

Nuotoliniu būdu valdomų povandeninių transporto priemonių (ROV) taikymas jūrinių vėjo jėgainių parkų ir povandeninės infrastruktūros patikrai: lyginamoji analizė

Justas Žaglinskis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lietuvos jūreivystės akademija, Mokslo ir infrastruktūros prodekanas, docentas, technologijos mokslų daktaras

Julius Parnarauskas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lietuvos jūreivystės akademija, Bepiločių transporto priemonių technikas

Evelina Noreikaitė

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Lietuvos jūreivystės akademija, Jūrininkų mokymo centro laborantė

Anotacija

Straipsnyje analizuojamas nuotoliniu būdu valdomų povandeninių transporto priemonių (angl. *Remotely Operated Vehicles*, ROV) poreikis ir taikymo galimybės planuojamų jūrinių vėjo elektrinių (JVE) parkų infrastruktūros priežiūrai Lietuvos išskirtinės ekonominės zonos (IEZ) sąlygomis. Pateikiamas ROV ir narų darbo palyginimas, apžvelgiama ROV klasifikacija pagal tarptautinius standartus, įvertinami Lietuvos jūrinės aplinkos veiksniai ir JVE parkų povandeninės infrastruktūros ypatumai.

Tyrimo rezultatai aktualūs aukštosioms mokykloms, jūrinės energetikos įmonėms ir institucijoms, atsakingoms už povandeninės infrastruktūros saugumą, siekiančioms pasirengti jūrinės industrijos transformacijai ir stiprinti povandeninės infrastruktūros apsaugą. ROV technologijų integravimui būtinas kompleksinis pasirengimas: ROV operatorių, pardavimo ir aptarnavimo specialistų rengimas, atsarginių dalių tiekimo grandinės užtikrinimas ir kt.

Reikšminiai žodžiai: nuotoliniu būdu valdomos povandeninės transporto priemonės, ROV, jūrinė energetika, povandeninė infrastruktūra, jūrinis saugumas, jūriniai vėjo jėgainių parkai.

Įvadas

Temos aktualumas. Šiuo metu Lietuvoje sparčiai vystomas pirmasis Baltijos šalyse JVE parko „Curonian Nord“ projektas. Parkas turėtų pagaminti 25–30 proc. dabartinio šalies elektros energijos poreikio ir sumažinti šalies priklausomybę nuo elektros importo [1]. Planuojama, kad pirmąjį parką sudarys iki 55 jūrinių vėjo elektrinių, o ateityje numatoma plėsti JVE parkų tinklą Lietuvos išskirtinėje ekonominėje zonoje (IEZ) [2]. Šių projektų įgyvendinimas ne tik padidins atsinaujinančios energijos gamybą ir sukurs naujų darbo vietų [2], bet ir pareikalaus naujos povandeninės infrastruktūros, kurios nuolatinė priežiūra taps būtina eksploatacijos dalimi [3].

JVE infrastruktūrai Baltijos jūroje įtaką darys atmosferiniai ir povandeniniai veiksniai. Viršvandeninės konstrukcijos bus veikiamos stiprių vėjų, drėgmės, ultravioletinės spinduliuotės, o povandeninės dalys patirs hidrodinaminę apkrovą, biologinių apnašų susidarymą ir korozinį poveikį. Norint užtikrinti infrastruktūros saugumą ir numatytą 25–35 metų eksploataavimo trukmę, būtina nuolatinė techninė priežiūra ir reguliarūs patikrinimai [4, 5, 6].

JVE viršvandeninių konstrukcijų patikros atliekamos naudojant tuos pačius būdus kaip sausumoje esančių VE, pasitelkiant aukštalipius ir bepiločius orlaivius (angl. *Unmanned Aerial Vehicle*, UAV) [7]. Povandeninės infrastruktūros patikrinimai reikalauja kitų sprendimų – kvalifikuotų narų ir ROV. Skirtingai nei narų, UAV ar aukštalipių, šiuo metu Lietuvoje ROV valdymo ir priežiūros specialistų rengimo galimybės yra ribotos, todėl būtina ieškoti būdų šiems gebėjimams plėtoti.

Pastarųjų metų įvykiai Baltijos jūros regione dar labiau išryškino poreikį rengti kompetentingus specialistus, gebančius naudoti ROV ne tik pramonės, bet ir gynybos srityse. Povandeninės

infrastruktūros pažeidimai, įvykę 2023–2025 metais, kelia susirūpinimą dėl regiono energetinio, ryšių ir kitos povandeninės infrastruktūros saugumo:

- 2023 m. spalio 8 d. buvo nutrauktas dujotiekis „Balticconnector“, jungiantis Estiją ir Suomiją [8];
- 2024 m. lapkričio 17–18 d. buvo pažeisti du telekomunikacijų kabeliai – „BCS East West Interlink“ (Lietuva–Švedija) ir „C – Lion1“ (Suomija–Vokietija) [9];
- 2024 m. gruodžio 25 d. buvo nutrauktas elektros kabelis „Estlink 2“, jungiantis Estiją ir Suomiją [10].

Šie incidentai parodė, kad povandeninės infrastruktūros apsauga tampa ne tik techniniu, bet ir strateginiu valstybės prioritetu. Atsižvelgiant į galimą tyčinį žalingą poveikį, būtina turėti saugių ir operatyvių duomenų rinkimo būdų, kurių naudojimas nekeltų grėsmės žmonių saugumui. Šiame kontekste ROV gali atlikti itin svarbų vaidmenį – nuo reguliarių inspekcijų, povandeninių objektų identifikavimo iki duomenų žalos vertinimui surinkimo.

Temos problematika. Šiuo metu Lietuvoje povandeninės infrastruktūros priežiūrai ir objektų patikrai yra pasitelkiami narai, tačiau jų darbas po vandeniu yra priskiriamas prie didelio pavojingumo darbų. Dirbant po vandeniu atsiranda įvairių rizikų: susirgti dekompresine liga, patirti barotraumą, skęsti, apsinuodyti ar gauti azoto narkozę [11]. Narų darbas yra ribojamas gylio, dugno laiko, saugumą užtikrinančios įrangos prieinamumo ir reikalauja didelių finansinių sąnaudų. Būsimos JVE parkų povandeninės infrastruktūros lokacija ir infrastruktūros dydis reikalauja ieškoti efektyvesnių ir saugesnių alternatyvų povandeninėms užduotims vykdyti. Nors tarptautinėje praktikoje plačiai taikomos ROV technologijos leidžia reikšmingai padidinti operacijų efektyvumą ir saugumą [12], jų integracija į Lietuvos povandeninės infrastruktūros priežiūros praktiką vis dar išlieka ribota. Pagrindinės kliūtys, stabdančios ROV technologijų plėtrą Lietuvoje, yra šios:

1. Didelės pradinės investicijos – pažangūs ROV yra brangūs.
2. Specialistų trūkumas – Lietuvoje nėra ROV operatorių ir techninio aptarnavimo specialistų rengimo kursų.
3. Teisinis neapibrėžtumas – nėra aiškiai reglamentuota, kaip ROV gali būti integruojami į infrastruktūros priežiūrą ir kritinės infrastruktūros apsaugą.
4. Informacijos stoka – siekiant užtikrinti ROV panaudojimą Lietuvos IEZ, būtina atlikti bandymus, įvertinančius hidrologinių sąlygų poveikį jų veikimui.

Atsižvelgiant į šiuos iššūkius, būtina išsamiau analizuoti ROV taikymo galimybes povandeninės infrastruktūros priežiūrai, identifikuoti efektyviausius jų taikymo būdus ir pateikti rekomendacijų tolimesnei šių technologijų plėtrai Lietuvoje.

Analizės objektas. ROV taikymo poreikis ir galimybės būsimos Lietuvos JVE parkų povandeninės infrastruktūros priežiūrai, įvertinant jų techninius ir veikimo ypatumus, lyginant su tradiciniu narų darbu.

Tikslas. Išanalizuoti ROV taikymo poreikį ir galimybes Lietuvos JVE parkų povandeninės infrastruktūros priežiūrai, įvertinant jų techninius ir veikimo ypatumus, klasifikaciją, pritaikomumą Lietuvos išskirtinės ekonominės zonos (IEZ) sąlygoms bei lyginant su tradiciniu narų darbu.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti ir palyginti narų bei ROV taikymo privalumus ir trūkumus povandeninės infrastruktūros priežiūrai, įvertinant jų sąveikos galimybes vykdant kompleksines užduotis.
2. Įvertinti ROV klasių techninius ir veikimo ypatumus pagal tarptautinius standartus bei jų taikymo galimybes povandeninėse infrastruktūros priežiūros operacijose.
3. Išanalizuoti Lietuvos Baltijos jūros aplinkos veiksnius ir įvertinti jų poveikį ROV taikymo galimybėms planuojamų JVE parkų teritorijoje.
4. Nustatyti būsimos Lietuvos JVE parkų povandeninės infrastruktūros techninės priežiūros poreikius ir įvertinti ROV taikymo efektyvumą šių užduočių vykdymui.

Analizės metodai: literatūros analizė, lyginamoji analizė, klasifikacinė analizė, situacijos analizė (kontekstinė analizė), sisteminė sintezė.

Povandeninės infrastruktūros priežiūros metodų analizė: narai ir ROV

Povandeninės infrastruktūros priežiūrai taikomi skirtingi metodai, tarp kurių dominuoja profesionalių narų atliekami darbai ir ROV naudojimas [12]. Abu metodai pasižymi specifiniais pranašumais ir apribojimais, priklausančiais nuo aplinkos sąlygų, užduočių pobūdžio ir operacijų sudėtingumo.

Narų taikymo ypatumai: privalumai ir trūkumai

Narų pasitelkimas – vienas seniausių ir plačiausiai taikomų metodų vykdant povandeninės infrastruktūros apžiūrą, techninę priežiūrą, gelbėjimo ir kitas komercines operacijas. Lyginant su ROV, narai turi keletą esminių pranašumų [13–16]:

- *Gebėjimas spręsti situacijas vietoje.* Narai gali priimti sprendimus vietoje ir prisitaikyti prie netikėtai kintančių sąlygų.

- *Aukštas tikslumo lygis.* Žmogaus rankos vis dar pranoksta ROV manipulatorius atliekant smulkius, subtilius darbus – pvz., kabelių sujungimus, suvirinimo darbus.

- *Jutiminis grįžtamasis ryšys.* Narai gali ne tik matyti, bet ir jausti struktūrų paviršius, aptikti vibracijas, nuotėkius ar kitus pažeidimus, kurių vien vizualiai galima nepastebėti.

- *Universalumas įvairiose aplinkose.* Patyrę narai gali dirbti sudėtingose, ribotos erdvės aplinkose, kuriose ROV veikimas yra apribotas dėl manevringumo ar sunkesnio susiorientavimo.

Nepaisant šių reikšmingų privalumų, narų taikymas povandeninėse operacijose turi nemažai apribojimų ir rizikų, kurios ypač išryškėja gilesniuose, sudėtingesniuose arba ilgesnį laiką trunkančiuose darbuose. Pagrindiniai apribojimai yra šie:

- *Fiziologiniai apribojimai ir rizikos:* dekompresinė liga, hipotermija, fizinis nuovargis.

- *Saugumo pavojai:* įsipainiojimo, nardymo profilio neišlaikymo dėl įrangos gedimo ar žmogiškosios klaidos.

- *Didelės sąnaudos:* narų parengimas, įranga ir kiti logistiniai kaštai viršija daugelio ROV kaštus vidutiniu – ilguoju laikotarpiu.

- *Ribotas veikimo efektyvumas sudėtingose, ilgalaikėse operacijose.* Dėl fizinio nuovargio ir poreikio dirbti pamainomis.

Narų taikymas sudėtingose, ilgalaikėse ar didelių gylių operacijose išlieka ribotas dėl objektyvių saugos ir fiziologinių veiksnių. Lietuvoje nuo 2019 m. nebėra galiojančių nacionalinio lygmens norminių aktų, reglamentuojančių narų darbo saugą [17]. Atskirais atvejais gydymas buvo suteiktas Karinių jūrų pajėgų barokameroje, nors ši institucija nėra formaliai įpareigota teikti tokias paslaugas, o jų pasiekiamumo sąlygos nėra aiškiai apibrėžtos [18–20]. Atsižvelgiant į ribotas gydymo galimybes ir teisinį neapibrėžtumą, ROV diegimas turėtų būti laikomas ne tik saugumo stiprinimo, bet ir operacijų efektyvumo didinimo priemone, leidžiančia užtikrinti tęstinį, tikslesnį ir mažiau resursų reikalaujantį užduočių vykdymą po vandeniu.

ROV taikymo ypatumai: privalumai ir trūkumai

Alternatyva narų atliekamiems povandeniniams darbams – ROV. Šios sistemos aprūpintos pažangiomis stebėjimo ir valdymo technologijomis: didelės raiškos kameromis, sonarais, jutikliais, manipulatoriais ir kt. [12–15, 22–25]. Pagrindiniai ROV privalumai:

- *Saugumas.* ROV gali veikti pavojingomis sąlygomis (didesniame gylyje, stipriose srovėse, esant žemai temperatūrai ar užterštam vandeniui), pašalindami riziką žmogaus gyvybei.

- *Laiko efektyvumas.* ROV gali būti greitai paruošti darbui, veikti po vandeniu be pertraukų, jų neveikia fizinis nuovargis, jie nereikalauja dekompresinių sustojimų iškilimo metu.

- *Technologinis lankstumas.* ROV gali būti modifikuojami su įvairiais priedais (pvz., manipulatoriais, ultragarsiniais konstrukcijų storio matuokliais), pritaikant juos konkrečioms užduotims – nuo povandeninės infrastruktūros apžiūros, objektų identifikavimo iki minų neutralizavimo.

- *Mažesnės ilgalaikės sąnaudos.* Vienkartinė investicija ilgaiui atsiperka, ypač atliekant pasikartojančias operacijas.

- *Aukštos kokybės duomenys.* Naudojami aukštos raiškos jutikliai, sonarai, kameros leidžia atlikti tikslias analizes ir vertinimą.

ROV užtikrina didesnę saugumą, leidžia dirbti ilgiau ir tiksliau, taip pat sumažina žmogaus įsitraukimą į pavojingas situacijas. Šios technologijos tampa ypač vertingos vykdant ilgalaikes, pasikartojančias techninės priežiūros užduotis, nepriklausomai nuo užduoties vykdymo gylio.

Nepaisant daugybės privalumų, ROV naudojimas povandeninėje infrastruktūros priežiūroje turi ir tam tikrų trūkumų, kurie riboja jų taikymą arba reikalauja papildomų resursų. Pagrindiniai ROV trūkumai lyginant su narų darbu:

- *Ilgesnis sprendimų priėmimas.* Veikimas priklauso nuo operatoriaus, o duomenų perdavimas gali vėluoti.

- *Ribotas manevringumas ir manipuliatorių tikslumas.* ROV manipuliatorių judesiai dar nėra tokie tikslūs kaip žmogaus rankų, tai gali sunkinti tam tikrų intervencinių užduočių atlikimą.

- *Ribotas energijos šaltinis.* Kai kurie ROV veikia vidinių baterijų pagrindu, todėl jų veikimo trukmė yra ribota. Tai sunkina ilgalaikius ar sudėtingus darbus. Šį trūkumą galima kompensuoti prijungiant ROV prie išorinio energijos šaltinio, bet tai didina sistemos sudėtingumą ir riboja judėjimo laisvę.

- *Didelės pradinės investicijos.* ROV įsigijimas, ypač su pažangiais jutikliais ir valdymo sistemomis, reikalauja didelių pradinių investicijų.

Tiek narų tiek ROV taikymas turi pranašumų ir trūkumų, todėl šių metodų taikymas neturėtų būti priešpriešinamas – tai skirtingi, tačiau vienas kitą papildantys sprendimai. ROV užtikrina saugumą, efektyvumą ir aukštos kokybės duomenų surinkimą, o narai išlieka nepakeičiami ten, kur reikia lankstumo, tikslumo ar žmogaus sprendimo. Optimalus požiūris – naudoti abu metodus kompleksiskai: ROV gali atlikti pirminę žvalgybą ar periodinę stebėseną, o narai įsitraukia tik esant būtinybei, kai reikia atlikti specifines intervencines užduotis. Toks derinys leidžia užtikrinti tiek saugumą, tiek veiklos efektyvumą.

ROV klasifikacija ir taikymo galimybės povandeninėse operacijose

Nuotoliniu būdu valdomi povandeniniai robotai (ROV) klasifikuojami pagal dydį, valdymo būdą ir techninius pajėgumus, o jų taikymo sritis apima platų užduočių spektrą – nuo vizualinių apžiūrų iki sudėtingų inžinerinių operacijų. Dėl modulinės konstrukcijos ROV gali būti lengvai modifikuojami, integruojant papildomus jutiklius ar įrankius, atsižvelgiant į konkrečius operacijų reikalavimus.

Remiantis Tarptautinės jūrinių rangovų asociacijos (IMCA) ir NORSOK U-102 standartais, ROV skirstomi į penkias pagrindines klases, kurios apibrėžiamos pagal įrenginio konstrukciją, pajėgumą ir funkcinis parametrus [26–28]. Pagrindiniai kiekvienos klasės ypatumai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. ROV klasifikacija pagal IMCA ir Norsok U-102 standartus

Klasė	Pavadinimas	Pagrindinės charakteristikos	Apytikslis svoris
I klasė	Stebėjimo klasės ROV	Maži, lengvi, aprūpinti kameromis, apšvietimu ir sonarais. Gali turėti papildomų jutiklių.	Iki 100 kg
II klasė	Stebėjimo ROV su papildoma apkrova	Turi didesnę apkrovos talpą nei I klasės ROV, papildomus jutiklius, manipulatorius, keletą kamerų.	Nuo 100 kg. iki 900 kg
III klasė	Darbinės klasės ROV	Galingi, dideli įrenginiai aprūpinti manipulatoriais, pažangiais sonarais ir įvairiais įrankiais.	Daugiau nei 900 kg
IV klasė	Velkami ir dugnu judantys ROV	Velkami laivo arba juda dugnu su ratų ar vikšrų sistema.	Kintamas
V klasė	Specializuoti ir eksperimentiniai ROV	ROV, kurie nepatenka nė į vieną iš aptartų keturių klasių	Kintamas

Tinkamo ROV tipo pasirinkimas turi būti pagrįstas planuojamų užduočių pobūdžiu, darbo gyliu, aplinkos sąlygomis, reikalingų duomenų tipu, laivo aprūpinimu, biudžetiniais apribojimais [29]. Siekiant išsamiau suprasti taikymo skirtumus, kiekviena klasė analizuojama atskirai.

I klasė – Stebėjimo klasės ROV

Šios klasės įrenginiai plačiai taikomi pirminiam povandeninės infrastruktūros vertinimui, vizualinėms apžiūroms ir darbui riboto priėjimo zonose. Jų paprastas valdymas ir minimalūs logistiniai reikalavimai leidžia operacijas greitai pradėti tiek nuo krantinės, tiek iš mažų laivų.

Pagrindiniai šios klasės apribojimai – ribotas veikimo laikas, maža naudingoji apkrova ir didelis jautrumas aplinkos veiksniams, ypač srovėms bei drumstam vandeniui.

Tipiniai šios klasės modeliai: *Blue Robotics BlueROV2*, *VideoRay Pro 5*, *Deep Trekker DTG3*.

II klasė – Stebėjimo ROV su papildoma apkrova

Šios klasės įrenginiai skirti detalesniam infrastruktūros vertinimui ir paprastoms intervencinėms užduotims, tokioms kaip nuosėdų šalinimas ar objektų iškėlimas. Jie pasižymi didesne apkrova, pažangesniais jutikliais, manipulatoriais ir gali veikti iki 1000 m gylyje.

Jų kabelinis energijos tiekimas leidžia dirbti po vandeniu ilgą laiką, o sudėtingesnė valdymo ir perdavimo sistema užtikrina tikslesnį duomenų rinkimą. Dažnai reikalinga speciali nuleidimo sistema (angl. *A Frame Launch and Recovery System, LARS*) ir kabelio valdymo įranga (angl. *Tether management System, TMS*), todėl paruošimas sudėtingesnis nei I klasės ROV.

Tipiniai šios klasės modeliai: *Saab Seaeye Falcon*, *Sub-Atlantic Mohican*, *Argus Mariner Compact*.

III klasė – Darbinės klasės ROV

Šios klasės įrenginiai skirti sudėtingiems povandeninės infrastruktūros priežiūros ir remonto darbams, įskaitant valymą, montavimą, virinimą, pjovimą ar krovinių kėlimą. Jie aprūpinti galingais manipulatoriais, įvairiais įrankiais, aukštos galios varikliais ir pažangiais jutikliais.

III klasės ROV veikia dideliuose gyliuose (dažnai daugiau nei 1000 m), maitinami per aukštos galios kabelį, o jų modulinė konstrukcija leidžia pritaikyti sistemą konkrečioms operacijoms. Integruotos navigacijos sistemos (sonarai, inerciniai jutikliai) užtikrina tikslų pozicionavimą net sudėtingomis sąlygomis. Dėl didelio svorio ir matmenų (daugiau nei 900 kg) šiems įrenginiams dažnai reikalingi specializuoti laivai (OSV) bei kompleksinė logistinė parama (LARS, TMS, ROV valdymo konteineris ir kt.). Nors tai universaliausios ROV įrenginiai su plačiausiomis funkcijomis, dėl didelių eksploatacinių kaštų jie dažniausiai taikomi tik stambiuose pramoniniuose projektuose [30].

Tipiniai šios klasės modeliai: *Saab Seaeye Leopard*, *Forum XLX-C*, *Schilling Robotics HD ROV*.

IV klasė – Velkami arba dugnu judantys ROV

IV klasei priskiriami tempiamieji ir dugnu judantys ROV, kurie vykdo kitokio pobūdžio užduotis nei I–III klasių įrenginiai. Šie robotai – tai specializuotos sistemos, skirtos povandeniniams tyrimams. Tempiamieji modeliai yra velkami laivų ir pasižymi efektyvumu vykdant didelio masto tyrimus, pavyzdžiui, kabelių trasų ar jūrinių vėjo elektrinių (JVE) parkų teritorijų skenavimus. Tuo tarpu dugnu judantys ROV labiau tinkami detalioms inspekcijoms sudėtingomis sąlygomis (pvz., stiprios srovės, nelygus reljefas) arba kabelių įkasimo darbams.

Kaip ir III klasės įrenginiai, šie ROV reikalauja specializuotų laivų bei tempimo ar nuleidimo sistemų. Dėl savo paskirties jie atlieka specifines užduotis, kurios negali būti efektyviai vykdomos I–III klasių ROV.

Tipiniai šios klasės modeliai: *SMD Q-Trencher 500*, *Teledyne Benthos Towed Vehicle TV-940*.

V klasė Prototipai ir eksperimentiniai ROV

Šiai klasei priskiriami prototipiniai, eksperimentiniai ar specifinei paskirčiai skirti povandeniniai robotai, kurie nepatenka į nė vieną iš anksčiau apžvelgtų klasių. Jie dažnai kuriami tyrimų ir technologinės plėtros tikslais, siekiant įdiegti naujas funkcijas ar išspręsti unikalios povandeninės veiklos iššūkius. V klasės įrenginiai gali apimti hibridines ROV–AUV sistemas, robotus su autonominio veikimo elementais, dirbtinio intelekto algoritmų integracija ar itin tiksliais manipulatoriais. Tokie sprendimai dažnai taikomi bandymų aplinkose, laboratorijose arba specifinėse, nestandartinėse misijose.

Tipiniai šios klasės pavyzdžiai: *Saab Sabertooth, Exail K-STER C*.

ROV taikymo galimybės Lietuvos JVE parkų infrastruktūros priežiūrai

ROV technologijų taikymas JVE povandeninės infrastruktūros priežiūrai tampa vis aktualesnis, Baltijos jūroje plečiantis atsinaujinančios energetikos sektoriui. Šiame skyriuje analizuojamos Lietuvos IEZ jūrinei aplinkai būdingos sąlygos, jų įtaka ROV eksploatacijai, aptariami numatomi JVE parkų povandeninės infrastruktūros priežiūros poreikiai, remiantis Europos valstybių praktika ir taikomais techniniais standartais.

Lietuvos jūrinės aplinkos veiksniai ir jų įtaka ROV operacijoms

Lietuvos Respublikos teritoriniame bendrajame plane numatyta 644,33 km² teritorija, esanti Lietuvos išskirtinėje ekonominėje zonoje (IEZ), skirta potencialiai atsinaujinančios energetikos plėtrai [31]. Šiuo metu vystomas pirmasis etapas 120 km² teritorijoje, nutolusioje 36,8 km nuo kranto linijos ir 50,3 km nuo Klaipėdos jūrų uosto.

Jūrinės aplinkos veiksniai apima tiek teritorijos lokacijos ypatumus, tiek oro ir vandens parametrus, turinčius tiesioginę įtaką laivo, ROV sistemos parinkimui ir efektyviam jos naudojimui. Toliau apžvelgti pagrindiniai parametrai ir jų įtaka ROV operacijų vykdymui.

- *Būsimos infrastruktūros lokacija ir atstumas nuo kranto.* Numatytas atstumas nuo kranto (40–50 km) lemia poreikį naudoti laivus, galinčius užtikrinti ROV įrangos transportavimą, nuleidimą, elektros tiekimą, tinkamas personalo darbo sąlygas. Būtina apsauga nuo meteorologinių veiksnių (vėjo, kritulių, karščio) tiek kelionės, tiek operacijų metu.

- *Vėjas ir bangavimas.* Baltijos jūroje bangavimas priklauso nuo sezono: rudenį ir žiemą (spalio–vasario mėn.) bangos siekia 0,75–1,02 m, o ramiausiu laikotarpiu gegužės–rugpjūčio mėn. sumažėja iki 0,5–0,6 m. Vidutinis metinis bangų aukštis pateiktas lentelėje 2 [32].

2 lentelė. Vidutinis Baltijos jūros bangavimas metrais

Mėnuo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vid.	1,02	0,78	0,70	0,52	0,47	0,51	0,57	0,63	0,74	0,75	0,76	0,92

Esant didesniai bangavimui, ROV nuleidimas, iškėlimas bei užduoties vykdymas tampa sudėtingesnis, ypač jei laivas neturi dinaminio pozicionavimo ar stabilizavimo sistemų. Vis dėlto, esant galimybei laivą inkaruoti prie pačios JVE konstrukcijos, galima užtikrinti pakankamą stabilumą ir pozicijos išlaikymą [33].

- *Vandens srovės.* Vandens srovės daro tiesioginę įtaką ROV stabilumui, valdymui ir kabelio įtempimui. Didesnis srovės greitis gali trukdyti išlaikyti poziciją ar atlikti tikslas operacijas, ypač vykdant intervencinius darbus ar matavimus. Planuojamo JVE parko teritorijoje vandens srovės neviršija 0,25 mazgo ir, didėjant gyliui, dar labiau silpnėja [25]. Tokiomis sąlygomis galima efektyviai naudoti ir mažesnės galios ROV, todėl III klasės sistemų ar specializuoto laivo panaudojimas dažnai nėra būtinas.

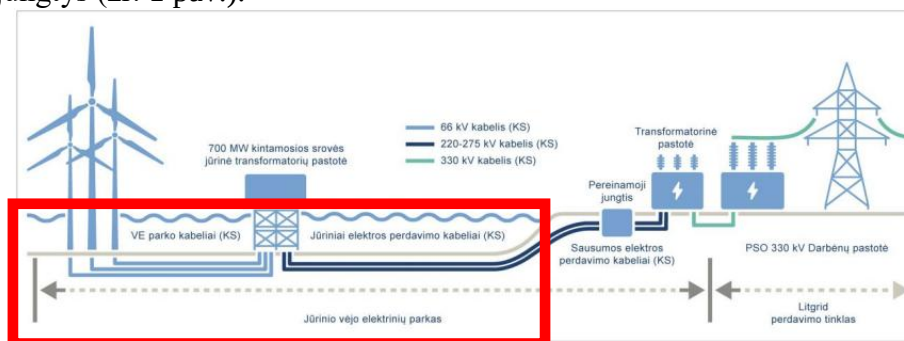
- *Gylis.* Planuojamo Lietuvos JVE parko teritorijos vidutinis gylis siekia apie 35 m – tai optimalus diapazonas daugeliui kompaktiškų ROV modelių. Tokiu gyliu nei aplinkos slėgis, nei

signalų perdavimas per kabelį nesukelia reikšmingų techninių iššūkių: valdymas išlieka stabilus, o kabelio ilgis santykinai trumpas, todėl mažėja pasipriešinimo ir susipainiojimo rizika [31].

• *Matomumas po vandeniu.* Matomumas po vandeniu kinta priklausomai nuo sezono. Lapkričio – kovo mėnesiais, esant mažesnei biologinei veiklai ir stabilesnėms hidrometeorologinėms sąlygoms, vidutinis matomumas siekia 5–7 m. Vasaros laikotarpiu (birželio–rugsėjo mėnesiais) dėl dumblių žydėjimo vanduo tampa drumstas, o matomumas sumažėja iki 1–3 m [32, 34]. Esant tokioms sąlygoms, optinių prietaisų efektyvumas mažėja, todėl būtina naudoti ROV su aktyviais jutikliais – sonarais, lazeriniais skeneriais ar kitomis sistemomis, leidžiančiomis tiksliai orientuotis ir identifikuoti objektus net esant ribotam matomumui.

Preliminarūs būsimų JVE parkų povandeninės infrastruktūros techninės priežiūros poreikiai

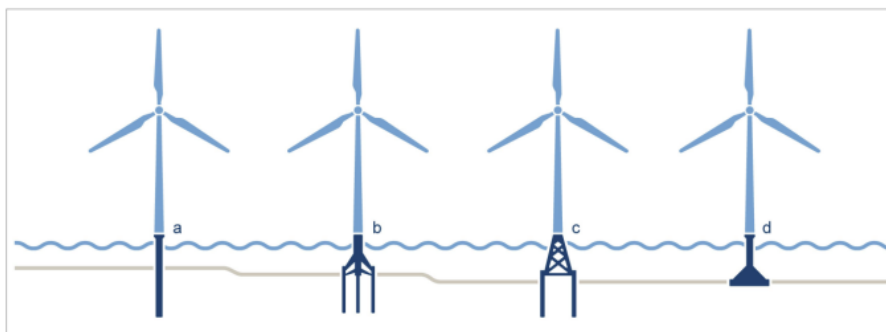
JVE parkų povandeninė infrastruktūra apima įvairius inžinerinius komponentus, kurių periodinė techninė patikra yra būtina saugiam, efektyviam ir ilgalaikiam eksploatavimui. Pagrindiniai priežiūros objektai – JVE ir jūrinių transformatorinių pastolių (JTP) pamatai, elektros perdavimo kabeliai ir jų jungtys (žr. 1 pav.).



1 pav. Jūrinio VE parko infrastruktūros schema.

Šaltinis: Ignitis Renewables. LTOF02 EIA EV RPT 015253. Poveikio aplinkai vertinimo programa, 2024, p. 17

Konkretus JVE ir JTP pamatų tipas planuojamame Lietuvos JVE Baltijos jūroje nėra nustatytas. Jį pasirenks parko vystytojas. Atsižvelgiant į parko lokaciją ir gylį, kuris yra santykinai nedidelis, bus renkama iš fiksuoto tipo JVE pamatų, (žr. 2 pav.).



2 pav. Fiksuoto tipo jūrinių vėjo elektrinių pamatų tipai, a) monopolinis; b) tripodas; c) karkasinis; d) gravitacinis
Šaltinis: Ignitis Renewables. (2024). LTOF02 EIA EV RPT 015253 Poveikio aplinkai vertinimo programa, 16 p.

Pamatų skersmenys priklausomai nuo tipo svyruoja nuo 4 m iki 40 m. Atstumai tarp atskirų JVE gali siekti iki 900 m (min. 3x rotoriaus diametro) (32). Net ir vizualinė 4 m skersmens objekto apžiūra po vandeniu pareikalaus ilgo dugno laiko, o atstumas tarp objektų neleis patikrinti kelių JVE vienu panėrimu.

JVE ir JTP kabelių linijos vidutiniškai įgilinamos į dugną 1–3 m. Įkastas kabelis yra apsaugomas nuo išorinių poveikių (laivo inkarų, žvejybinių tinklų užsikabinimo, srovių), sumažina jūrinei ekosistemai daromą įtaką. Identifikavus, kad kabelis buvo išplautas, atsiras poreikis naudojant narus arba ROV surinkti daugiau duomenų apie jo būklę prieš pradedant vykdyti įkasimo darbus.

JVE ir JTP kabelių sujungimo vietoms apsaugoti dažniausiai naudojami J formos vamzdžiai, kurie užtikrina mechaninę apsaugą nuo išorinių pažeidimų ir nuolatinio aplinkos poveikio. Atsižvelgiant į jų svarbą bendram kabelių vientisumui, šios apsaugos konstrukcijos turi būti reguliariai tikrinamos viso eksploataavimo laikotarpiu [35].

Preliminarus būsimų Lietuvos JVE parkų povandeninės infrastruktūros patikrinimų periodiškumas priklausys nuo konkretaus JVE modelio, techninių sprendinių bei įrangos gamintojų keliamų reikalavimų. Atsižvelgiant į esamą JVE parkų priežiūros praktiką ir taikomus inspekcijų metodus, sudaryta lentelė, apibendrinanti rekomenduojamą periodiškumą ir taikomus techninės apžiūros būdus (žr. 3 lentelę) [36, 37, 38].

3 lentelė. Preliminarus būsimų Lietuvos jūrinių vėjo elektrinių parkų povandeninės infrastruktūros patikrinimų periodiškumas ir metodas

Tikrinama konstrukcija	Patikrinimo metodas	Periodiškumas
Povandeniniai kabeliai	API ROV	1 kartas per metus
J formos vamzdžiai ir kitos jungtys	ROV Narai	1 kartas per metus
VE pamatai	ROV	1 kartas per 2 arba 3 metus
	ROV Narai	1 kartas per 5 metus

Pastaba: Narus pasitelkti numatoma tik tuomet, kai ROV metodais negalima užtikrinti reikiamo patikros tikslumo arba kyla poreikis atlikti papildomus veiksmus (pvz., smulkiąją apžiūrą ar remonto darbus).

Atsižvelgiant į infrastruktūros mastą, lokaciją, jūrines aplinkos sąlygas ir jau taikomą praktiką kitose Europos JVE parkuose, ROV bus vienas iš pagrindinių sprendimų Lietuvos JVE parkų povandeninės infrastruktūros eksploatacinei priežiūrai vykdyti. Šių sistemų technologinis lankstumas, galimybė integruoti pažangius jutiklius, ilgaamžė eksploatacija leidžia sumažinti narų įsitraukimo poreikį, padidinti veiklos saugumą ir ilgainiui optimizuoti techninės priežiūros kaštus.

Papildomai vertinant nuotoliniu būdu valdomų povandeninių transporto priemonių (ROV) integracijos galimybes, būtina išskirti jų indėlį į pažangių priežiūros strategijų formavimą. Modernūs ROV įrenginiai, aprūpinti struktūrinės diagnostikos įrankiais – tokiais kaip ultragarsiniai storio matuokliai, lazeriniai skeneriai ar daugiafunkciniai sonarai – sudaro prielaidas sistemingai stebėti infrastruktūros nusidėvėjimą, anksti identifikuoti defektus. Tai leidžia ne tik tiksliai prognozuoti techninės būklės pokyčius, bet ir planuoti profilaktinius intervencinius veiksmus, mažinant neplanuotų veiklos sutrikimų tikimybę [39].

Empiriniai tyrimai, atlikti Vokietijos, Danijos ir Jungtinės Karalystės jūriniuose vėjo elektrinių parkuose, atskleidžia, kad sistemingas ROV naudojimas leidžia optimizuoti priežiūros trukmę ir sąnaudas. Automatizuotas apžiūros maršrutų vykdymas, galimybė veikti be pertraukų bei tikslus duomenų surinkimas leidžia vykdyti kompleksines patikras trumpesniu laiko intervalu, išlaikant arba net gerinant jų kokybinius rodiklius [24].

ROV vis dažniau pasitelkiami ne tik techninei priežiūrai, bet ir infrastruktūros apsaugai. Šiuolaikiniai ROV–AUV sprendimai gali būti integruojami į nuolatinės jūros dugno būklės stebėsenos sistemas, skirtas ankstyvam fizinių ar technogeninių pažeidimų nustatymui. Toks taikymas ypač aktualus kritinės jūrinės infrastruktūros kontekste, kur laiku gauta informacija yra būtina sprendimų priėmimo grandinei [40].

Remiantis Europos jūrinės energetikos sektoriaus patirtimi, pažangūs ROV sprendimai turėtų būti laikomi esminiu infrastruktūros eksploatacijos valdymo įrankiu. Jų taikymas ne tik mažina personalo poveikį rizikingose darbo aplinkose, bet ir padeda įgyvendinti ilgalaikę, duomenimis grįstą priežiūros politiką [41].

Išvados

1. ROV technologijų taikymas povandeninės infrastruktūros priežiūrai yra technologiškai pagrįsta alternatyva narų darbui, ypač atliekant pasikartojančias periodines apžiūras. Dėl ilgesnės veikimo trukmės, mažesnės rizikos žmogaus gyvybei ir didesnio automatizavimo

- lygio, ROV turėtų būti laikomi prioritetiniu sprendimu. Šis požiūris ypač aktualus Lietuvos kontekste, kur nėra aiškiai apibrėžtų dekompresinių susirgimų gydymo protokolų.
2. Vystomų Lietuvos JVE parkų jūrinės aplinkos sąlygos – vidutinis gylis (~35 m), silpnos srovės (<0,25 mazgo) ir žiemos sezono matomumas (5–7 m) – sudaro palankias prielaidas I–II klasių ROV taikymui periodinei povandeninės infrastruktūros priežiūrai.
 3. Sezoninis matomumo sumažėjimas (1–3 m vasaros mėnesiais) riboja optinių sistemų taikymą, todėl techninei priežiūrai būtina naudoti aktyvius jutiklius (sonarus, lazerinius skenerius) ir integruotas pozicionavimo technologijas (USBL, DVL, INS), užtikrinančias navigacinį tikslumą bei sistemų stabilumą esant ribotam matomumui.
 4. III klasės ROV dėl didelių logistinių ir eksploatacinių sąnaudų yra tinkami tik specifinėms sudėtingoms užduotims. IV klasės ROV pritaikomi kabelių įkasimui ar plataus masto skenavimui, o V klasės įrenginiai laikytini eksperimentiniais ar specializuotais sprendimais. Todėl III–V klasių ROV netinka nuolatinei JVE parkų povandeninės infrastruktūros priežiūrai.

Literatūra

1. Ignitis Renewables. (2025). *Lietuvos jūrinio vėjo elektrinių parkas „Curonian Nord*. <https://ignitisrenewables.com/lt/portfolio-item/lietuvos-jurinio-vejo-parkas/>
2. Lietuvos Respublikos Energetikos ministerija. (2024). *Vėjo parko Baltijos jūroje projektai*. <https://enmin.lrv.lt/lt/veiklos-sritys-3/elektra/vejo-parko-baltijos-juroje-projektas/>
3. The Crown Estate. (2019). *Guide to an offshore wind farm*. <https://www.thecrownestate.co.uk/media/2860/guide-to-offshore-wind-farm-2019.pdf>
4. DNV. (2024). *Planning for the unplanned: Operations and maintenance strategies for offshore wind*. <https://www.dnv.com/article/planning-for-the-unplanned-om-strategies-for-offshore-wind/>
5. Offshore Magazine. (2013). *Underwater inspection: What's going on beneath the surface?* <https://offshoreom.editionmanager.com/2013/12/20/underwater-inspection-whats-going-on-beneath-the-surface/>
6. Business Norway. (2024). *Proper maintenance ensures wind turbine efficiency*. <https://businessnorway.com/articles/proper-maintenance-ensures-wind-turbine-efficiency>
7. Heo, S.-J., & Na, W. S. (2025). *Review of Drone-Based Technologies for Wind Turbine Blade Inspection*. Journal of Smart Energy Systems. https://www.researchgate.net/publication/387841252_Review_of_Drone-Based_Technologies_for_Wind_Turbine_Blade_Inspection
8. ERR News. (2023). *Balticconnector case more sabotage than an accident, experts say*. <https://news.err.ee/1609255413/balticconnector-case-more-sabotage-than-an-accident-experts-say>
9. Tech & Economy Blog. (2024). *What Lies Beneath*. <https://techneconomyblog.com/tag/bcs-east-west-interlink/>
10. Geopolitics and Security Studies Centre. (2025). *Laivai ir inkarai. Ar Baltijos jūra tampa tyliuoju Rusijos karo prieš Ukrainą frontu?* <https://www.gssc.lt/publikacija/laivai-ir-inkarai-ar-baltijos-jura-tampa-tyliuoju-rusijos-ir-ukrainos-karo-frontu/>
11. Hardy, K. R. (1997). *Diving-related emergencies*. Emergency Medicine Clinics of North America, 15(1), 223–241. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733862705702923>
12. Nauert, F., & Kampmann, P. (2023). *Inspection and maintenance of industrial infrastructure with autonomous underwater robots*. Frontiers in Robotics and AI, 10. <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1240276>

13. Heidari, M. (2023). *A forward-looking assessment of robotized operation and maintenance strategies for offshore wind farms*. *Energies*, 18(6), 1508. <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/6/1508>
14. Langlois, T. J., Ierodiconou, D. (2023). *Towards remote surveillance of marine pests: A comparison between remote operated vehicles and diver surveys*. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1102506. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1102506>
15. Scarborough Bull, A., Nishimoto, M. M., Love, M. S., Clark, S., Seeto, K., McCrea, M., Park, C., Kui, L., Jainese, C., Aziz, A., & Angle, J. (2022). *Comparison of methods (ROV, diver) used to estimate the composition and abundance of biota colonizing an offshore oil platform: A pilot study*. *Marine Environmental Research* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434322002096>
16. Naval Sea Systems Command (NAVSEA). (2016). *U.S. Navy Diving Manual Revision 7*. https://www.navsea.navy.mil/Portals/103/Documents/SUPSALV/Diving/US%20DIVING%20MANUAL_REV7.pdf
17. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. (2003). *Dėl Narų darbų bendrųjų saugos taisyklių patvirtinimo*. <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.210279?jfwid=2r1mcfcu>
18. Vakarų ekspresas. (2015). *Baltijos jūroje nukentėjo narai*. <https://ve.lt/naujienos/kriminalai/baltijos-juroje-nukentejo-narai-1385560>
19. Atvira Klaipėda. (2021). *Narui suteikta pagalba Karinių jūrų pajėgų barokameroje*. <https://www.atviraklaipeda.lt/2021/08/02/narui-suteikta-pagalba-kariniu-juru-pajegu-barokameroje/>
20. Lietuvos kariuomenė. (n.d.). *Karinės jūrų pajėgos: Uždaviniai ir veikla*. <https://www.kariuomene.lt/karines-juru-pajegos/uzdaviniai-ir-veikla/uzdaviniai/23230>
21. University of Cambridge, Institute of Energy and Environmental Flows. (2022). *A report on fatalities in commercial diving*. <https://emialliance.com/wp-content/uploads/2023/03/2022-12-A-Report-on-Fatalities-in-Commercial-Diving-Paper-Cambridge-University-V2.pdf>
22. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2024). *Review on Repair Technologies for Underwater Concrete Structure Damage of Infrastructures*. <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/35>
23. Capocci, R., Dooly, G., Omerdić, E., Coleman, J., Newe, T., & Toal, D. (2017). *Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(1), 13. <https://doi.org/10.3390/jmse5010013>
24. Adewumi, A., Omotosho, T., & Okai, T. (2023). *Exploring Autonomous and Remotely Operated Vehicles in Offshore Structure Inspections*. https://www.researchgate.net/publication/375641382_Exploring_Autonomous_and_Remotely_Operated_Vehicles_in_Offshore_Structure_Inspections
25. Floerl, O., & Coutts, A. D. M. (2011). *Feasibility of using remote-operated vehicles (ROVs) for vessel biofouling inspections*. Final report for Western Australia Department of Fisheries project DOF10/2011. <https://www.researchgate.net/publication/283273705>
26. Capocci, R., Dooly, G., Omerdić, E., Coleman, J., Newe, T., & Toal, D. (2017). *Inspection-Class Remotely Operated Vehicles—A Review*. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse5010013>
27. NORSOK. (2020). *U-102: Remotely Operated Vehicle (ROV) Services*. Lysaker: Standards Norway. <https://d26pw6xcسد4up.cloudfront.net/1620367574/03-ny-norsok-u-102-rov-services-arnfinn-anfindsen-aker-bp-nils-helge-saetre-oceaneering-trond-er-iksen-equinor.pdf>
28. Hellenic Centre for Marine Research – ROV team. (2020). *ROV Types*. <https://www.eurofleets.eu/wp-content/uploads/2020/07/ROV-Types.pdf>

29. Ramos, T., Córdoba, A., Luque, A., & de las Heras, A. (2022). *Total Design in the Design and Development Process of a Remotely Operated Vehicle (ROV) with Particular Consideration of Sensorization*. Sensors. <https://doi.org/10.3390/s22093284>
30. Teague, J., Allen, M. J., & Scott, T. B. (2018). *The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring*. Ocean Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.10.046>
31. Energetikos ministerija. (n.d.). *VP konkretizuoti sprendiniai*. https://enmin.lrv.lt/upload/s/enmin/documents/files/VP_konkretizuoti_sprendiniai_Aiskinamasis_rastas%281%29.pdf
32. Ignitis Renewables. (2024). *PAV programa*. https://ignitisrenewables.com/wp-content/uploads/2024/02/LTOF02-EIA-EV-RPT-015253-PAV-programa_LT_final.pdf
33. Deng, Y., Ren, X., Nuernberg, M., & Tao, L. (2024). *Launch and recovery of a work class ROV through wave zone in small offshore service vessel*. Ocean Engineering. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801824018791>
34. KORPI. (2023). *Povandeninės aplinkos vertinimo ataskaita: Baltijos jūros Lietuvos teritorinėse vandenyse 2023 m.* https://corpi.lt/wp-content/uploads/2023/03/PAV-ataskaita_jura_2023-03-15_Final.pdf
35. Carbon Trust. (2024). *Cable Protection Systems (CPS) Best Practice Guideline*. https://ctprodstorageaccountp.blob.core.windows.net/prod-drupal-files/2024-11/OWA%20Cable%20Protection%20Systems_New.pdf
36. J. Shambhu, C. Yung (2022). *Guide to Improve Offshore Cable Installation*. <https://publications.tno.nl/publication/34640228/MdglIoD/TNO-2022-R12182.pdf>
37. Lynsey Duguid (2017). *Offshore Wind Substructure Monitoring and Inspection*. <https://cms.ore.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2018/01/Offshore-wind-farm-substructure-monitoring-and-inspection-report-.pdf>
38. Omer Khalid, Guangbo Hao, Hamish MacDonald, Aubryn Cooperman, Fiona Devoy McAuliffe, Cian Desmond, (2023). *Cost-benefit assessment framework for robotics-driven inspection of floating offshore wind farms*. <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/86662.pdf>
39. Sadhu, A., & Waldner, J. F. (2024). *A systematic literature review of unmanned underwater vehicle-based structural health monitoring technologies*. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772991524000318>
40. Teng, S., Liu, A. (2024). *Review of intelligent detection and health assessment of underwater structures*. Engineering Structures. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624005200>
41. Bao, Y., Hajj, M., Liu, Y. (2022). *Review of robot-based damage assessment for offshore wind turbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122001113>

Application of Remotely Operated Vehicles (ROVs) for the Inspection of Offshore Wind Farms and Underwater Infrastructure: A Comparative Analysis

Summary

This article analyses the demand for and applicability of Remotely Operated Vehicles (ROVs) in the maintenance of planned offshore wind farm infrastructure within the Lithuanian Exclusive Economic Zone (EEZ). It presents a comparative assessment of diver- and ROV-based underwater operations, reviews ROV classification under international standards, and evaluates the impact of Lithuania's marine environmental conditions and offshore infrastructure specifics.

The study highlights the relevance of ROV integration for academic institutions, offshore energy stakeholders, and maritime regulators. Effective integration requires a comprehensive approach, including training of operators, service professionals, and the establishment of reliable spare parts supply chains.

Key words: *remotely operated underwater vehicles, ROV, offshore wind energy, subsea infrastructure, maritime security, offshore wind farms.*