cərəyanlarının konturunda yarımkeçirici elementləri olan paylayıcı qurğularının şinlərindən qidalanan avadanlıq sabit cərəyan elektrik enerjisi mənbəyində QQ zamanı ən ağır iş rejimlərində istehsalçı tərəfindən sınaqdan keçirilməlidir.

**Ədəbiyyat**

1. Mehdiyev H.A. "Gəmilərin avtomatlaşdırılmış elektroenergetika sistemləri". Bakı: "Nurlan", 2006-340 səh.
2. Sultanov E.F., Cəlilov T.A. "Müasir gəmi elektrik stansiyaları və şəbəkələri", Bakı, ADDA, 2018-330 səh.
3. Лёмин П.А., Прусаков А.В., Григорьев А.В. "Эксплуатация судовых систем электроснабжения". Учебное пособие Санкт-Петербург: ГМА им. Адм. С.О.Макаров, 2009-180 стр.
4. Григорьев А.В. Перспективы внедрения вентильных газотурбогенераторов на морском флоте /А.В. Григорьев, Р.Р. Зайнуллин, С.М. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова -2016. -№ 1 (35). -стр. 165–169.
5. Григорьев А.В. Опыт эксплуатации электроэнергетической установки гидрографического судна «Вайгач» / А.В. Григорьев, Е.А. Глеклер, А.И. Лившиц, Д.И. Улитовский // Судостроение. -2010.-№ 6.- стр. 29–30.
6. Григорьев А. В. Единая электроэнергетическая установка малого гидрографического судна «Вайгач»: опыт проектирования и результаты испытаний / А. В. Григорьев // Российский морской регистр судоходства.- 2008.- № 31.-стр. 271–78.
7. Гольдштейн М.Е. Функции передачи постоянного тока на базе преобразователей напряжения в режиме установившегося короткого замыкания в энергосистеме / М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика.- 2015.-Т. 15.- № 3. стр. 20–24.
8. Приходько В.М. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И.В. Приходько, В.Ю. Лучкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова.- 2016.- № 5 (39).- стр. 185–195.
9. E.F. Sultanov, F.V. Məmmədova "Gəmi elektronikasi və güc çevrəcileri". Dərs vəsaiti. Bakı, ADDA, 2020-170 səh.
10. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника / М.: Техносфера. 2011-576 с.

*Məqalə qəbul olunub: 31.03.2022*

*Təvsiyə edib: t.e.d., prof. A.M.Qafarov*