

UOT 621.019

ELEKTRİKLƏŞDİRİLMİŞ DƏNİZ NƏQLİYYATI ÜÇÜN MİKRO ŞƏBƏKƏ MODELLƏRİNİN TEXNİKİ VƏ EKOLOJİ QIYMƏTLƏNDİRİLMƏSİ

Muradəliyev A.Z., Hüseynov K.Ş.

Azərbaycan Elmi-Tədqiqat və Layihə-Axtarış Energetika İnstitutu

AZ1122, Bakı şəh., H.Zərdabi pr., 94

“Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası” PHŞ

Az1000 Bakı şəh., Z.Əliyeva küç., 18

E-mail: aydin_murad@yahoo.com, kenanhuseyn2606@gmail.com

Xülasə. Məqalədə elektriklişdirilmiş dəniz nəqliyyatı üçün mikro şəbəkə modellərinin texniki və ekoloji aspektləri hərtərəfli şəkildə təhlil olunur. Əsas məqsəd enerji səmərəliliyinin artırılması, bərpa olunan enerji mənbələrinin integrasiyası və karbon emissiyalarının azaldılması vasitəsilə dayanıqlı gəmiçilik sistemlərinin formalaşdırılmasıdır. Tədqiqatda mikro şəbəkə arxitekturasının komponentləri, idarəetmə mexanizmləri və hibrid enerji sistemlərinin üstünlükləri qiymətləndirilir. Analiz nəticələri göstərir ki, ağıllı idarəetmə alqoritmləri və enerji saxlama texnologiyalarının tətbiqi enerji balansını optimallaşdırmaqla yanaşı, ekoloji təsirlərin azalmasına və dəniz nəqliyyatında yaşıl transformasiyanın sürətlənməsinə imkan yaradır.

Abstract. This paper presents a comprehensive technical and environmental assessment of microgrid models for electrified maritime transportation. The main objective is to enhance energy efficiency, integrate renewable energy sources, and reduce carbon emissions to support the development of sustainable shipping systems. The study evaluates the components of microgrid architecture, control mechanisms, and the advantages of hybrid energy systems. The analysis demonstrates that the application of intelligent control algorithms and energy storage technologies not only optimizes energy balance but also minimizes environmental impacts, thereby accelerating the green transition in maritime transport.

Аннотация. В данной статье проводится всесторонняя техническая и экологическая оценка микросетевых моделей для электрифицированного морского транспорта. Основная цель исследования заключается в повышении энергоэффективности, интеграции возобновляемых источников энергии и снижении выбросов углерода для формирования устойчивых судоходных систем. Рассматриваются архитектура микросети, механизмы управления и преимущества гибридных энергетических систем. Результаты анализа показывают, что применение интеллектуальных алгоритмов управления и технологий накопления энергии не только оптимизирует энергетический баланс, но и снижает экологическое воздействие, способствуя ускорению «зеленого» перехода в морском транспорте.

Açar sözlər: elektriklişdirilmiş dəniz nəqliyyatı, mikro şəbəkə modelləri, enerji səmərəliliyi, bərpa olunan enerji mənbələri, hibrid enerji sistemi, süni intellekt, ekoloji qiymətləndirmə, yaşıl gəmiçilik

Key words: electrified maritime transport, microgrid models, energy efficiency, renewable energy sources, hybrid energy system, artificial intelligence, environmental assessment, green shipping

Ключевые слова: электрифицированный морской транспорт, микросетевые модели, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии, гибридная энергетическая система, искусственный интеллект, экологическая оценка, зелёное судоходство

Giriş. Dünya üzrə dəniz nəqliyyatı global ticarət və yükdaşımada əsas rol oynayır, lakin enerji sərfi və karbon emissiyaları baxımından böyük ətraf mühit təsirinə malikdir. Ənənəvi dizel mühərriklərinə əsaslanan gəmi sistemləri yüksək yanacaq sərfi və atmosfərə zərərli qazların buraxılması ilə xarakterizə olunur. Bu isə beynəlxalq səviyyədə ətraf mühitin qorunması üzrə qəbul edilmiş normativlərə cavab verməkdə çətinlik yaradır.

Son illərdə bərpa olunan enerji mənbələrinin sürətlə inkişafı və elektrifikasişma texnologiyalarının tətbiqi dəniz nəqliyyatında yeni imkanlar açır. Mikro şəbəkələr bu kontekstdə həm enerjinin optimallaşdırılmış istifadəsini, həm də ətraf mühitin qorunmasını təmin edə biləcək strateji yanaşma kimi çıxış edir. Mikro şəbəkə modelləri gəmidə müxtəlif enerji mənbələrinin – günəş, külək, dalğa enerjisi, akkumulyator və dizel-elektrik sistemlərinin – optimal inteqrasiyasına imkan yaradır.

Məqalənin əsas məqsədi elektrifikasişdırılmış dəniz nəqliyyatında mikro şəbəkə modellərinin texniki və ekoloji qiymətləndirilməsini aparmaqdır. Tədqiqat çərçivəsində enerji balansının optimallaşdırılması, idarəetmə strategiyalarının təhlili və karbon emissiyalarının azaldılması məsələləri araşdırılır. Bu yanaşma yalnız enerji səmərəliliyini artırmaqla kifayətlənmir, həm də dəniz nəqliyyatında “yaşıl transformasiya”nın sürətlənməsinə töhfə verir [1,2].

Tədqiqatın metodologiyası modelləşdirmə, simulyasiya və müqayisəli analiz üsullarına əsaslanır. Həm texniki göstəricilər, həm də ekoloji təsirlər qiymətləndirilir, bu da gələcək hibrid və ağıllı idarəetməyə malik enerji sistemlərinin dizaynı üçün əsas yaradır.

Əsas hissə. Mikro şəbəkələr müasir gəmiçilikdə enerji təminatının effektivliyini artıran və eyni zamanda ekoloji təsiri minimuma endirən kompleks sistemlər kimi çıxış edir. Bu sistemlər müxtəlif enerji mənbələrini birləşdirərək gəminin enerji balansını davamlı şəkildə qoruyur. Gəmi üzərində quraşdırılmış mikro şəbəkələr adətən generatorlar, akkumulyatorlar, bərpa olunan enerji qurğuları və enerji idarəetmə sistemlərindən ibarətdir. Generatorlar uzun məsafəli səyahətlər zamanı enerji ehtiyatını təmin edir, akkumulyatorlar isə pik yük dövrlərində və ya bərpa olunan enerji mənbələrinin çıxışı azaldıqda sistemin enerji balansını qoruyur. Günəş panelləri və külək turbini kimi bərpa olunan enerji mənbələri isə gəminin enerji istehlakını optimallaşdırır və karbon emissiyasının minimuma endirilməsinə xidmət edir. Bu sistemlərin idarəetmə vahidləri isə enerji paylanmasını tənzimləyir, qənaət rejimini təmin edir və bütün komponentlərin sinxron işləməsini nəzarətdə saxlayır.

Mikro şəbəkələrin tətbiqi yalnız texniki üstünlüklərlə məhdudlaşmır. Ənənəvi dizel mühərriklərə əsaslanan gəmi sistemləri yüksək yanacaq sərfi və ətraf mühitə mənfi təsir ilə xarakterizə olunur. Mikro şəbəkələr isə bərpa olunan enerji mənbələrindən istifadəni artıraraq CO₂ və NO_x emissiyalarını əhəmiyyətli dərəcədə azaldır və beynəlxalq ətraf mühit standartlarına uyğunluq təmin edir. Bu yanaşma yalnız enerji xərclərinin azaldılmasına xidmət etmir, həm də dəniz gəmiçiliyində “yaşıl transformasiya”nın sürətlənməsini təmin edir. Beləliklə, mikro şəbəkələrin tətbiqi həm ətraf mühitin qorunmasına töhfə verir, həm də gəmi istismarının iqtisadi səmərəliliyini artırır [1,2].

Enerji idarəetməsi mikro şəbəkələrin effektivliyinin əsas göstəricisidir. Bu idarəetmə sistemi real vaxt rejimində enerji istehlakını izləyir, yük paylanmasını tənzimləyir və kritik sistemlərin enerji təminatını prioritetləşdirir. Süni intellekt və model-predictive control (MPC) texnologiyaları bu prosesi avtomatlaşdırır, pik tələbat dövrlərində enerjinin səmərəli istifadəsini təmin edir və dizel generatorlarının iş yükünü azaldır. Bunun nəticəsində həm texniki sabillik, həm də ekoloji göstəricilər optimallaşdırılır. Eyni zamanda bu sistemlər, gəmi heyətinə enerji istifadəsi barədə real vaxt məlumatı təqdim edərək idarəetməni daha çevik edir və yanacaq israfının qarşısını alır.

Mikro şəbəkələrin enerji mənbələrinin optimallaşdırılması çoxşaxəli yanaşma tələb edir. Günəş və külək enerjisi dəyişkənliyi səbəbindən enerji istehsalında fasilələr yarada bilər. Buna görə də akkumulyatorlar və hibrid generatorlar enerji təminatını davamlı şəkildə qoruyur. Dalğa enerjisi texnologiyaları isə xüsusilə dəniz şərtlərinə uyğun sabit enerji çıxışı təqdim edir. Bu yanaşma enerji

istehsalının dayanıqlığını artırır və gəminin müxtəlif əməliyyat şəraitində etibarlı işləməsini təmin edir [3].

Ətraf mühitin qorunması və enerji səmərəliliyi sahəsində mikro şəbəkələrin rolu yalnız emissiyaların azalması ilə məhdudlaşmır. Həyat dövrü analizi (Life Cycle Assessment) bu sistemlərin istehsal, quraşdırma, istismar və təmir mərhələlərinin ətraf mühitə təsirini qiymətləndirməyə imkan verir. Bu analiz göstərir ki, mikro şəbəkələrin tətbiqi gəmiçilik sektorunda ekoloji davamlılığı təmin edir və gələcəkdə yaşıl gəmiçilik strategiyalarının formalaşmasına əsas yaradır.

Beləliklə, mikro şəbəkələr elektriklişdirilmiş dəniz nəqliyyatında texniki və ekoloji baxımdan strateji həll təqdim edir. Onlar enerji balansını qorumaq, yanacaq sərfini azaltmaq və karbon emissiyalarını minimuma endirmək imkanına malikdir. Eyni zamanda bu sistemlər gələcəkdə ağıllı idarəetmə və bərpa olunan enerji texnologiyalarının geniş tətbiqi üçün zəmin yaradır. Mikro şəbəkələrin inkişafı, gələcəkdə dəniz gəmiçiliyində yaşıl transformasiyanın əsas komponenti kimi qiymətləndirilir.

Müasir gəmi mikro şəbəkələrinin analizi üçün riyazi modellər enerji mənbələrinin qarşılıqlı təsirini, yük dinamikasını və idarəetmə strategiyalarını əhatə etməlidir. Gəmi sistemlərində enerji balansını aşağıdakı bərabərliklə ifadə oluna bilər:

$$P_{gen} + P_{bem} + P_{bat} = P_{yük} + P_{itki}$$

Burada: P_{gen} – dizel generatorlarının gücü,

P_{ren} – bərpa olunan enerji mənbələrindən (günəş, külək, dalğa) istehsal olunan güc,

P_{bat} – akkumulyatorların enerji çıxışı və ya yığılımı,

$P_{yük}$ – istehlak olunan enerji yükü,

P_{itki} – enerji ötürmə itkiləridir.

Mikro şəbəkələrin texniki və ekoloji göstəricilərinin təhlili göstərir ki, bu sistemlərin səmərəliliyi əsasən enerji mənbələrinin integrasiyası səviyyəsindən və idarəetmə strategiyasının düzgün qurulmasından asılıdır. Gəmi mikro şəbəkələrinin modelləşdirilməsi zamanı enerji paylanması və yük balansının optimallaşdırılması üçün çoxölçülü riyazi və simulyasiya yanaşmaları tətbiq olunur. Bu modellər generatorların, akkumulyatorların və bərpa olunan enerji mənbələrinin qarşılıqlı təsirini analiz etməyə, həmçinin müxtəlif iş rejimlərində enerji axınlarını proqnozlaşdırmağa imkan verir [3,4].

Enerji axınlarının idarə olunması prosesində **model-predictive control (MPC)** və **fuzzy logic-based control** kimi qabaqcıl nəzarət üsulları istifadə edilir. Bu idarəetmə strukturları sistemin qeyri-xətti dinamikasına uyğun qərar qəbul etmə mexanizmini formalaşdırır və enerji paylanmasını real vaxtda tənzimləyir. Nəticədə, enerji itkiləri azalır, yanacaq sərfi optimallaşır və mikro şəbəkənin ümumi effektivliyi yüksəlir.

Mikro şəbəkələrin simulyasiya modelləri MATLAB/Simulink, HOMER Energy və ya PSCAD kimi proqram mühitlərində qurulur. Bu mühitlərdə aparılan analizlər göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin (xüsusilə günəş və külək enerjisinin) payının artırılması dizel generatorlarının iş müddətini 30%-ə qədər azaldır. Bu, həm texniki baxımdan sistemin ömrünü uzadır, həm də ekoloji baxımdan atmosfərə atılan CO₂ və NO_x emissiyalarının azalmasına səbəb olur.

Mikro şəbəkə modellərində enerji paylanmasının optimallaşdırılması üçün enerji idarəetmə alqoritmlərinin tətbiqi mühüm rol oynayır. Bu alqoritmlər enerji istehsalını və istehlakını balanslaşdırmaqla yanaşı, akkumulyatorların doldurulma-boşalma rejimini tənzimləyir və bərpa olunan enerji mənbələrinin dəyişkənliyini kompensasiya edir. Bu məqsədlə aşağıdakı optimallaşdırma funksiyası istifadə oluna bilər:

$$F = \min (C_{yan..} + C_{itki} + C_{deq.})$$

Burada: $C_{yan.}$ – dizel generatorlarının yanacaq sərfi ilə bağlı xərclər,

C_{itki} – enerji ötürmə və çevrilmə itkilərindən yaranan xərclər,

$C_{deq.}$ – akkumulyatorların deqradasiyası nəticəsində əmələ gələn əlavə enerji itkisi.

Belə yanaşma mikro şəbəkənin ümumi xərclərini minimuma endirməyə və sistemin uzunmüddətli istismar sabitliyini təmin etməyə imkan verir.

Ekoloji qiymətləndirmə baxımından, mikro şəbəkə sistemlərinin tətbiqi nəticəsində əldə olunan emissiya azalmaları beynəlxalq standartlarla müqayisədə əhəmiyyətli dərəcədə yüksəkdir. Simulyasiya nəticələri göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin payı 40%-ə çatdıqda, karbon emissiyası 35–40%, azot oksidi emissiyası isə 45%-ə qədər azalır. Bu göstəricilər Beynəlxalq Dəniz Təşkilatının (IMO) 2050-ci ilə qədər emissiyaların azaldılması məqsədlərinə tam uyğun gəlir.

Həmçinin, mikro şəbəkələrin tətbiqi gəmi sistemlərində enerji təhlükəsizliyini də artırır. Fərqli enerji mənbələrinin integrasiyası nəticəsində enerji təminatında redundans yaranır, bu da sistemin fəvqəladə hallarda sabitliyini qoruyur. Məsələn, günəş və külək enerjisinin azalması halında akkumulyator və ya dizel generator avtomatik olaraq enerji balansını bərpa edir.

Müasir elmi yanaşmalar göstərir ki, mikro şəbəkə modellərinin gələcək inkişaf istiqamətləri ağıllı idarəetmə texnologiyalarının daha geniş tətbiqinə əsaslanacaq. Süni intellekt və maşın alqoritmləri enerji istehlakının proqnozlaşdırılmasını, yük dəyişmələrinin avtomatik tənzimlənməsini və enerji paylanması optimal səviyyədə saxlanmasını təmin edə bilər. Beləliklə, mikro şəbəkə modelləri yalnız texniki və ekoloji səmərəlilik baxımından deyil, həm də ağıllı gəmi sistemlərinin formalaşması üçün mühüm texnoloji baza kimi çıxış edir [5,6].

Aşağıda elektrifikasi edilmiş dəniz mikro şəbəkəsində bərpa olunan enerji payının artması ilə emissiya azalması arasındakı əlaqəni göstərən qrafikin təsviri göstərilmişdir (cədvəl 1):

Cədvəl 1

Bərpa olunan enerji payının emissiyalara təsiri

Bərpa olunan enerji payı (%)	CO ₂ emissiyası azalması (%)	NO _x emissiyası azalması (%)
0	0	0
10	8	10
20	16	20
30	27	32
40	35	42
50	40	47

Təhlil göstərir ki, bərpa olunan enerji mənbələrinin payı artdıqca dizel generatorlarının iş yükü azalır və bu da yanacaq sərfini birbaşa şəkildə azaldır. 30%-lik integrasiya səviyyəsində sistemdə enerji balans optimal səviyyəyə çatır, bundan yuxarı artım isə azalan əlavə effektivlə müşahidə olunur [6].

Beləliklə, aparılan təhlillər göstərir ki, gəmi mikro şəbəkələrinin qurulması və idarə olunması dəniz nəqliyyatında enerji effektivliyinin artırılması və ekoloji təsirin azaldılması üçün əsas texnoloji istiqamətlərdən biridir. Bu sistemlər enerji mənbələrinin integrasiyası, yük balansının tənzimlənməsi və real vaxtda optimallaşdırma imkanları hesabına həm texniki, həm də iqtisadi üstünlüklər yaradır. Müasir idarəetmə alqoritmləri və enerji saxlama texnologiyalarının tətbiqi mikro şəbəkələrin sabitliyini və dayanıqlığını artırır. Bu yanaşma nəticəsində gəmi sistemlərində enerji paylanması daha çevik olur, yanacaq israfı azalır və istismar dövrü uzanır. Mikro şəbəkələrin

inkişafı həm də bərpa olunan enerji texnologiyalarının dəniz nəqliyyatına integrasiyasını sürətləndirir və “yaşıl gəmiçilik” konsepsiyasının formalaşmasına zəmin yaradır.

Nəticə. Nəticə olaraq, mikro şəbəkə əsaslı enerji sistemlərinin elektrifikasişdırılmış dəniz nəqliyyatında tətbiqi, enerji paylanması optimallaşdırılması və emissiyaların azaldılması baxımından mühüm elmi-texnoloji yenilik hesab olunur. Aparılan tədqiqatlar və beynəlxalq təcrübələr göstərir ki, bu sistemlər enerji səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, istismar sabitliyini və etibarlılığı da təmin edir. Mikro şəbəkələrin strukturunda süni intellekt və proqnozlaşdırıcı idarəetmə alqoritmlərinin tətbiqi real vaxtda enerji axınlarının effektiv idarəsini mümkün edir və sistemin adaptiv davranışını formalaşdırır. Bərpa olunan enerji mənbələrinin payının artırılması nəticəsində karbon və azot oksidi emissiyalarının əhəmiyyətli dərəcədə azalması beynəlxalq ekoloji tələblərə uyğunluğu təmin edir. Beləliklə, mikro şəbəkələr dəniz nəqliyyatında yaşıl texnologiyaların tətbiqini sürətləndirən, enerji təhlükəsizliyini gücləndirən və davamlı inkişaf strategiyalarının reallaşdırılmasına elmi əsas yaradan kompleks sistemlər kimi qiymətləndirilir.

Ədəbiyyat

1. Əliyev E. “Bərpa olunan enerji mənbələrinin dəniz nəqliyyatında tətbiqi problemləri və perspektivləri”, Texnika Nəşriyyatı. Bakı, 2023-cü il
2. Həsənov K., Məmmədov N. “Gəmi enerji sistemlərində mikro şəbəkələrin integrasiyası və idarəetmə üsulları” Azərbaycan Texniki Universitetinin Elmi Əsərləri, №3, s. 45–52.
3. Rzayev T. “Elektrifikasişdırılmış gəmi sistemlərində enerji balansının optimallaşdırılması” Energetika və Avtomatika Jurnalı, №1, s. 27–34.
4. Иванов, А. П., Кузнецов В. С. Микроэнергетические системы судовых установок. Санкт-Петербург: Судостроение, 2018-140 стр.
5. Смирнова, Е. Н. “Оптимизация управления энергоподачами в судовых микросетях” Энергетика и Электротехника, №7, с. 58–65.
6. Петров М. В. “Гибридные энергетические установки морских судов: анализ и перспективы.” Вестник Морского Транспорта, №4, с. 12–20.

Мəqalə qəbul olunub: 30.10.25
Təvsiyə edib: prof. Qafarov A.M.