

Laivų vidaus degimo variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimas: algoritmo tyrimas ir sudarymas

Justas Žaglinskis

Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla, direktoriaus pavaduotojas mokslui ir inovacijoms, docentas, technologijos mokslų daktaras

Lithuanian Maritime Academy, Lithuania; Deputy Director for research and innovation, Associate Professor, Doctor of Technology Sciences

j.zaglinskis@lajm.lt

Laurynas Jagėla

Lietuvos aukštoji jūreivystės mokykla, Laivų energetinių įrenginių eksploatavimo studijų programos studentas

Lithuanian Maritime Academy, Lithuania; Student of the study program Marine Engineering

l.jagela@lajm.lt

Anotacija

Šiuo tyrimu atliktas optimalių laivyne eksploatuojamos alyvos keitimo periodų algoritmo sudarymas, kuris leidžia sumažinti išlaidas, atsirandančias dėl laivų variklių gamintojų rekomendacijų, kurios galimai yra su didele atsarga. Tuo pačiu algoritmo pagalba numatytos priemonės, kurios neleidžia viršyti tausojančios įrenginio eksploatacijos ribas. Algoritmo pagrindinis tikslas – pagrįstai prailginti tepimo alyvos eksploatacijos laiką atsižvelgiant į variklių gamintojų rekomendacijas ir išlaikant priimtina mechanizmų eksploatacijos būklę. Tepimo alyvos kokybės rodiklių pokytis variklių eksploatacijoje yra labai svarbus faktorius, kurį ignoruojant galimos didelės išlaidos, susijusios su laivų prastovomis. Algoritmo formavimui naudojamos laivyne eksploatuojamų variklių gamintojų rekomendacijos, sunaudojamos alyvos duomenys, alyvų gamintojų informacija ir matematiniai skaičiavimai. Gautas teorinis algoritmas gali būti taikomas optimizacijos procese, tačiau būtina patikrinti, palyginti su laboratorinių tyrimų rezultatais ir, jei būtina, atlikti algoritmo korekcijas. Šie algoritmo tyrimo ir sudarymo publikuojami rezultatai yra pirmas laivų vidaus degimo variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo etapas, kuris turi būti verifikuotas taikomųjų tyrimų rezultatais, matematine analize ir, atsižvelgiant į poreikį, koreguojamas.

Reikšminiai žodžiai: tepimo alyva, laivų varikliai, laivyno eksploatacija.

Optimization of lubricating oil change intervals for marine internal combustion engines: algorithm research and design

Summary

This study investigates an algorithm for optimal oil change intervals in the marine engine fleet, which reduces the costs due to the recommendations of ship engine manufacturers, which may have a large margin of error. At the same time, the algorithm provides measures to avoid exceeding the limits of sustainable operation of the installation. The main objective of the algorithm is to reasonably extend the service life of the lubricating oil in accordance with the recommendations of the engine manufacturers and while maintaining a reminiscent operating condition of the machinery. The variation of lubricating oil quality parameters during engine operation is a very important factor which, if ignored, can lead to high costs associated with ship idling. The obtained theoretical algorithm can be applied in the optimization process, but it is necessary to check and compare it with the results of the laboratory experiments and, if necessary, make corrections to the algorithm. These published results of the algorithm research and design are the first phase of the optimization of the lubrication oil change intervals for marine internal combustion engines, which must be verified by the results of applied research, mathematical analysis and, if necessary, adjusted as needed.

Keywords: lubricating oil, marine engines, fleet exploitation.

Įvadas

Temos aktualumas. Laivo, kaip ir kitų transporto priemonių, eksploatacijoje svarbu tinkamai paskirstyti lėšas, optimizuoti kaštus bei vykdyti tausojančią įrenginių eksploataciją [1, 2]. Balanso išlaikymas tarp tausojančios įrenginių eksploatacijos bei tinkamo kaštų paskirstymo yra svarbus uždavinys transporto parkus eksploatuojantiems valdytojams, kurių pagrindą sudaro įrenginius aptarnaujantys inžinieriai bei finansus valdantys specialistai. Bet koks nukrypimas į perdėtai tausojančią eksploataciją valdytojui atneša nemenkus nuostolius, kaip ir per didelis dėmesys finansinėms išlaidoms. Perdėtas lėšų taupymas lemia pasekmes, kurios atsiranda dėl uždelstos eksploatacijos, pigių medžiagų naudojimo ir pan. Tačiau perdėtas rūpestis mechanizmais ir įrenginiais viso gyvavimo laikotarpio atveju gali kainuoti santykinai brangiai, o eksploatacijai reikalingos medžiagos gali būti naudojamos neracionaliai ir nedideliu eksploataciniu resursu būti atiduodamos perdirbimui arba utilizavimui. Todėl priemonės ir metodai, gebantys optimizuoti finansinius kaštus, susijusius su laivų eksploatacija, pasižymi nuolatiniu aktualumu.

Transporto priemonių energetiniuose įrenginiuose periodiškai keičiamos eksploatacijai jautrios dalys (diržai, grandinės pavaros, purkštukų antgaliai, guoliai, vandens siurblių spyruoklės, įvairūs filtrai ir kt.) ir medžiagos (tepimo alyva, hidraulinis skystis, konsistenciniai tepalai, aušinimo skystis ir kt.) [3, 4]. Viena iš svarbiausių energetinių įrenginių eksploatacijoje keičiamų medžiagų yra tepimo alyva [5]. Tepimo alyvos keitimo intervalas yra labai platus: nuo 300 valandų greitaeigių katerių varikliuose iki 1000 val. lėtaeigių dvitakčių jūrinių laivų varikliuose [6, 7]. Kitas svarbus rodiklis yra alyvos kiekis variklyje, kuris gali svyruoti nuo ~6 dm³ kateriuose iki ~1600 dm³ dvitakčiuose lėtaeigių laivų varikliuose [8]. Svarbu prisiminti ir kitus įrenginius laivuose, kurių eksploatacijoje naudojama tepimo alyva: šie įrenginiai gali būti greičių dėžės, kranai, kompresoriai, siurbliai, ir kt. Remiantis 2022 metų duomenimis pasaulinis tepimo alyvos gamybos mastas siekia ~37 mln. t/m [9]. Svarus laivybos indėlis į bendrą sunaudojamos tepimo alyvos balansą verčia atkreipti dėmesį į tvarų tepimo alyvos naudojimą laivų energetiniuose įrenginiuose.

Tyrimo problematika. Tyrimo problematika yra glaudžiai susijusi su temos aktualumu, nes problemos sprendimo faktas sąlygoja aktualų kaštų optimizavimą. Siaurąja prasme per dažnas tepimo alyvos keitimas varikliuose lemia didesnius ir neracionalius finansinius kaštus. Vertinant tepimo alyvos gyvavimo ciklą, per dažnas keitimas lemia intensyvesnį materialųjų resursų naudojimą ir didesnius energetinius kaštus, o tai yra ir didesnė žala aplinkai. Uždelstas tepimo alyvos keitimas lemia įrenginių avarijas, rimtus gedimus ir sutrikimus, kurie gali lemti netinkamą tolimesnę įrenginių eksploataciją, ankstesnę reglamentinį remontą ir kitokio pobūdžio išvedimą iš eksploatacijos, siekiant atstatyti pradinę techninę įrenginio būklę. Šiems iššūkiams spręsti reikalinga tepimo alyvos parametru kontrolė, kurios pagrindu būtų suformuotas veiksmų algoritmas, kuris būtų naudojamas resursus tausojančiai eksploatacijai užtikrinti.

Tyrimo objektas: Laivų vidaus degimo variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmas.

Tikslas: Ištirti laivų vidaus degimo variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmo sudarymą.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti laivų variklių parką pagal jų paskirtį ir eksploatacines ypatybes;
2. Išanalizuoti ir pateikti informaciją apie variklių tepimo alyvos eksploatacinius parametrus;
3. Išanalizuoti metodines priemones, reikalingas variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmo sudarymui;
4. Suformuoti ir pagrįsti variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmą.

Tyrimo metodai: techninių žinybų, mokomųjų priemonių ir mokslinių šaltinių analizė, statistinių duomenų analizavimas ir vertinimas, matematinių metodų taikymas ir grafinės automatizuoto projektavimo sistemos panaudojimas.

Laivų variklių parko ir jų eksploatacinių ypatybių analizė

Analizuojamą laivų variklių parką sudaro 52 varikliai (žr. 1 lentelę), kurie suskirstyti į grupes pagal jų paskirtį laivuose: pagrindiniai (19 vnt., žymėjimas „ME“), pagalbiniai su elektros generatoriumi (26 vnt., žymėjimas „DG“), pagalbiniai su hidrauline pavara (3 vnt., žymėjimas „AHP“) ir pagalbiniai su avariniu generatoriumi (4 vnt., žymėjimas „EDG“). Alyvos keitimo periodo vertinime svarbus rodiklis – vidutinis variklių parko amžius, yra palyginamai didelis ir siekia 1977-2016 metus. Dėl šios priežasties daroma prielaida, jog variklių gamybos metais projektinis alyvos keitimo laikas buvo nustatomas atsižvelgiant į tuo metu gaminamos alyvos kokybę, o naudojant šiuolaikinę aukštesnės kokybės alyvą, gali būti prailgintas laikas tarp alyvos keitimų. Tačiau pastebima, jog ~98 % variklių parko sudaro forsuoti varikliai su turbo pripūtimu (4 taktų varikliuose) ir dviejų pakopų turbo + pavarinis kompresoriais (2 taktų varikliuose) bei 100 % variklių su tiesioginiu degalų įpurškimu.

Degalų degimas tiesioginio degalų įpurškimo sistemos degimo kameroje lemia didesnes apkrovas degimo kameros paviršiams, lyginant su netiesioginio degalų įpurškimo variklių sistemomis [10]. Aukštesnis degimo slėgis atviro tipo degimo kameroje gali lemti intensyvesnę degimo produktų skvarbą per stūmoklio žiedus į karteryje esančią tepimo alyvą, taip bloginant jos eksploatacinius rodiklius. Atviro tipo degimo kameroje degimo produktų skvarbą gali didinti į cilindrą tiekiamas aukšto slėgio oro srautas, kuris variklio cilindre turi dedamąją bendrą slėgio balansę. Aukšto slėgio oro srautas gerina degimo procesą cilindre, kuriam būdingas aukštesnis slėgis. Laivuose eksploatuojamų variklių pagrindiniai duomenys yra pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė

Analizuojamų variklių pagrindiniai duomenys

Variklio markiruotė	Skaičius, vnt.	Paskirtis*	Gamybos metai	Galia, kW	Sūkių dažnis, min ⁻¹	Darbinis tūris, dm ³	Aprūpinimas oru**	Taktų skaičius
MTU V16 396 TB 94	4	ME	1990	2290	2100	63,4	TC	4
MTU V16 396 TE 94	2		1990	2150	2000	63,4	TC	4
MTU V16 396 TB 84	2		1986	2040	1950	63,4	TC	4
Wichmann 7AX-2100 HK	2		1977	1545	1200	61,2	TC+RC	2
Caterpillar C32 Acert	6		2009	709	1600	32,0	TC	4
Scania D9 D19	2	DG	2003	259	2000	9,0	TC	4
Scania VABIS D11	1		1968	210	2500	11,0	TC	4
Detroit Diesel 6-71	9		1987–1989	180	1800	7,0	TC+RC	2
Detroit Diesel 8V-71	3		1992	237		9,3	TC+RC	2
MB OM-404	4		1980	316	12,0	TC	4	
MB OM 447 LA	6	1998	250	12,0	TC	4		
Caterpillar 7.1 Acert	3	2016	205	7,1	TC	4		
Sisu Diesel 320 DMG	1	2003	30	1500	3,3	NA	4	
Detroit Diesel 12V-71	3	AHP	1987–1989	390	14,0	TC+RC	2	
Scania D9-95M-04S	1	EDG	2003	155	9,0	TC	4	
John deer 4045 TF 158	2		2010	71	1800	4,5	TC	4
Caterpillar 4.4	1		2016	75	4,4	TC	4	

* - ME – pagrindinis variklis; DG – dyzelinis elektros generatorius (pagalbinis variklis su generatoriumi); AHP – pagalbinis variklis su hidrauline pavara; EDG – pagalbinis variklis su generatoriumi avariniam elektros tiekimui.

** - TC – turbokompresorinė sistema;

TC+RC – 2 pakopų turbokompresorinė ir pavarinio kompresoriaus sistema.

Lentelė sudaryta autorių pagal laivyne eksploatuojamų variklių techninę dokumentaciją.

Siekiant įvertinti variklių alyvos keitimo duomenis ir atlikti tolimesnę algoritmo formavimo seką, būtina išanalizuoti alyvos keitimo intervalus pagal variklių gamintojų rekomendacijas, duomenis apie cirkuliuojančios alyvos kiekį, rekomenduojamos ir faktinės alyvos rūšis. Tai svarbu, vertinant atskirų

variklių ar jų grupių optimizavimo potencialą. Laivuose eksploatuojamų variklių rekomenduojami tepimo alyvos keitimo intervalai, informacija apie alyvos kiekį ir jos rūšis yra pateikta 2 lentelėje.

Iš 1 ir 2 lentelėse pateiktų duomenų matyti, jog cirkuliuojančios alyvos kiekis viename variklyje svyruoja nuo 9 dm³ mažo darbinio tūrio varikliuose iki 330 dm³ didelio darbinio tūrio varikliuose. Iš viso analizuojamo laivyno varikliuose cirkuliuoja 4059 dm³ tepimo alyvos. Šiose lentelėse matoma, kad dalį (~14 %) variklių parko sudaro pagalbiniai varikliai su hidrauline pavara ir pagalbiniai varikliai su generatoriumi avariniam elektros tiekimui, kurių tepimo alyvos keitimo dažnis yra kartą per metus. Tačiau optimizacija turėtų būti ir jiems taikoma. Tiek intensyviai eksploatuojamų variklių, tiek ir rečiau naudojamų budinčių variklių tepimo alyvų keitimo intervalų optimizacija gali būti atliekama įvertinus jų eksploatacines ypatybes bei eksploatuojamos alyvos rodiklius.

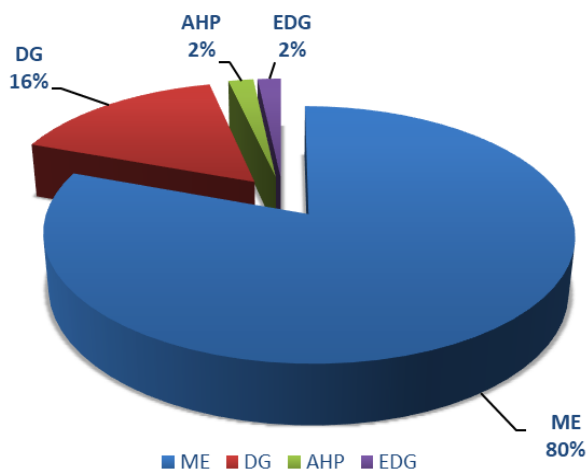
2 lentelė

Tepimo alyvos eksploataciniai duomenys

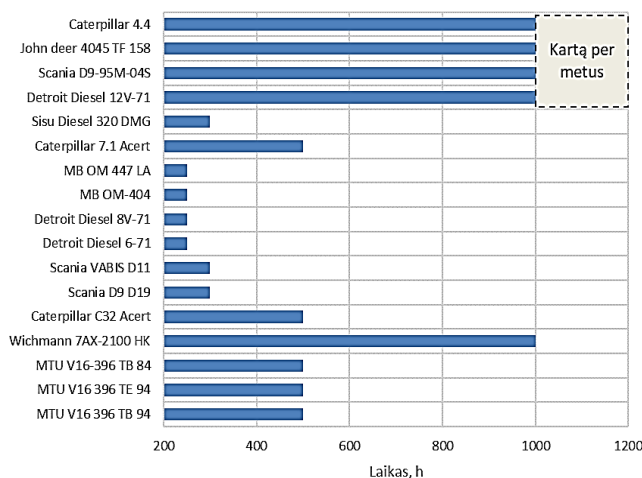
Variklio markiruotė	Skaičius, vnt.	Rekomenduojama alyvos rūšis	Naudojama alyvos rūšis	Rekomend. keitimo laikas, h	Alyvos kiekis variklyje, dm ³	Bendras alyvos kiekis, dm ³
MTU V16 396 TB 94	4	SAE 30/40/50	SAE 40	500	210	800
MTU V16 396 TE 94	2			500	230	460
MTU V16-396 TB 84	2	SAE 40	SAE 40	500	215	430
Wichmann 7AX-2100 HK	2			1000	330	660
Caterpillar C32 Acert	6	SAE 15W-40		500	145	870
Scania D9 D19	2	SAE 5W-30/5W-40/ 10W-30 /10W-40	SAE 30	300	21	42
Scania VABIS D11	1	SAE 5W-30/5W-40/10W- 30/10W-40/15W-40		300	20	20
Detroit Diesel 6-71	9	SAE 30/20W/10W		250	25	225
Detroit Diesel 8V-71	3	SAE 10W-30/10W-40		250	26	78
MB OM-404	4	SAE30/20W/20	SAE 40	250	40	160
MB OM 447 LA	6	SAE 40		250	17	102
Caterpillar 7.1 Acert	3	SAE 15W-40/15W-30/40		500	16	48
Sisu Diesel 320 DMG	1	SAE 5W-30/5W-40/10W- 30/10W-40/15W-40	SAE 30	300	9	9
Detroit Diesel 12V-71	3	SAE 30/20W/10W		Kartą metuose	25	75
Scania D9-95M-04S	1	SAE 10W-40/15W-40 /10W- 30	SAE 40	Kartą metuose	32	32
John deer 4045 TF 158	2	JD 50/ACEA -E7	JD plus 50/ACEA -E7	Kartą metuose	12	24
Caterpillar 4.4	1	SAE 40/15W-30/15W-40	SAE 40	Kartą metuose	14	14

Lentelė sudaryta autorių pagal laivyne eksploatuojamų variklių techninę dokumentaciją.

1 ir 2 paveiksluose pateiktas alyvos kiekio pasiskirstymas pagal variklių paskirtį ir variklių tepimo alyvos keitimo laikas (žr. 1 ir 2 pav.).



1 pav. Tepimo alyvos tūrio pasiskirstymas pagal variklių paskirtį



2 pav. Variklių tepimo alyvos keitimo laikas

Paveikslai sudaryti autorių pagal laivyne eksploatuojamų variklių statistinę ir techninę dokumentaciją.

Variklių parko amžius pasiskirsto 7–45 metų diapazone, tačiau ~92 % variklių yra senesni nei 10 metų ir ~13,5 % yra senesni nei 20 metų. Šie faktai leidžia daryti prielaidą, jog analizuojamų variklių gamybos metais pateiktos rekomendacijos dėl tepimo alyvos keitimo intervalų buvo pagrįstos tuometine tepimo alyvos gamybos kokybe, o dabartinės alyvos kokybė yra aukštesnė ir galimai turi resursų ilginant laiko intervalus tarp alyvos keitimų.

Kitas svarbus vertinamasis rodiklis yra variklio gamintojo rekomenduojamos alyvos keitimo intervalas, kuris yra vienas iš svarbiausių aspektų, sudarant optimalaus alyvos keitimo intervalo nustatymo algoritmą. Nuo jo stipriai priklauso optimizacijos potencialas, nes kuo ilgesnė rekomenduojama alyvos eksploatacijos trukmė, tuo mažesnis tikėtinas optimizacijos efektas.

Matoma, jog šiame variklių parke cirkuliuoja santykinai didelis tepimo alyvos kiekis, o alyvos rekomenduojamas eksploatacijos laikas daugeliu atvejų nėra itin ilgas, todėl alyvos keitimo intervalų optimizavimas yra tikslingas ir galintis sumažinti variklių eksploatacines išlaidas bei tausoti resursus, tačiau yra būtina išanalizuoti ir įvertinti optimizavimą ir jo algoritmo sandarą veikiančius faktorius.

Tepimo alyvos eksploatacinių savybių analizė

Tepimo alyva yra labai svarbi tinkamam variklio veikimui. Ji atlieka svarbų vaidmenį mažinant trintį, apsaugant nuo susidėvėjimo ir padedant aušinti variklio komponentus. Sudarant algoritmą būtina įtraukti ir detalizuoti tepimo alyvos savybes, kurios turi būti stebimos alyvos eksploatacijos metu. Pagrindinės tepimo alyvos savybės, kurios yra labai svarbios variklio eksploatacijai [11–19]:

1. *Klampa*: Tai bene svarbiausia tepimo alyvos savybė. Klampa lemia alyvos sluoksnio storį ir jos gebėjimą sudaryti plėvelę tarp judančių dalių ir taip sumažinti trintį. Šiuolaikiniuose varikliuose paprastai naudojamos įvairių klasių alyvos, kurios išlaiko savo savybes platesniame temperatūrų diapazone.
2. *Klampos indeksas*: Tai alyvos klampumo kitimo, kintant temperatūrai, dimensija. Alyvos, kurių klampos indeksas yra aukštas, mažiau keičia klampą svyruojant temperatūrai, todėl pageidautina, kad alyvos veikimas skirtingomis darbo sąlygomis būtų kuo mažiau kintantis arba pastovus.
3. *Terminis stabilumas*: tai tepimo alyvos atsparumas cheminiam suirimui ir fiziniams pokyčiams esant aukštai temperatūrai. Tepimo alyva turi būti atspari degradacijai aukštoje temperatūroje. Varikliui veikiant išsiskiria daug šilumos, todėl alyva turi išlaikyti savo apsaugines savybes nepaisant šios šilumos poveikio. Terminiškai stabili alyva išlaiko klampos rodiklius, nesusidaro nuosėdų ir pasižymi žemo garavimo savybėmis.
4. *Oksidacijos stabilumas*: Oksidacijos stabilumas yra labai svarbi tepimo alyvų savybė, apibūdinanti jų atsparumą cheminiam irimui veikiant deguoniui, ypač – aukštoje temperatūroje. Atšiaurioje vidaus degimo variklio aplinkoje, kur temperatūra gali pakilti iki ekstremalių lygių, variklinės alyvos atsparumas oksidacijai yra pagrindinis veiksnys, lemiantis jos tarnavimo laiką ir variklio apsaugą. Laikui bėgant ir veikiant deguoniui, tepimo alyva gali oksiduotis, dėl to padidėja klampumas, susidaro nuosėdos ir lakas.
5. *Mažas lakumas*: Mažas tepimo alyvų lakumas, ypač skirtų vidaus degimo varikliams, reiškia alyvos atsparumą garavimui aukštoje temperatūroje. Lakumas yra rodiklis, rodantis, kaip lengvai medžiaga virsta garais arba dujomis. Aukštos kokybės tepalai pasižymi mažu lakumu, kad būtų kuo mažiau sunaudojama alyvos ir degimo kameroje nesudarytų nuosėdų, galinčių sukelti detonaciją ar išankstinį užsidegimą.
6. *Detergentai (plovikliai)*: tepimo alyvų detergentiškumas, ypač – vidaus degimo varikliuose, reiškia alyvos gebėjimą išlaikyti darbinį paviršių švarų, neleidžiant susidaryti ir nusėsti tokiems teršalams, kaip lakas, šlamas ir anglies nuosėdos. Tai labai svarbi šiuolaikinių variklinių alyvų funkcija, nes ji užtikrina, kad judančiose variklio dalyse nesikaupytų nuosėdų, dėl kurių gali kilti eksploatacinių problemų ir sumažėti efektyvumas. Alyvoje esantys detergentai valo nuosėdas nuo variklio komponentų, ypač – stūmoklio žiedo zonoje.
7. *Dispersija*: tai alyvos gebėjimas stabdyti ir pašalinti netirpius nešvarumus ir šalutinius produktus, kurie susidaro degimo proceso metu vidaus degimo variklyje. Skirtingai nuo detergentinio poveikio, kuris visų pirma susijęs su variklio paviršių švarumu, dispersija susijusi su dalelių stabilizavimu ir pernešimu alyvoje, kad jos nesudarytų aglomeratų ir nenusėstų ant variklio

komponentų. Dispergentai išlaiko teršalus ir šalutinius degimo produktus suspensijoje, todėl ant variklio dalių nenusėda nuosėdos ir lakas.

8. *Korozijos ir rūdžių slopinimas*: korozijos ir rūdžių slopinimas tepalinių alyvų atveju reiškia alyvos gebėjimą apsaugoti variklio komponentus nuo korozinio drėgmės, rūgščių ir kitų kenksmingų medžiagų, kurios gali sukelti metalinių paviršių oksidaciją, poveikio. Rūdys yra specifinė korozijos forma, kuri veikia geležį ir plieną veikiant vandeniui ir deguoniui, todėl susidaro geležies oksidai. Veiksmingi korozijos ir rūdžių inhibitoriai, esantys variklinėse alyvose, yra labai svarbūs siekiant prailginti variklio tarnavimo laiką, apsaugant jo vidinius komponentus. Antikoroziniai priedai apsaugo variklio dalis nuo rūgščių ir drėgmės, galinčių sukelti rūdį bei koroziją.
9. *Apsauga nuo dilimo*: tepimo alyvos plėvelėje esantys priedai nuo dilimo padeda išvengti tiesioginio judančių variklio ar mechanizmo metalinių dalių paviršių tarpusavio sąlyčio. Dėl šios priežasties mažėja jų nusidėvėjimas ir pailgėja įrangos eksploatavimo laikas. Šie priedai yra ypač svarbūs tokiomis sąlygomis, kai dėl aukšto slėgio ir didelių apkrovų gali padidėti tepimo alyvos plėvelės, saugančios paviršius, suirimo tikimybė.
10. *Nuo putojimo apsaugančios medžiagos*: putos gali sumažinti alyvos tepimo efektyvumą ir sukelti kavitaciją, o tai lemia alyvos oksidaciją ir degradaciją. Siekiant išvengti putų susidarymo, dažniausiai naudojami silikono pagrindo priedai. Nuo putojimo apsaugančios medžiagos, dar vadinamos putojimą mažinančiais priedais, mažina putų susidarymą. Putos mažina alyvos tepimo savybių veiksmingumą, gali lemti netolygų įrangos veikimą ir netinkamą mechanizmų dalių aušinimą arba perkaitimą.
11. *Stingimo temperatūra*: tai yra žemiausia temperatūra, kuriai esant alyva geba tekėti. Tai labai svarbi savybė, ypač – šaltoje aplinkoje naudojamoms alyvoms, nes ji parodo alyvos savybę gebėti tekėti esant žemos temperatūros sąlygomis. Ji labai svarbi šalto variklio užvedimo sąlygomis, nes šalta alyva turi išlikti pakankamai skysta, kad galėtų cirkuliuoti ir tepti.
12. *Tepimo alyvos pliūpsnio temperatūra* yra labai svarbus saugos ir kokybės parametras. Tai yra žemiausia temperatūra, kuriai esant alyva išskiria pakankamos koncentracijos garus, kad jie užsidegtų esant uždegimo šaltiniui, pavyzdžiui, liepsnai ar kibirkščiai. Tai ne temperatūra, kurioje užsidega pats skystis (tai yra degimo temperatūra), o temperatūra, kurioje gali užsidegti jo išskiriami garai. Aukštesnės pliūpsnio temperatūros alyvos yra mažiau lakios ir saugesnės aukštatemperatūroje variklio aplinkoje.
13. *Suderinamumas su sandarikliais*: tepimo alyva turi būti suderinama (neturi sąlygoti sandariklių geometrinių matmenų pokytį, irimą, kt. pažeidimus) su variklio sandarikliais, kurie gali būti pagaminti iš įvairių medžiagų, įskaitant nitrilo gumą, silikoną, poliakrilatą, etileno akrilą, fluorangliavandenilį ir kt., kad būtų išvengta alyvos pratekėjimo. Tepimo alyvų suderinamumas su sandarikliais reiškia alyvos gebėjimą išlaikyti variklio ar mechaninės sistemos sandariklių vientisumą ir funkcionalumą. Sandarikliai yra svarbūs komponentai, skirti apsaugoti skysčius nuo pratekėjimo ir neleisti patekti nešvarumams.
14. *Hidrolizinis stabilumas ir demulsiškumas*: tepimo alyva turi būti atspari vandens patekimui ir lengvai atsiskirti nuo vandens. Šios savybės yra ypač svarbios ten, kur galimas vandens patekimas, pavyzdžiui, jūrinėse, hidraulinėse ir kai kuriose pramoninėse aplinkose.
15. *Bazinis skaičius arba bendras bazinis skaičius*: tai yra tepimo alyvos šarminės atsargos matas, rodantis jos gebėjimą neutralizuoti degimo metu susidarancias rūgštis. Ši savybė ypač svarbi variklinėms alyvoms, naudojamoms vidaus degimo varikliuose, kuriuose deginant degalus susidaro rūgštiniai šalutiniai produktai. Didesnis bazinis skaičius gali būti naudingas varikliams, naudojantiems degalus su dideliu sieros kiekiu.

Variklių tepimo alyvoje gali būti įvairių metalo priemaišų, kurios atsiranda dėl variklio judančių dalių dilimo. Šių metalų rodiklius galima nustatyti atlikus laboratorinę tepimo alyvos analizę, kuri yra labai svarbi variklių techninės priežiūros dalis. Tepimo alyvos eksploatacijoje svarbu stebėti dylančių metalų koncentraciją bei jų rūšį dėl 2 priežasčių. Pirmoji – priemaišų kiekis tepimo alyvoje, kuris gali lemti alyvos tepimo efektyvumo sumažėjimą ir abrazyvinį poveikį detalių paviršiams. Antroji – dylančių metalų intensyvumo ir rūšies nustatymas gali suteikti informacijos apie

suintensyvėjusio dilimo lokaciją bei prognozuoti galimus mechanizmų gedimus. Žemiau pateiktas sąrašas metalų, kurie dėl dylančių variklio dalių randami naudotoje variklio alyvoje [20–23]:

1. *Geležis* (Fe): iš cilindrų įvorių, paskirstymo velenų, alkūninių velenų, krumpliaračių, vožtuvų ir kitų plieninių ar geležinių komponentų susidėvėjimo.
2. *Aliuminis* (Al): iš stūmoklių, guolių arba variklio bloko, kurie šiuolaikiniuose varikliuose dažnai gaminami iš aliuminio lydinių, susidėvėjimo.
3. *Varis* (Cu): randama guoliuose, įvorėse ir alyvos aušintuvuose.
4. *Švinas* (Pb): aptinkamas dėl guolių nusidėvėjimo, nes guoliai yra padengti švino pagrindu pagamintomis medžiagomis.
5. *Alavas* (Sn): dažnai būna guolių medžiagos sudedamoji dalis ir gali rodyti guolių susidėvėjimą.
6. *Chromas* (Cr): iš grūdintų dalių, tokių kaip stūmoklių žiedai, vožtuvų kotai ir cilindrų įvorės.
7. *Nikelis* (Ni): iš vožtuvų paviršių ir tam tikrų tipų guolių.
8. *Sidabras* (Ag): retai, tačiau jo galima rasti kai kuriuose aukštos kokybės guolių paviršiuose.
9. *Titanas* (Ti) ir *molibdenas* (Mo): jie gali būti randami variklio dalių lydiniuose arba alyvos prieduose, apsaugančiuose nuo nusidėvėjimo.

Naudotos tepimo alyvos mėginiuose randami metalai ir kiti junginiai, kurie atsiranda ne dėl dylančių variklio dalių [20–24]:

1. *Cinkas* (Zn): paprastai gaunamas iš priedų, apsaugančių nuo dilimo, pavyzdžiui, cinko dialkilo ditionofosfato (ZDDP).
2. *Natris* (Na): jis dažnai atsiranda dėl aušinimo skysčio patekimo (sudėtyje yra natrio junginių) arba kitų alyvos priedų.
3. *Magnis* (Mg) ir *kalcis* (Ca): paprastai atsiranda dėl alyvos ploviklių priedų.
4. *Silicis* (Si): nėra metalas, gali rodyti, kad į alyvą pateko nešvarumų (silicio dioksidas iš smėlio), jis gali atsirasti dėl silicio turinčių priedų nuo putojimo.

Aukščiau aprašytas tepimo alyvos eksploatacinių savybių ir rodiklių sąrašas yra svarbus siekiant sudaryti alyvos keitimo laiko optimizavimo algoritmą, tačiau šio sąrašo elementų svarba eksploatuojamiems varikliams gali būti skirtinga dėl skirtingų naudojamų degalų, dominuojančių apkrovos režimų, aplinkos sąlygų ir kt. Tai reiškia, kad ne visi išvardinti rodikliai yra aktualūs skirtingoms pagal eksploatacijos sąlygas variklių grupėms tepimo alyvos eksploatacinio ciklo periodu. Alyvos eksploatacinių savybių ir rodiklių svarba ir aktualumas turi būti nustatomas laboratorinių tyrimų būdu ir visa tai turi būti kaupiama duomenų bazėje.

Algoritmo struktūros analizė

Algoritmas ir jo struktūra turi kiek galima plačiau apimti reikiamą atliekamų vertinimų ir prognozių kiekį, kad būtų kuo tiksliau nustatomi algoritmo panaudojimo rezultatai. Siekiant praktiškai panaudoti algoritmą, būtina aiškiai apibrėžti algoritmo taikymo etapus. Algoritmo kūrimo etapuose jo struktūra, kuri vėlesnėje taikymo fazėje bus tikslinama, skirstoma į šias grupes: 1. Eksploatuojamų duomenų analizė ir apdorojimas; 2. Laboratoriniai tyrimai ir duomenų sisteminimas; 3. Matematinų priklausomybių nustatymas; 4. Interpoliacijos taikymas; 5. Ekstrapoliacijos taikymas; 6. Optimalaus tepimo alyvos keitimo intervalo nustatymas. 7. Optimizacijos rezultatų taikymas variklių eksploatacijoje; 8. Duomenų monitoringas optimizacijos laiko diapazone; 9. Algoritmo korekcija pagal monitoringo duomenis; 10. Rezultatas: kaštų optimizacija.



3 pav. Grafinė algoritmo kūrimo ir taikymo etapų išraiška

Paveikslas sudarytas autorių pagal atlikto tyrimo rezultatus.

Grafinė algoritmo kūrimo ir taikymo etapų išraiška pateikta 3 paveiksle, jame pirmoje etapų eilėje pateikta algoritmo sudarymo etapas, o antroje etapais, kurie atspindi optimizacijos reikšmę ir funkciją. Kadangi tiriamasis darbas apima tik algoritmo kūrimą, toliau aprašomi tik pirmoje eilutėje esantys etapai t. y. algoritmo kūrimo etapai.

Ekspluatuojamų duomenų analizė ir apdorojimas. Šiame etape turi būti dvi pagrindinės duomenų analizės kryptys: 1) variklių techninė informacija; 2) tepimo alyvos eksploataciniai duomenys. Šiame etape vertinama ir renkama variklių techninė informacija bei jų specifika, eksploatuojamos tepimo alyvos kiekiai, rekomenduojamas keitimo intervalas, vertinama alyvos techninė informacija, analizuojami dominuojantys variklių apkrovos režimai.

Laboratoriniai tyrimai ir duomenų sisteminimas. Šis etapas susideda iš pasirengimo tepimo alyvos ėminių ėmimui, laboratorinių tyrimo atlikimo, duomenų patikimumo vertinimo ir sisteminimo. Laboratorinių tyrimų ir duomenų sisteminimo etape laboratoriniais tyrimais nustatomi tepimo alyvos rodikliai, kai tepimo alyva dar nepradėta eksploatuoti, kai pasiekta eksploatacijos viršutinė riba, t. y. suėjo rekomenduojamas keitimo laikas. Siekiant tiksliai nustatyti rodiklių charakteristikų priklausomybę nuo eksploatacijos laiko, būtina papildomai atlikti laboratorinius tyrimus dar dviejuose tarpiniuose taškuose. Siūloma tai atlikti praėjus 35 % ir 70 % laiko nuo rekomenduojamos alyvos keitimo laiko. Šie keturi taškai (0 %, 35%, 75 % ir 100 % laiko) leistų tinkamai aprašyti rodiklių kitimo charakteristikas bei jų matematinės išraiškas, o pastarosios leistų interpoliuoti ir taip sužinoti kiekvieno tiriamojo rodiklio reikšmę bet kuriuo eksploatacijos metu. Šis etapas yra svarbus, nes jo metu iš laboratorinių tyrimų rezultatų bus sužinomi patys jautriausi rodikliai, kurie gali būti ribojantys rodikliai, siekiant optimizuoti (prailginti) alyvos eksploatacijos laiką.

Siekiant optimizuoti kaštus, laboratorinių tyrimų intensyvumas gali būti mažinamas atlikus detalius tepimo alyvos rodiklių tyrimus ir nustatčius etaloninius ar dominuojančius alyvos eksploatacinius rodiklius, atsižvelgiant į eksploatacijos trukmę. Tokiu atveju tepimo alyvos laboratorinius tyrimus pagal jų intensyvumą galima būtų suskirstyti į 2 etapus – intensyvusis ir pasyvusis. Intensyvusis etapas apibrėžiamas tuo, kad tepimo alyvos eksploatacinės savybės tiriamos bei tikrinamos detalai ir dažnai. Šiame etape nustatomi itin svarbūs jautriausi, dažniausiai ir sparčiausiai besikeičiantys rodikliai, jų keitimosi charakteristika ir kita informacija. Šiame etape formuojama etaloninių arba dominuojančių eksploatacinių rodiklių duomenų bazė, kuri vėliau bus naudojama pasyviojo etapo pritaikymo užtikrinimui. Pasyvusis etapas apima 1–2 tepimo alyvos laboratorinius tyrimus ir jų rezultatų palyginimą su duomenimis, nustatytais intensyviajame etape. Pasyviajame etape vykdomas eksploatacinių rodiklių tikrinimas, siekiant įvertinti galimą nenumatytų sąlygų (dominuojančios variklių apkrovos režimo pasikeitimas, pasikeitusi variklio techninė būklė, pakeista alyvos rūšis ir pan.) įtaką tepimo alyvos rodiklių reikšmėms. Šių etapų pagrindiniai uždaviniai: 1) nustatyti laboratorinių tyrimų dažnį ir iširti tepimo alyvos rodiklius; 2) jautrių ir mažiau jautrių eksploatacinių rodiklių bei jų charakteristikų indentifikavimas; 3) pasikeitusių variklių eksploatacijos sąlygų įtakos tepimo alyvos eksploataciniams rodikliams vertinimas.

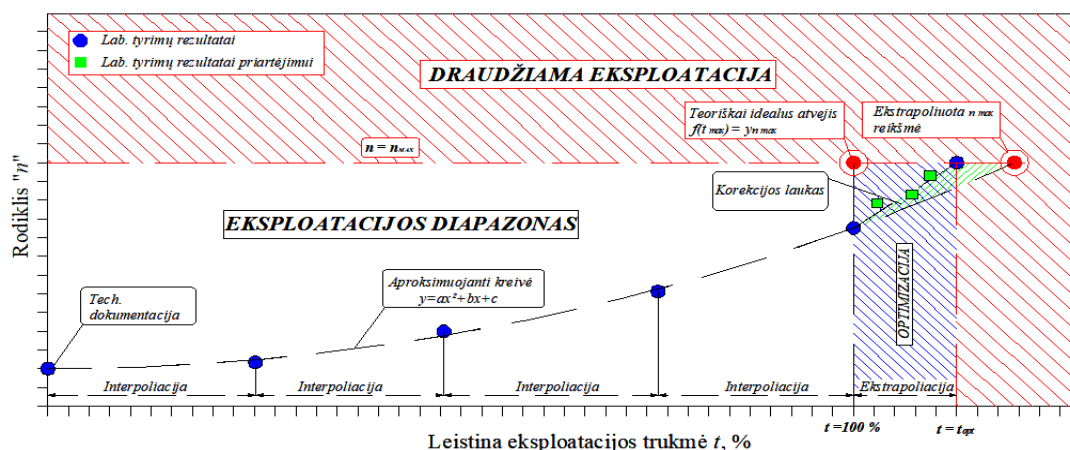
Matematinų priklausomybių nustatymas. Matematinės išraiškos yra svarbios tepimo alyvos eksploatacinių rodiklių reikšmių interpoliacijai ir ekstrapoliacijai. Panaudojant šiuos metodus kartu su laboratorinių tyrimų rezultatais, galima pagrįstai nustatyti ir įvertinti laboratoriniu būdu netiriamus tepimo alyvos eksploatacinius rodiklius tam tikruose eksploatacijos momentuose. Atliekant detalius laboratorinius tyrimus, svarbu nustatyti alyvos rodiklių kitimo charakteristikų $f(t) = y_n$ matematinės išraiškas naudojant linijinės arba polinominės aproksimacijos metodus. Nustatčius jas, būtina nustatyti laboratoriniais tyrimais gautų rezultatų koreliacijos stiprumą, t. y. Spirmeno arba Pirsono koreliacijos koeficientus [25]. Koreliacijos stiprumo nustatymas yra itin svarbus formuojant etalonines charakteristikas, kurios bus naudojamos tiek interpoliacijos būdu gautų duomenų patikrinimui, tiek ir patikimumo ekstrapoliacijos pagrindui sudaryti.

Interpoliacijos taikymas. Duomenų interpoliacija yra matematinis metodas, naudojamas nustatyti naujas reikšmes tarp žinomų duomenų taškų. Šis procesas yra ypač svarbus, kai turime ribotą duomenų kiekį ir norime sužinoti reikšmes tarp esamų taškų [25]. Interpoliacija remiasi prielaida, kad

galima sukurti tikslią funkciją, kuri eina per žinomus duomenų taškus, ir naudoti šią funkciją naujų reikšmių apskaičiavimui. Interpoliacijos rezultatais pagrįstos tepimo alyvos charakteristikos gali būti itin svarbios, vertinant laboratorinių tyrimų rezultatus po tam tikrų įprastai variklių eksploatacijai nebūdingų situacijų (degalų, degimo produktų ir aušinimo skysčio patekimas į alyvą; atvejai, kai alyva pasiekia virimo temperatūrą, kai panaudojama žemos kokybės alyva ir pan.). Tokiu atveju, identifikavus galimą nepriimtina įprastai eksploatacijai faktą, atliekami laboratoriniai tyrimai ir jų rezultatai palyginami su interpoliacijos metodu nustatytais alyvos rodiklių charakteristikomis bet kuriame alyvos eksploatacijos laiko momente. Palyginimo rezultatai gali santykinai greitai ir tiksliai atsakyti apie esamą neatitikimą įprastoms eksploatacijos sąlygoms. Tai leistų atitinkamai reaguoti į susidariusią situaciją, taip išvengiant tolimesnių variklių sistemų pažeidimų ir avarių.

Ekstrapoliacijos taikymas. Skirtingai nuo interpoliacijos, kuri nustato reikšmes tarp esamų duomenų taškų, ekstrapoliacija yra matematinis metodas, kuris naudojamas numatyti reikšmes už žinomų duomenų ribų [26]. Ekstrapoliacija yra naudinga prognozuojant ateities tendencijas ar įvykius, tačiau ji neša didesnę neapibrėžtumo riziką, nes spėjimai yra atliekami už turimų duomenų ribų. Ekstrapoliacijos būdu nustatytos tepimo alyvos eksploatacinių rodiklių reikšmės ir charakteristikos yra svarbios, spėjant galimas reikšmes už interpoliacijos taikymo ir laboratorinių tyrimų ribų, siekiant pagrįstai nustatyti maksimaliai ilgą ir variklių eksploatacijai priimtina alyvos naudojimo trukmę. Kaip ir minėta, ekstrapoliacija remiasi laboratorinių tyrimų rezultatais, kurie vėliau aproksimuojami ir nustatomos rodiklių kitimo charakteristikų $f(t) = y_n$ matematinės išraiškos, tačiau priklausomai nuo eksploatacijos metu kintančių fizikinių ir cheminių alyvos savybių rodiklių specifikos, jų charakteristikos negali būti aprašytos visiškai pasitikint rezultatais, gautais ekstrapoliacijos būdu. Šis apribojimas atsiranda dėl objektyvių ir akivaizdžių priežasčių, nes matematinis dėsningumas negali įvertinti nei alyvos degradacijos fakto, nei jos rodiklių blogėjimo greičio, pasibaigus rekomenduojamam alyvos eksploatacijos laikui, tačiau gali suteikti vertingos informacijos apie numanomą laiką, kol ribinės alyvos rodiklių reikšmės bus pasiektos. Dėl šios priežasties ekstrapoliacijos taikymas galimas tik kartu atliekant laboratorinius tyrimus, kurių pagrindu būtų koreguojamos ekstrapoliacijos būdu gautos ir alyvos rodiklių kitimą dėl kintančių fizikinių ir cheminių savybių įvertinančios charakteristikos, o ribinės rodiklių reikšmės būtų pasiekiamos priartėjimo metodu.

Optimalaus tepimo alyvos keitimo intervalo nustatymas. Alyvos keitimo intervalas optimizuojamas remiantis laboratoriniais tyrimais, jų aproksimacijos, interpoliacijos ir ekstrapoliacijos rezultatais. Rekomenduojamos eksploatacijos laikotarpiu alyvos rodiklių kontrolė bei palyginimas su etaloninėmis charakteristikomis yra rekomendacinio pobūdžio arba vykdomi tik tada, kai įvyksta nukrypimas nuo įprastų variklių eksploatacijos sąlygų (apie tai minėta interpoliacijos taikymo apraše). Eksploatuojant alyvą ilgiau nei rekomenduojama, patys jautriausi alyvos rodikliai turi būti tiriami laboratoriniu būdu ir stebimas jų pokytis bei ryšys su ekstrapoliacijos būdu gautomis rodiklių charakteristikomis, jei būtina, koreguojamos ekstrapoliacijos būdu gautos charakteristikos.



4 pav. Grafinio ir matematinio rezultatų apdorojimo formato pavyzdys

Paveikslas sudarytas autorių pagal atlikto tyrimo rezultatus.

Maksimalios leistinos alyvos rodiklių reikšmės nustatomos priartėjimo metodu, periodiškai atliekant laboratorinius alyvos tyrimus. Grafinio ir matematinio rezultatų apdorojimo formatas, padarytas Autodesk AutoCad programine įranga, turėtų būti artimas 4 paveiksle pateiktai grafinės analizės išraiškai.

Šioje grafinėje išraiškoje mėlynais taškais pažymėti laboratorinių tyrimų rezultatai, kurie skirti etaloninės charakteristikos nustatymui, o žaliais – priartėjimo prie maksimalios n rodiklio reikšmės metodui skirtų laboratorinių tyrimų rezultatai. Mėlynas taškas, žymintis $n=n_{max}$ ir $t=t_{opt}$ atkarpų susikirtimą, nurodo maksimalią alyvos eksploatacijos trukmę. Raudonai pažymėtų taškų lokacija šiame kontekste yra pagrįsta teorinėmis žiniomis ir prielaidomis, t. y. kai teoriškai idealiu atveju tiriamasis alyvos kokybės rodiklis (-iai) pasiekia maksimalią (arba minimalią) leistiną ribą pasiekus maksimalų rekomenduojamą alyvos eksploatacijos laiką, bei ekstrapoliacija nustatomos ribinės rodiklių reikšmės. Reikia paminėti, jog ekstrapoliacija naudojama tik preliminarių maksimalių rodiklių reikšmių nustatymui už eksploatacijos diapazono, tačiau po jų korekcijos papildomais laboratoriniais tyrimais optimizacijos diapazone ekstrapoliacija tampa interpoliacija, kurios rezultatai yra kur kas patikimesni.

Tepimo alyvos keitimo intervalo optimizacija suvokiama kaip laiko diapazonas nuo variklių gamintojų rekomenduojamo alyvos keitimo momento iki laiko momento, kai pritaikius algoritmą nustatomos ribinės rodiklių reikšmės ir tolesnė eksploatacija draudžiama. Tiriamieji alyvos rodikliai skirtingai reaguoja į pratęstą eksploatacijos laiką, dėl šios priežasties skirtingų rodiklių skirtingai kintančios charakteristikos lemia skirtingą optimizacijos diapazoną, tačiau pagrįsta optimizacija laikomas tas pratęstas alyvos laikotarpis, kuriame visi tiriamieji rodikliai neviršija ribinių reikšmių. Be to, kiekvienas variklis arba variklių grupė gali turėti skirtingą alyvos rodiklių pokytį dėl konstrukcinių ir eksploatacinių ypatumų ar kitų priežasčių.

Algoritmo struktūra. Visą algoritmo struktūrą galima suskirstyti į 4 veiksmų grupes, kurios skirtos rezultatui pasiekti, t. y. pagrįstai pratęsti tepimo alyvos eksploatacijos laiką:

- I. Variklių ir juose naudojamos alyvos analizė:
 - a. Variklių konstrukcinių ypatumų analizė;
 - b. Variklių eksploatacinių ypatumų analizė;
 - c. Alyvos rodiklių ir eksploatacinių ypatybių analizė.
- II. Etaloninių alyvos rodiklių charakteristikų nustatymas:
 - a. Periodiniai alyvos laboratoriniai tyrimai;
 - b. Alyvos rodiklių aproksimacija ir matematinė išraiškų nustatymas;
 - c. Alyvos rodiklių interpoliacija*.
- III. Ekstrapoliacija ir jos rezultatų korekcija:
 - a. Ekstrapoliacija iki ribinių rodiklių reikšmių;
 - b. Laboratoriniai tyrimai priartėjimo metodui;
 - c. Maksimalaus alyvos eksploatacijos laiko nustatymas;
 - d. Alyvos rodiklių charakteristikos korekcija ekstrapoliacijos diapazone;
 - e. Optimizacijos diapazono nustatymas.
- IV. Kontrolės procesas:
 - a. Variklių ir alyvos eksploatacinių nuokrypių monitoringas;
 - b. Laboratoriniai tyrimai alyvos rodiklių kontrolei;
 - c. Optimizacijos rezultatų vertinimas ir etaloninių alyvos rodiklių tikslinimas.

* atsižvelgiant į poreikį, jei yra nukrypimai nuo įprastos variklių ar alyvos eksploatacijos sąlygų, laboratoriniai tyrimai turi būti atliekami nedelsiant, o jų rezultatai lyginami su interpoliuotomis rodiklių reikšmėmis.

Šis teorinio pagrindo algoritmas gali būti panaudojamas pristatytuose laivų vidaus degimo varikliuose naudojamos alyvos keitimo intervalų optimizavimo procese, tačiau būtina juos verifikuoti ir koreguoti naudojant apdorotus laboratorinių tyrimų rezultatus. Atliekant tai galima pasiekti aukštą etaloninių alyvos rodiklių charakteristikų tikslumą, kuris itin vertingas alyvos keitimo intervalų optimizavimui. Šis sudarytas algoritmas yra pirmas etapas kompleksiniame alyvos keitimo intervalų optimizavimo proceso tyrime ir, siekiant praktinio jo pritaikymo, šie tyrimai turi būti tęsiami.

Išvados

Siekiant suformuoti ir pagrįsti laivų vidaus degimo variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmą, buvo atlikta:

1. Išanalizuotas laivų variklių parkas pagal jų paskirtį ir eksploatacines ypatybes. Analizuojamą laivų variklių parką sudaro pagrindiniai, pagalbiniai su elektros generatoriumi, su hidrauline pavara ir avariniai generatoriai. Pažymėtas didelis variklių parko amžius (gamybos laikotarpis 1977–2016 m.), o tai leidžia manyti, kad, naudojant šiuolaikinę aukštesnės kokybės alyvą, galima prailginti laiką tarp alyvos keitimo, panaudojant pagrįstą optimizacijos algoritmą.

2. Išanalizuota ir pateikta informacija apie variklių tepimo alyvos eksploatacinius parametrus. Išanalizuotas platus sąrašas įvairių tepimo alyvos eksploatacinių rodiklių, dėl kurių pokyčio alyva praranda eksploatacines savybes. Pateiktas įvairių metalo priemaišų, kurios atsiranda dėl variklio judančių dalių dilimo, ir gamyklinių priedų sąrašas, kuris yra svarbus vertinant alyvos eksploatacinę būklę.

3. Išanalizuoti veiksmai ir metodinės priemonės, reikalingos variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmo sudarymui. Algoritmui sudaryti reikalingi statistinio duomenų apdorojimo metodai, aproksimacija ir koreliacinio ryšio nustatymas, interpoliacija ir ekstrapoliacija, grafinės bei kiti matematiniai duomenų apdorojimo metodai ir priemonės.

4. Suformuotas ir pagrįstas variklių tepimo alyvos keitimo intervalų optimizavimo algoritmas. Tačiau šio algoritmo tikslinimas ir verifikacija panaudojant laboratorinių tyrimų rezultatus yra būtini, siekiant gauti adekvačius algoritmo taikymo rezultatus. Šio tyrimo tęsinys turėtų apimti algoritmo tikslinimo ir verifikavimo bei ekonominio vertinimo etapus.

Literatūra

1. Karvounis, P., Tsoumpis, Ch., Boulougouris, E., Theotokatos, G. (2022). Recent advances in sustainable and safe marine engine operation with alternative fuels. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 8, 994942. doi:10.3389/fmech.2022.994942
2. Polemis, D., Boviatsis, M., Chatzinikolaou, S. (2023). Assessing the Sustainability of the Most Prominent Type of Marine Diesel Engines under the Implementation of the EEXI and CII Regulations. *Clean Technologies*, 5(3), 1044–1066. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol5030053>
3. Chybowski, L., Wiaterek, D., Jakubowski, A. (2022). The Impact of Marine Engine Component Failures upon an Explosion in the Starting Air Manifold. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1850. <https://doi.org/10.3390/jmse10121850>
4. Wu, W. C., Hung, C. C. (2022). Development of Engine Maintenance Technology with Mixed Reality-Taking Pratt & Whitney JT9D as an Example. *Aerospace*, 9(12), 777. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120777>
5. Agocs, A., Nagy, A. L., Ristic, A., Tabakov, Z. M., Raffai, P., Besser, C., Frauscher, M. (2023). Oil Degradation Patterns in Diesel and Petrol Engines Observed in the Field. – An Approach Applying Mass Spectrometry. *Lubricants*, 11(4), 404. <https://doi.org/10.3390/lubricants11090404>
6. Detroit Diesel Allison (1974). *Detroit Diesel Engines. V-71 Operators Manual*. <https://www.manualslib.com/manual/1228180/Detroit-Diesel-V-71-Series.html#manual>
7. Wärtsilä Encyclopedia of Marine and Energy Technology (1980). *Wärtsilä Wichmann 7AX-2100 operators manual*. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/operation-manual>
8. SCANIA Industrial & Marine Engines (2001). *Operator's manual D9 DI9 DC*. <https://til.scania.com/d/OPM/D9%20DC9%20DI9>
9. Sönnichsen, N. (2023). Global lubricants industry – statistics & facts. *Statista*. <https://www.statista.com/topics/5263/lubricants-industry/>
10. Schwarze, H. (2010). Lubricants and the Lubrication System. In: Mollenhauer, K., Tschöke, H. (Ed.). *Handbook of Diesel Engines*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, p. 359–376. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-89083-6>

11. Harperscheid, M. (2017). Lubricants for Internal Combustion Engines. *In: Dresel, W., Mang, Th. (Ed.). Lubricants and Lubrication.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, p. 249–292. <https://doi.org/10.1002/9783527645565>
12. Pirro, D. M., Daschner, E. (2001). Lubricating Oils. *In: Wessol, A. A. (Ed.). Lubrication Fundamentals.* Exxon Mobil Corporation, p. 36–68. <https://doi.org/10.1201/9781420029239>
13. Wang, Y., Chen, Y., Liang, X., Tan, P., Deng, S. (2021). Impacts of lubricating oil and its formulations on diesel engine particle characteristics. *Combustion and Flame*, 225, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.047>
14. Rossegger, B., Leis, A., Vareka, M., Engelmayer, M., Wimmer, A. (2022). Lubricating Oil Consumption Measurement on Large Gas Engines. *Lubricants*, 10(3), 40. <https://doi.org/10.3390/lubricants10030040>
15. Sharma, B. C., Gandhi, O. P. (2008). Safety assessment of lubricating oil using AHP and vector projection method. *Industrial Lubrication and Tribology*, 60(5), 259–265. <https://doi.org/10.1108/00368790810895204>
16. Wang, Y., Liang, X., Shu, G., Dong, L., Yu, H., Wang, Y., Li, Z. (2016). Effects of Lube Oil Sulfur and Ash on Size, Morphology and Element Composition of Diesel Particles. *SAE Technical Paper 2016-01-0999*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0999>
17. Yang, S., Cao, N., Yu, B. (2023). Wear debris measurement in lubricating oil based on inductive method: A review. *Sage Journals. Measurement and Control*, 56(7-8), 1422–1435. <https://doi.org/10.1177/00202940231159117>
18. Bastidas, S., Allmaier, H. (2023). Application of a Wear Debris Detection System to Investigate Wear Phenomena during Running-In of a Gasoline Engine. *Lubricants*, 11(6), 237. <https://doi.org/10.3390/lubricants11060237>
19. Matsumoto, K., Tokunaga, T., Kawabata, M. (2016). Engine Seizure Monitoring System Using Wear Debris Analysis and Particle Measurement. *SAE Technical Paper 2016-01-0888*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0888>
20. Wolak, A., Zajac, G., Golebiowski, W. (2019). Determination of the content of metals in used lubricating oils using AAS. *Petroleum science and technology*, 37(1), 93–102. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1511584>
21. Carballo, S., Teran, J., Soto, R. M., Carlosena, A., Andrade, J. M., Prada, D. (2013). Green approaches to determine metals in lubricating oils by electrothermal atomic absorption spectrometry (ETAAS). *Microchemical Journal*, 108, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.01.002>
22. Aucelio, R. Q., De Souza, R. M., De Campos, R. C., Miekeley, N., Da Silveira, C. L. P. (2007). The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(9), 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.05.003>
23. Byington, C. S., Schalcosky, D. C. (2000). Advances in real time oil analysis. *Machinery lubrication*. <https://www.machinerylubrication.com/Read/138/real-time-oil-analysis>
24. Kumar, M., Mukherjee, P. Sh., Misra, N. M. (2013). Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review. *Industrial Lubrication and Tribology*, 65(1), 3–11. <https://doi.org/10.1108/00368791311292756>
25. De Winter, J. C. F., Gosling, S. D., Potter, J. (2016). Comparing the Pearson and Spearman correlation coefficients across distributions and sample sizes: A tutorial using simulations and empirical data. *Psychological Methods*, 21(3), 273–290. <https://doi.org/10.1037/met0000079>
26. Celant, G., Broniatowski, M. (2016). *Interpolation and Extrapolation Optimal Designs VI: Polynomial Regression and Approximation Theory*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc. Chapter 2: *Convergence Rates for the Uniform Approximation and Algorithms*, p. 15–42. ISBN: 978-1-84821-995-3.