

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

КОМБІНОВАНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОПУЛЬСИВНІ КОМПЛЕКСИ

Методичні вказівки до самостійної роботи

підготовки – магістрів

Галузь знань 27 «Транспорт»

Спеціальність 271 «Морський та внутрішній водний транспорт»

Спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів
автоматики»

Освітньо-професійна програма –

«Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

Форма навчання – денна

Мова навчання – українська

2023 рік

Методичні вказівки розроблені доктором технічних наук, професором Яровенко В. О. – завідувачим кафедрою «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» д.т.н., та Зарицькою О.І. доцентом тієї ж кафедри, кандидатом технічних наук.

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»

Протокол №__10-22/23__від __25.05.2023 року

Завідувач кафедри _____ _Яровенко В.О.

Мета та завдання навчальної дисципліни

Навчальна дисципліна «Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси» призначена для забезпечення магістрів за напрямом підготовки 271 «Морський та внутрішній водний транспорт», спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики», необхідним комплексом знань та умінь, відповідно до компетенції та очікуваних програмних результатів вивчання. Відповідно до кваліфікаційної характеристики, магістр повинен бути спроможним вирішувати складні задачі дослідження та оптимізації електроенергетичних пропульсивних установок. Він має бути спроможним знаходити шляхи підвищення якісних показників експлуатації суднових електроенергетичних систем, які входять до складу суднового пропульсивного комплексу. Магістр повинен мати навички щодо аналізу роботи сучасних суднових автоматизованих пропульсивних систем, пошуку оптимального управління роботою суднових пропульсивних електроенергетичних комплексів у сталих та перехідних режимах роботи.

Дисципліна «Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси» є однією з основних теоретичних дисциплін підготовки магістрів. Вона спрямована на здобуття знань, умінь, навичок та досвіду щодо проведення наукових досліджень з суднової електроенергетики. Дисципліна орієнтує здобувачів на актуальні спеціалізації, в рамках яких можлива їх подальша професійна та наукова кар'єра в галузі суднової електричної інженерії, удосконалення суднових пропульсивних електроенергетичних комплексів та систем. Вона базується на загальновідомих положеннях та результатах, за результатами вивчення яких студенти отримують комплекс знань, та умінь, які необхідні для майбутньої дослідника, та при роботі на судні при експлуатації пропульсивних електроенергетичних систем та їх електротехнічного обладнання.

Мета вивчення дисципліни – забезпечити студентам здобуття знань, умінь та розуміння, що відносяться до області суднової електроенергетики, що дасть їм можливість виконувати свою роботу самостійно, бути підготовленими до успішного засвоєння складніших програм для професіоналів з суднової енергетики, наукових дослідників і розробників, викладачів, технічних і наукових менеджерів в структурах морської галузі. За результатами вивчення дисципліни вони повинні уявити: принцип побудови сучасних пропульсивних електроенергетичних систем та комплексів; основи управління гребними установками у складі суднового пропульсивного комплексу. Магістри повинні: аналізувати та прогнозувати процеси в електроенергетичних системах суднових пропульсивних комплексів в умовах неповної або обмеженої інформації; розв'язувати складні непередбачувані проблеми, які можуть виникати у комбінованих пропульсивних комплексах; відшукувати варіанти оптимізації пропульсивних електроенергетичних систем.

Внаслідок вивчення дисципліни студент повинен знати та вміти:

- основи побудови сучасних комбінованих електроенергетичних пропульсивних комплексів, автоматизованих гребних електричних установок;
- принципи сумісної роботи складових суднового пропульсивного комплексу;
- методи аналізу перехідних та усталених режимів роботи складних електроенергетичних систем;
- сучасні методи моделювання та надання їх результатів; сучасні методи оптимізації в галузі удосконалення суднового електрообладнання та підвищення ефективності їх експлуатації.
- аналізувати основні типи комбінованих автоматизованих пропульсивних комплексів;
- розробляти математичні моделі складних електроенергетичних й механічних систем;
- будувати алгоритми роботи сучасних обчислюваних комплексів;
- проводити моделювання режимів роботи електроенергетичних систем и у складі суднових пропульсивних комплексів;
- проводити інтерпретацію отриманих результатів, та формувати відповідні висновки;

– знаходити шляхи, щодо підвищення безпеки експлуатації суднового електротехнічного обладнання та підвищення її ефективності.

Програма навчальної дисципліни

. Комбіновані електроенергетичні системи

Тема 1 Системи активного управління рухом судна. Традиційні пристрої управління рухом судна. Недоліки управління. Вимог щодо маневрених властивостей традиційних суден та електроходів. Активне управління рухом судна на малої швидкості. Пристрої активного управління. Маневрування в умовах обмеженої акваторії. Маневрені властивості суден з активними пристроями у порівнянні з традиційними пристроями управління. Безпечне управління при роботі поблизу причалів.

Тема 2 Підрулюючі пристрої в системі електроруху. Основне застосування підрулюючі пристроїв (ПП). Типи підрулюючі пристроїв. Варіанти виконання. Конструкції. Тунельні підрулюючі пристрої. Монтаж ПП на судні. Електропривод ПП. Варіанти типів гвинтів ПП. Електропривод ПП з гвинтами фіксованого кроку (ГФК). Електропривод ПП з гвинтами регульованого кроку (ГРК). Пуск та регулювання упору гвинтів ПП. Порівняльний аналіз приводів ПП з ГФК та ГРК.

Тема 3 Гвинторульові колонки в системі електроруху. Конструкції винторульових колонок (ГР-К). Типи (ГР-К). ГРК типу "L-Drive". ГР-К фірми Schottel. Електропривод ГР-К. Електропривод ГР-К. Пуск та регулювання упору гвинтів ГР-К. Порівняльний аналіз приводів ГР-К з ПП.. Переваги та недоліки ГР-К.

Тема 4 Гребні електричні установки Azipod в системі електроруху. Структура установок Azipod Розміщення на судні компонентів ГЕУ. Управління тягою гвинтів системи Azipod. Управління напрямом дії тяги гвинтів системи Azipod. Робочі зони ГЕУ Azipod типу VO і XO. Гребні установки Azipod типу V. Розташування модулів системи Azipod. Сисъема охолодження установки «Азипод». Силовий гідравлічний блок. Гребні установки Azipod типу X. Електрична система рульового управління. Гребні установки Azipod типу Compacst. Застосування гребних установок типу Azipod.

Тема 5 Системи динамічного позиціонування. Фактори, що впливають на судно, реакція судна на ці впливи і суднові пристрої для утримання позиції. Компоненти, які входять у систему динамічного позиціонування. Комбіновані електроенергетичні системи електроруху. Компонування обладнання ГЕУ. Особливості комбінованих ГЕУ різних суден. Схема ГЕУ бурової платформи з установками Azipod® CZ. Умови роботи, надійність, живучість.

Дослідження комбінованих пропульсивних комплексів

Тема 6 Судновий пропульсивний комплекс. Склад пропульсивного комплексна електрохода. Показники якості роботи. Системний підхід до оцінки якості роботи електроенергетичної установки та корпусу електрохода. Ієрархія у показниках якості. Динамічна подоба в дослідженнях перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів. Поняття про узагальнені параметри динамічної системи.

Тема 7. Математичні моделі перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів на маневрах. Структурна схема суднового пропульсивного комплексу. Типи складових комплексу. Математичний опис перехідних процесів в теплових двигунах, генераторах електричного струму, перетворювачах електроенергії, гребних електродвигуна, системі управління. Реверсивна характеристика гребного гвинта. Рівняння руху судна. Узагальнені параметри пропульсивних комплексів електроходів.

Тема 8. Моделювання маневрених режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів. Особливості поставки задач дослідження. Дослідження маневрених характеристик щодо варіювання безрозмірних узагальнених параметрів комплексу. Структурна схема розрахунку перехідних режимів роботи. Сучасні методи моделювання. Метод оцінки

якості роботи суднових пропульсивних комплексів. Способи відображення результатів моделювання.

Тема 9 Параметрична оптимізація пропульсивних комплексів електроходів. Параметрична оптимізація при проектуванні пропульсивних електроенергетичних систем. Показники якості проектування. Методи та алгоритми оптимізації. Багатокритеріальна оптимізація. Параметри, які оптимізуються та їх фізичний смисл. Приклади параметричної оптимізації щодо покращення маневрених властивостей електроходів, та її результати.

Тема 10 Оптимальне управління пропульсивними комплексами на маневрах. Управління гребними електроенергетичними установками на маневрах. Критерії оптимальності. Оптимальне управління. Методи та алгоритми оптимізації. Показники якості управління. Порівняння маневрених властивостей електроходів при використанні оптимального управління, у порівнянні з класичними законами управління гребними електроенергетичними установками. Управління гребними установками в екстремальних ситуаціях.

4. Структура навчальної дисципліни

Назви змістових модулів і тем	Кількість годин					
	денна форма навчання					
	усього	у тому числі				
		л	лаб	пр.	інд.	с.р.
1	2	3	4	5	6	7
Змістовий модуль 1. Комбіновані електроенергетичні системи						
Тема 1. Системи активного управління рухом судна.	10	2	–	–	–	8
Тема 2. Підруючі пристрої в системі електроруху.	12	2	–	2	–	8
Тема 3. Гвинтувальні колонки в системі електроруху	14	2	–	2	–	10
Тема 4. Гребні електричні установки Azipod в системі електроруху.	14	4	–	–	–	10
Тема 5. Системи динамічного позиціонування.	10	2	–	–	–	8
Разом за змістовим модулем 1	60	12	–	4	–	44
Змістовий модуль 2. Дослідження комбінованих пропульсивних комплексів						
Тема 6. Судновий пропульсивний комплекс.	12	4	–	–	–	8
Тема 7. Структурна схема судового пропульсивного комплексу електроходу. Математичні моделі перехідних режимів.	12	4	–	–	–	8
Тема 8. Моделювання маневрених режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів	12	2	–	2	–	8
Тема 9. Параметрична оптимізація при проектуванні суднових пропульсивних електроенергетичних систем.	12	2		2	–	8
Тема 10. Оптимальне управління гребними електроенергетичними установками пропульсивних комплексів на маневрах. алгоритми оптимізації..	12	2	–	2	–	8
Разом за змістовим модулем 2	60	14		6	–	40
Усього годин	120	26		10	.	84

Теми практичних занять

№ з/п	Назва теми
1	Математична модель перехідних режимів пропульсивного комплексу
2	Математична модель перехідних режимів пропульсивного комплексу
3	Моделювання перехідних режимів пуску електроенергетичної установки
4	Моделювання перехідних режимів реверсу електрохода

Методи навчання

Дисципліна «Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси» може викладатися в аудиторному і/або дистанційному форматах.

Під час викладання дисципліни використовуються пояснювально-ілюстративний, аналітичний та дослідницький методи навчання.

Пояснювально-ілюстративний метод означає, що здобувачі отримують знання на лекціях, з навчальної та методичної літератури. Лекції представлені у режимі презентації з використанням мультимедійного пристрою, а також на платформі дистанційного навчання «Moodle». Сприймаючи та осмислюючи факти, оцінки, висновки, здобувачі залишаються в рамках репродуктивного (відтворювального) мислення.

Аналітичний метод навчання спрямований на використання набутих знань у розв'язанні практичних завдань та при виконанні лабораторних робіт, аналізу результатів та набуття вмінь для обґрунтування прийняття рішень у різних виробничих ситуаціях.

Дослідницький метод навчання передбачає, що після аналізу матеріалу, постановки проблем і завдань та стислого усного або письмового інструктажу здобувачі самостійно вивчають теоретичні джерела та методичну літературу, ведуть спостереження, виконують інші дії пошукового характеру. Результати аналізуються та представляються для обговорення.

Методи контролю

Використовуються наступні методи контролю: поточний і підсумковий.

Поточний контроль полягає у визначенні рівня та обсягу оволодіння знаннями, навичками і вміннями з тем змістового модулю. Цей контроль здійснюється впродовж аудиторних занять і у поза аудиторний час, шляхом опитування на практичних та лабораторних заняттях, перевірки результатів виконання практичних і індивідуальних завдань, поточного тестування, складання колоквиуму тощо.

Здобувач, який не склав усі, передбачені цією програмою, індивідуальні завдання, не допускається до складання підсумкового контролю.

Підсумковий контроль здійснюється наприкінці семестру у вигляді екзамену (заліку), усного опитування за всіма темами дисципліни тощо.

Загальна оцінка з дисципліни становить максимум 100 балів та визначається оцінкою підсумкового контролю з екзамену (заліку).

Якщо здобувач отримав загальну оцінку з дисципліни від 35 до 59 балів, він має право на повторне проходження підсумкового контролю під час екзаменаційної сесії.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ

Для скорочення числа параметрів, спрощення аналізу, надання спільності його результатам скористаємося поняттям наближеного динамічно-еквівалентного комплексу.

Відповідно до нього, систему рівнянь (6.1)–(6.68) приводять до безрозмірної форми і виокремлюють критерії її динамічної подібності – безрозмірні параметри (в далі – просто "параметри") пропульсивного комплексу. У результаті:

- число параметрів (критеріїв динамічної подібності) системи скорочується в 5-6 разів ;
- з'являються широкі можливості узагальнення результатів досліджень: комплекси з рівними значеннями параметрів матимуть однакові закони зміни (у відносних одиницях) відповідних режимних показників; одержувані результати будуть прийнятними для всіх електроходів розглянутого класу.

Для переходу до безрозмірної форми запису використовується поняття базових значень відносних режимних показників. У якості таких (їх позначають індексом "0") приймають значення, що відповідають роботі пропульсивного комплексу в номінальному сталому режимі, під час руху судна вільною, глибокою, спокійною водою прямим курсом. Тоді відносні значення відповідних режимних показників визначатимуться як відношення поточних значень до базових. Будемо позначати їх символом "0" у показнику степеня (наприклад $M_D^0 = M_D / M_{D0}$). (Відносний час T^0 визначається дещо інакше:

$$T^0 = \frac{V_0}{L} t,$$

де t – реальний час.)

Остаточний варіант узагальненої математичної моделі перехідних і сталих режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів (розроблений на базі системи рівнянь (6.1)–(6.68)) представлений (опускаючи всі проміжні викладки) нижче.

Рівняння руху первинного двигуна

$$\frac{d\omega_D^0}{dT^0} = N_D (M_D^0 - K_{D1} M_G^0 - K_{DT}). \quad (6.69)$$

Обертовий момент первинного двигуна при $\frac{1}{\omega_{DP}^0} \leq 1$:

а) при $\omega_D^0 \leq \psi_D^0 \omega_{DP}^0$

$$M_D^0 = \xi_D^0 \frac{1 + (\omega_{DP}^0 - \omega_D^0) \beta_D}{1 + (\omega_{DP}^0 - 1) \beta_D};$$

б) при $\psi_D^0 \omega_{DP}^0 < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D^0 (c_{DP} - 1) + 1}{1/\omega_{DP}^0}$

$$M_D^0 = \frac{[1 + \omega_{DP}^0 (1 - \psi_D^0) \beta_D] \cdot \left[\frac{c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D^0 \omega_{DP}^0}}{c_{DP} - 1} + \xi_D^0 - 1 \right]}{1 + (\omega_{DP}^0 - 1) \beta_D}.$$

Обертовий момент первинного двигуна при $\frac{1}{\omega_{DP}^0} > 1$:

а) при $\omega_D^0 \leq \psi_D^0 \omega_{DP}^0$

$$M_D^0 = \xi_D^0 \frac{[1 + (\omega_{DP}^0 - \omega_D) \beta_D] \cdot (c_{DP} - 1)}{c_{DP} - 1/\omega_{DP}^0}; \quad (6.70)$$

б) при $\psi_D^0 \omega_{DP}^0 < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D^0 (c_{DP} - 1) + 1}{1/\omega_{DP}^0}$

$$M_D^0 = \frac{[1 + \omega_{DP}^0 (1 - \psi_D^0) \beta_D] \cdot \left[(\xi_D^0 - 1)(c_{DP} - 1) + c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D^0 \omega_{CP}^0} \right]}{c_{DP} - 1/\omega_{DP}^0}.$$

Рівняння руху регулятора первинного двигуна

$$\frac{d\xi_D^0}{dT^0} = C_{RD1} (\omega_D^0 - \omega_{Dзад}^0) - C_{RD2} \xi_D^0. \quad (6.71)$$

Рівняння, що описують генератор електричного струму:

а) момент опору первинному двигуну

$$M_G^0 = C_{G1} \frac{U_G^0 I_G^0}{\omega_D^0} \cos \varphi_G + C_{G2} \frac{(U_G^0)^2}{\omega_D^0} \sin 2\theta_G; \quad (6.72)$$

б) напруга на виході генератора

$$U_G^0 = \frac{1}{\cos \theta_G} [C_{G3} E_G^0 - C_{G4} (I_G^0)^{(1+RT)} \cos \psi_G - C_{G5} I_G^0 \omega_D^0 \sin \psi_G]; \quad (6.73)$$

в) поздовжня складова результуючої ЕРС генератора

$$E_G^0 = \omega_D^0 (C_{G7} I_{GV}^0 - C_{G8} I_G^0 \sin \psi_G - C_{G9} I_G^0), \quad (6.74)$$

$$\text{де } \varphi_G = \alpha_G + \frac{\gamma_G}{2} \quad (6.75)$$

$$\psi_G = \arccos \left(C_{G10} \frac{U_G^0}{\omega_D^0 I_{GV}^0} \cos \varphi_G \right); \quad (6.76)$$

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G; \quad (6.77)$$

$$\gamma_G = \arccos \left(\cos \alpha_G - C_{G11} \frac{I_M^0 \omega_D^0}{E_G^0} \right) - \alpha_G. \quad (6.78)$$

Рівняння перехідних процесів у збуджувальному пристрої генератора:

а) струм збудження генератора

$$\frac{dI_{GV}^0}{dT^0} = N_{GV} [E_{GV}^0 - C_{GV2} I_{GV}^0 - (C_{GV2} - 1) I_G^0]; \quad (6.79)$$

б) ЕРС на виході збудника

$$E_{GV}^0 = C_{GV3} \phi_{GV}^0 + (1 - C_{GV3}) (I_{GV}^c)^0; \quad (6.80)$$

в) магнітний потік збудника

$$\left(\frac{d\phi_{GV}^0}{dT} \right) = N_{GV1} [U_{GV\Sigma}^0 - \phi_{GV}^0]; \quad (6.81)$$

г) струм в обмотці самозбудження

$$\frac{d(I_{GV}^c)^0}{dT^0} = N_{GV2} [E_{GV}^0 - (1 - C_{GV6}) I_{GV}^0 - C_{GV6} (I_{GV}^c)^0]. \quad (6.82)$$

Напруга на виході перетворювача електроенергії

$$U_M^0 = K_{SE} \frac{U_{G0}}{U_{M0}} \mu_{SE} (T^0) U_G^0. \quad (6.83)$$

Струм на вході перетворювача енергії (струм генератора)

$$I_G^0 = C_{G6} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \cdot \mu_{SE} (T^0) I_M^0 \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_G}. \quad (6.84)$$

Рівняння руху гребного електродвигуна

$$\frac{d\omega_M^0}{dT^0} = N_M (M_M^0 - K_{M1} M_P^0 - K_{MT}). \quad (6.85)$$

Математичний опис законів зміни основних режимних показників електродвигунів досить складний. Для полегшення сприйняття математичної моделі запишемо переведені в безрозмірні величини формули (6.18)–(6.30) окремо за кожним із розглянутих типів гребних електродвигунів (що жодною мірою не впливає на спільність математичного апарату).

1. Для гребних електродвигунів постійного струму і вентильних:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = \phi_M^0 I_M^0 (K_M^{in})^0; \quad (6.86)$$

б) магнітний потік

$$\phi_M^0 = \sqrt{C_{M1} (I_{MV}^0)^2 + C_{M2} I_{MV}^0 + C_{M3} - C_{M8} I_M^0 (C_{M9} I_{MV}^0 + C_{M10}) \cdot \sin \gamma_{KC} + C_{M11} (I_M^0)^2 \times} \\ \times (K_{MD}^2 \sin^2 \gamma_{KC} + K_{MQ}^2 \cos^2 \gamma_{KC}); \quad (6.87)$$

в) струм двигуна

$$I_M^0 = C_{M12} U_M^0 - C_{M13} \phi_M^0 (K_M^{in})^0 \omega_M^0; \quad (6.88)$$

г) коефіцієнт інвертування

$$(K_M^{in})^0 = C_{M15} [\cos \beta_M^{in} + \cos \delta_M^{in}]; \quad (6.89)$$

д) сумарний кут комутації

$$\gamma_{KC} = \left(\arctg \frac{C_{M4} I_M^0}{C_{M5} I_{MV}^0 + C_{M6}} + \frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right) \quad (6.90)$$

е) коефіцієнт потужності на вході двигуна

$$\cos \varphi_M = \cos \left(\frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right). \quad (6.91)$$

2. Для асинхронного гребного електродвигуна:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = C_{M16} \frac{\gamma^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0)} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}; \quad (6.92)$$

б) струм

$$I_M^0 = C_{M24} \gamma \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}; \quad (6.93)$$

в) коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos \varphi_M = \frac{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0} + \frac{C_{M23} \alpha}{2(C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0)}}{\sqrt{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0}}} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}, \quad (6.94)$$

де $R_f(\alpha, \omega_M^0)$ – допоміжна функція:

$$R_f(\alpha, \omega_M^0) = \sqrt{(C_{M17} + C_{M18} \alpha^2) + \frac{C_{M21} + C_{M22} \alpha^2}{(C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0)^2} + \frac{C_{M23} \alpha}{C_{M19} \alpha - C_{M20} \omega_M^0}} \quad (6.95)$$

3. Для синхронного гребного електродвигуна:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = \frac{1}{N_M} \frac{d\alpha}{dT} + K_{M1} M_P^0 + K_{MT} \quad (6.96)$$

б) струм двигуна

$$I_M^0 = \sqrt{C_{M28} (I_{MV}^0)^2 + C_{M29} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right)^2 - C_{M30} \frac{I_{MV}^0 \gamma}{\alpha} \cos \theta_M} ; \quad (6.97)$$

в) коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos \varphi_M = \cos \left[\arctg \frac{C_{M31} \gamma - \alpha I_{MV}^0 \cos \theta_M}{\alpha I_{MV}^0 \sin \theta_M} \right]; \quad (6.98)$$

г) е.д.с. намагнічування

$$E_{0M}^0 = \alpha I_{MV}^0. \quad (6.99)$$

Кут навантаження θ_M знаходиться з рішення рівняння

$$M_M^0 = C_{M26} \frac{E_{0M}^0 \gamma}{\alpha} \sin \theta_M + C_{M27} \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \sin 2\theta_M. \quad (6.100)$$

Рівняння процесів у збуджувальному пристрої гребного електродвигуна:

а) струм в обмотці збудження електродвигуна

$$\frac{dI_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV} [E_{MV}^0 - I_{MV}^0]; \quad (6.101)$$

б) ЕРС на виході збудника

$$E_{MV}^0 = C_{MV3} \phi_{MV}^0 + C_{MV4} (I_{MV}^c)^0; \quad (6.102)$$

в) магнітний потік

$$\frac{d\phi_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV1} [U_{MV}^0 - \phi_{MV}^0]; \quad (6.103)$$

г) струм в обмотці самозбудження

$$\frac{d(I_{MV}^c)^0}{dT^0} = N_{MV2} [E_{MV}^0 - (1 - C_{MV6}) I_{MV}^0 - C_{MV6} (I_{MV}^c)^0]. \quad (6.104)$$

Результуюча напруга на вході збудника генератора

$$U_{GU\Sigma}^0 = K_{UG0} U_{UG}^0 - K_{UG1} U_{UG1}^0 - K_{UGP} U_{UGP}^0 - K_{UGU} U_{UGU}^0 - K_{UG\phi} U_{UG\phi}^0 - (K_{UGT})^T (U_{UGT}^0)^T - (K_{UGT})^T (U_{UGT}^0)^T, \quad (6.105)$$

$$\text{де } \frac{dU_{UG1}^0}{dT^0} = K_{UG12} (I_G^0 - I_{G1}^0) + K_{UG11} \cdot \frac{d(I_G^0 - I_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.106)$$

$$\frac{dU_{UGP}^0}{dT^0} = K_{UGP2} (I_G^0 U_G^0 - P_{G1}^0) + K_{UGP1} \frac{d(U_G^0 I_G^0 - P_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.107)$$

$$\frac{dU_{UGU}^0}{dT^0} = K_{UGU2} (U_G^0 - U_{G1}^0) + K_{UGU1} \cdot \frac{d(U_G^0 - U_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.108)$$

$$\frac{dU_{UG\phi}^0}{dT^0} = K_{UG\phi2} (\omega_M^0 - \omega_{M1}^0) + K_{UG\phi1} \cdot \frac{d(\omega_M^0 - \omega_{M1}^0)}{dT^0}; \quad (6.109)$$

$$\frac{d(U_{UG1}^0)^T}{dT^0} = K_{UG12}^T \frac{d}{dT^0} \left(\frac{dI_G^0}{dT^0} \right) + K_{UG11}^T \frac{dI_G^0}{dT^0}. \quad (6.110)$$

Результуюча напруга на вході збудника гребного електродвигуна

$$U_{MU\Sigma}^0 = K_{UM0} U_{UM}^0 + K_{UMP} U_{UMP}^0 - K_{UM\phi} U_{UM\phi}^0 - K_{UMI} U_{UMI}^0, \quad (6.111)$$

де

$$\frac{dU_{UMP}^0}{dT^0} = K_{UMP1} (M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0) + K_{UMP2} \frac{d(M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0)}{dT^0} \quad (6.112)$$

$$\frac{dU_{UM\omega}^0}{dT^0} = K_{UM\omega1} (\omega_M^0 - \omega_{M1}^0) + K_{UM\omega2} \frac{d(\omega_M^0 - \omega_{M1}^0)}{dT^0} ; \quad (6.113)$$

$$\frac{dU_{UMI}^0}{dT^0} = K_{UMI1} (I_M^0 - I_{M1}^0) + K_{UMI2} \frac{d(I_M^0 - I_{M1}^0)}{dT^0}. \quad (6.114)$$

Корпус судна.

Зазвичай приєднаним статичним моментом є λ_{26} нехтують. У цьому разі рівняння руху судна в горизонтальній площині, переведені в безрозмірну форму запису, матимуть такий вигляд:

$$\frac{dv_X^0}{dT^0} = C_{\lambda,2} v_Y^0 \Omega_Z^0 + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} P_{ej}^0 - C_{RX} \beta_{RP} (v^0)^2 - R_X^0 \right\}; \quad (6.115)$$

$$\frac{dv_Y^0}{dT^0} = -\frac{1}{C_{\lambda,2}} v_X^0 \Omega_Z^0 + \frac{N_X}{C_{\lambda,2}} \left\{ \sum_j K_{Pj} \alpha_{jz} P_{ej}^0 + C_{RY} \beta_{RP} (v^0)^2 - R_Y^0 \right\}; \quad (6.116)$$

$$\frac{d\Omega_Z^0}{dT^0} = -\frac{N_{\Omega}}{N_X} C_{\lambda,21} v_X^0 v_Y^0 + N_{\Omega} \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} P_{ej}^0 + (M_{IIZ}^0 - M_{IIZ}^0) + C_{RY} X_{RP}^0 \beta_{RP} (v^0)^2 \right\}, \quad (6.117)$$

де

$$R_X^0 = \left\{ C_{11} \cos 1,5\beta_{op} - C_{12} \sin^4 1,5\beta_{op} + C_{13} \left(\frac{2\beta_{op}}{\pi} \right)^3 \right\} \cdot (v^0)^2; \quad (6.118)$$

$$R_Y^0 = \{ C_{21} \sin 2\beta_{op} \cdot \cos \beta_{op} + C_{22} \sin^2 \beta_{op} + C_{23} \sin^4 2\beta_{op} \} \cdot (v^0)^2; \quad (6.119)$$

$$M_{IIZ}^0 - M_{IIZ}^0 = [C_{61} \sin 2\beta_{op} + C_{62} \sin \beta_{op} + C_{63} \sin^3 2\beta_{op} + C_{64} \sin^4 2\beta_{op}] (v^0)^2 - C_{65} \Omega_Z^0 v^0; \quad (6.120)$$

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_{II} \left(\arctg \beta_{op} - \varepsilon \frac{\Omega_Z^0}{v^0} \right) \quad (6.121).$$

Таким чином, до системи рівнянь, що описують перехідні режими в безрозмірних одиницях, входять вирази: (6.48)–(6.54), (6.69)–(6.121).

У процесі перетворення рівнянь (що описують перехідні процеси в пропульсивних комплексах в абсолютних одиницях) у безрозмірну форму запису, було **автоматично** отримано **критерії динамічної подібності** – ті самі безрозмірні параметри пропульсивних комплексів. Саме цими **критеріями** (параметрами) визначаються закони зміни у часі режимних показників комплексів.

Для того щоб розрахувати чисельні значення критеріїв динамічної подібності для кожного конкретного електроходу, достатньо підставити значення відповідних параметрів пропульсивного комплексу у відповідні співвідношення.

Способи дослідження перехідних і сталих режимів роботи на ЕОМ

Для аналізу маневрених режимів роботи силових установок у складі пропульсивних комплексів електроходів розроблено пакет прикладних програм. "Базовими" є програми, які дають змогу розраховувати закони зміни у часі відносних режимних показників під час виконання електроходами найрізноманітніших маневрів.

Відповідно до процедури розрахунків, під час аналізу маневрених режимів:

– розраховують і вводять у вигляді вихідних даних безрозмірні параметри комплексів; для будь-якого конкретного електропривода – це постійні ("конструктивні") параметри; під час

проведення наукових досліджень і конструкторських опрацювань значеннями цих параметрів можна варіювати;

- відповідно до досліджуваного маневру вводять параметри управління комплексом – величини, що характеризують інтенсивність зміни керівних впливів і усталені їхні значення, відповідно до положень рукояток постів управління та перекладкою пера керма;

- задаються початкові умови;

- відповідно до обраних маневрів формуються закони управління кожним силовим контуром (як правило, кількість контурів 2 – 3) і рульовим пристроєм, наприклад:

а) під час розгону $0 \leq T^0 \leq T_1^0$

$$\alpha = \alpha_{уст.} (1 - \exp(-k_1 \cdot T^0)), \quad \gamma = \gamma(\alpha);$$

б) при реверсі з переднього ходу на задній $T_1^0 < T^0 \leq T_2^0$

$$\alpha = 0, \quad \gamma = \gamma_{уст.} (1 - \exp(-k_\gamma (T^0 - T_1^0))); \quad \text{для } \omega_M \geq 0$$

$$\alpha = \alpha_{уст.} (1 - \exp(-k_2 \cdot (T^0 - T_1^0))), \quad \gamma = \gamma(\alpha); \quad \text{для } \omega_M < 0$$

в) при реверсі із заднього ходу на передній $T_2^0 < T^0 < T_3^0$

$$\alpha = 0, \quad \gamma = \gamma_{уст.} (1 - \exp(-k_\gamma (T^0 - T_2^0))); \quad \text{для } \omega_M \leq 0$$

$$\alpha = \alpha_{уст.} (1 - \exp(-k_3 \cdot (T^0 - T_2^0))), \quad \gamma = \gamma(\alpha); \quad \text{для } \omega_M > 0,$$

- розраховуються поточні значення основних режимних показників кожного силового контуру;

- визначаються гідродинамічні сили й моменти, що діють на судно;

- обчислюються поздовжня і поперечна сили керма і момент, що діє на судно від поперечної сили;

- розраховуються поточні значення параметрів руху судна у пов'язаній із ним системі координат, а потім – у незв'язаній системі.

У процесі розрахунків реєструються такі режимні показники (у відносних величинах):

а) по кожному силовому контуру

- кутова швидкість обертання первинного двигуна – ω_D ;

- обертальний момент первинного двигуна – M_D ;

- потужність первинного двигуна – P_D ;

- напруги на виході генератора – U_G ;

- струм збудження генератора – I_{GV} ;

- струм якоря генератора – I_G ;

- відносна напруга керування перетворювачем – відносна напруга керування перетворювачем – γ ;

- напруга на вході гребного електродвигуна – U_M ;

- струм гребного електродвигуна – I_M ;

- обертальний момент гребного електродвигуна – M_M ;

- кутова швидкість обертання гребного електродвигуна і гребного гвинта – ω_M ;

б) руху судна:

- швидкість руху судна – v ;

- складова швидкості v уздовж поздовжньої осі X – v_X ;

- складова швидкості v уздовж поперечної осі Y – v_Y ;

- кутова швидкість обертання судна навколо осі Z – кутова швидкість обертання судна

навколо осі Z Ω_Z ;

- кут дрейфу – $\beta_{др}$;

- пройдений шлях уздовж осей $X1$ і $Y1$, відповідно – $X1$ і $Y1$;

- кут курсу – ψ_C .

За необхідності, можуть реєструватися і будь-які інші, одержувані в процесі розрахунків, режимні показники.

Розроблена математична модель являє собою систему звичайних диференціальних рівнянь. Вона має такі відмінні риси:

а) рівняння математичного опису перехідних процесів належать до категорії жорстких рівнянь; постійні часу в диференціальних рівняннях вельми істотно відрізняються одне від одного;

б) інтенсивності зміни режимних показників на окремих етапах перехідних процесів змінюються у великих межах – на початкових стадіях розгону і особливо реверсування силової установки вони максимальні, а під час наближення до сталих режимів - навпаки мінімальні.

Як приклад використання розробленого математичного апарату, нижче наводиться розрахунок деяких маневрів стосовно конкретного електроходу.

Розглянемо проект судна з перспективним варіантом електроенергетичної установки – на змінному струмі з частотно-керованими гребними електродвигунами.

Основні технічні характеристики проекту за корпусом, рушійно-рульовим комплексом, джерелами енергії близькі до електроходу класу лінійного криголама (гребна установка прототипу виконана на змінно-постійному струмі). Надалі будемо називати судно, що розглядається, "Проектом».

Основні характеристики судна:

– довжина	51,7 м
– ширина	15,01 м
– осадка	4,2 м
– водотонажність	1763 т
– потужність головних двигунів	2200 кВт
– швидкість руху	7 м/с.

До складу силової установки входять:

– два дизель-генераторні агрегати типу ДГР $\frac{1000}{750}$, кожен з яких містить дизель

$10Д \frac{20,7}{2 \times 25,4}$ з ефективною потужністю 1100 кВт при 750 об/хв і генератор МСК 1270-750

потужністю 1000 кВт при 750 об/хв;

- тиристорні перетворювачі частоти;
- два асинхронні гребні електродвигуни, що мають такі основні розрахункові параметри:
- потужність 1000 кВт
- струм статора 1100 А
- коефіцієнт потужності 0,835
- обертальний момент 10670 Нм
- кутова швидкість обертання $93,67 \text{ с}^{-1}$

основні обмотувальні дані

– активний опір статора	0,00419 Ом
– реактивний опір статора	0,0879 Ом
– приведений активний опір ротора	0,0359 Ом
– приведений реактивний опір ротора	0,1319 Ом
– коефіцієнт приведення опорів	34,336
– реактивний опір намагнічування	1,503 Ом.

Чисельні значення основних безрозмірних параметрів пропульсивного комплексу "Проект", представлені в табл. 6.1.

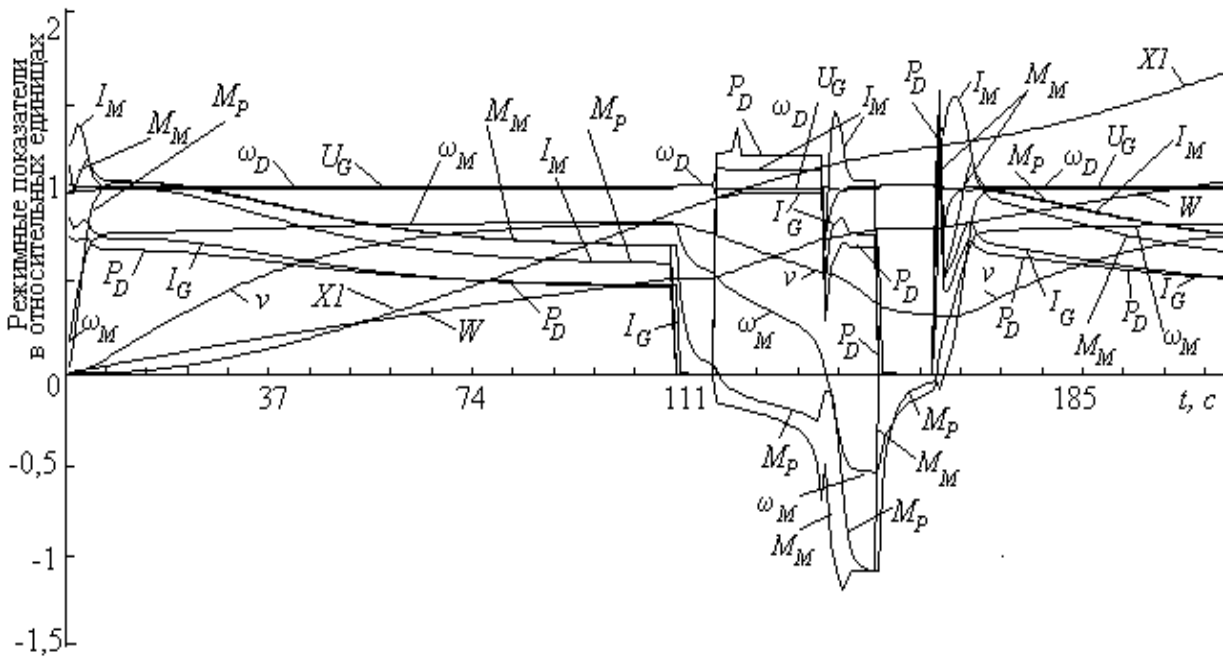
На рис. 6.9 наведено закони зміни режимних показників пропульсивного комплексу при виконанні судном декількох маневрів, що чергуються: розгону ($0 < T \leq 111$) – реверсу з переднього ходу на задній ($111 \leq T \leq 148$) – реверсу із заднього ходу на передній ($T > 148$). Розрахунок закінчувався після закінчення 211 секунд (28,5 відносних одиниць часу). Масштаби

в абсолютных единицах за каждым режимным показником наведено для зручності користування в під рисунковому підписі, а самі криві побудовано в реальних одиницях часу.

Таблиця 6.1

Чисельні значення безрозмірних параметрів «Проекту»

Параметр	Значення	Параметр	Значення	Параметр	Значення
C_{D1}	1	C_{G10}	0,69	C_{M24}	11
C_{D2}	0,05	C_{G11}	0,103	α_{iz}	0
c_{DR}	1,04	N_{VG}	3	C_{14}	1,204
N_D	1,937	N_M	5,1	C_{21}	3,372
C_{G1}	0,5	C_{M16}	14,127	C_{22}	21,19
C_{G2}	0,75	C_{M17}	0,0164	C_{23}	1,686
C_{G3}	1	C_{M18}	40,21	C_{61}	3,564
C_{G5}	0,075	C_{M19}	1	C_{62}	0,048
C_{G7}	1,45	C_{M20}	0,895	C_{63}	1,301
C_{G8}	0,608	C_{M21}	0,0001	C_{64}	0,241
N_X	0,132	N_Ω	0,99	C_{65}	4,076
C_{M22}	1,1204	χ_Π	0,45	$C_{\lambda 2}$	1,368
C_{M23}	0,233	C_{RY}	1,532	$C_{\lambda 21}$	0,736
$y_i - \alpha_{iz}$	0,1				



МЕТОД АНАЛІЗУ

У процесі дослідження і проектування суднових гребних електроенергетичних установок, під час їхнього налаштування і налагодження, при експлуатації тощо, доводиться оцінювати якість роботи того чи іншого елемента гребної установки і якості роботи всього пропульсивного комплексу загалом. Стосовно маневрування – це маневрені якості.

Під час оцінювання маневрених якостей пропульсивних комплексів насамперед розглядають інерційно-гальмівні характеристики і керованість. Характерними маневрами, що дають змогу судити про маневрові якості, є розгін, гальмування, реверс судна, циркуляція.

Аналіз результатів численних розрахунків та наявна практика проектування й експлуатації суден з електричним рухом дають підстави запропонувати для оцінки якості роботи пропульсивних комплексів такі показники:

Під час маневрування на прямолінійній траскторії:

J_1 – час виконання маневру – T ;

J_2 – відносні витрати енергії на виконання маневру – W ;

J_3 – нерівномірність (відхилення) кутової швидкості обертання первинних двигунів –

$$\Delta \omega_D = \frac{\omega_{Dmax} - \omega_{Dmin}}{\omega_{Dycm}} ;$$

J_4 – максимальна потужність первинних двигунів –

$$P_{Dm} = P_{Dmax} / P_{Dycm} ;$$

J_5, J_6 – сплески (кидки) струму генераторів під час розгону – $(I)_{Gpm}$ і під час реверсу – $(I_G)_{Tm}$

$$(I_G)_{Pm} = (I_G)_{Pmax} / (I_G)_{Pycm} , \quad (I_G)_{Tm} = (I_G)_{Tmax} / (I_G)_{Tycm} ;$$

J_7, J_8 – усталені значення струму генераторів під час розгону $(I_G)_{Pycm}$ і реверсу $(I_G)_{Tycm}$;

J_9 – перепад напруги на виході генераторів – ΔU_G

$$\Delta U_G = \frac{U_{Gmax} - U_{Gmin}}{U_{Gycm}} ;$$

J_{10}, J_{11} – тривалості розгону $T_{ГЕДразг.}$ і реверсу $T_{ГЕДрев.}$ ГЕД і гребних гвинтів;

J_{12}, J_{13} – сплески (кидки) струму ГЕД під час розгону $(I_M)_{Pm}$ і під час реверсу $(I_M)_{Tm}$

$$(I_M)_{Pm} = (I_M)_{Pmax} / (I_M)_{Pycm} , \quad (I_M)_{Tm} = (I_M)_{Tmax} / (I_M)_{Tycm} ;$$

J_{14}, J_{15} – сплески (кидки) обертового моменту ГЕД під час розгону $(M_M)_{Pm}$ і під час реверсу $(M_M)_{Tm}$

$$(M_M)_{Pm} = (M_M)_{Pmax} / (M_M)_{Pycm} ; \quad (M_M)_{Tm} = (M_M)_{Tmax} / (M_M)_{Tycm} ;$$

J_{16}, J_{17} – усталені значення обертового моменту ГЕД під час розгону $(M_M)_{Pycm}$ і під час реверсу $(M_M)_{Tycm}$;

J_{18}, J_{19} – усталені значення кутової швидкості обертання ГЕД і гребних гвинтів під час розгону $(\omega_M)_{Pycm}$ і під час реверсу $(\omega_M)_{Tycm}$;

J_{20}, J_{21} – тривалості протікання перехідних процесів у силовій установці під час розгону $(T_{CY})_{разг.}$ і під час реверсу $(T_{CY})_{рев.}$;

J_{22} – максимальна швидкість судна до кінця розгону – v_{max} ;

J_{23} – тривалість розгону пропульсивного комплексу до заданого значення швидкості $(T)_{V=V_{зад.}}$;

J_{24} – пройдений судном шлях по закінченню маневру – $(Xl)_{разг.}$ або $(Xl)_{тор.}$.

При циркуляційному русі:

J_{25}, J_{26} – відносна зміна потужності первинних двигунів зовнішнього – $(\Delta P_D)_1$ і внутрішнього – $(\Delta P_D)_2$ щодо центру циркуляції силових контурів, під час виходу електроходу на сталу циркуляцію

$$(\Delta P_D)_1 = P_{D \text{ лев.}} / P_{D \text{ нач.}} , \quad (\Delta P_D)_2 = P_{D \text{ прав.}} / P_{D \text{ нач.}} ;$$

J_{27}, J_{28} – відносна зміна струму статора ГЕД зовнішнього – $(\Delta I_M)_1$ і внутрішнього $(\Delta I_M)_2$ силових контурів:

$$(\Delta I_M)_1 = I_{M \text{ лев.}} / I_{M \text{ нач.}} , \quad (\Delta I_M)_2 = I_{M \text{ прав.}} / I_{M \text{ нач.}} ;$$

J_{29}, J_{30} – відносна зміна обертового моменту ГЕД зовнішнього – $(\Delta M_M)_1$ і внутрішнього – $(\Delta M_M)_2$ силових контурів:

$$(\Delta M_M)_1 = M_{M \text{ лев.}} / M_{M \text{ нач.}} , \quad (\Delta M_M)_2 = M_{M \text{ прав.}} / M_{M \text{ нач.}} ;$$

J_{31}, J_{32} – зміна кутової швидкості обертання ГЕД і гребних гвинтів зовнішнього – $(\Delta \omega_M)_1$ і внутрішнього – $(\Delta \omega_M)_2$ силових контурів:

$$\Delta \omega_M)_1 = \Delta \omega_{M \text{ лев.}} / \Delta \omega_{M \text{ нач.}} ; \quad (\Delta \omega_M)_2 = \Delta \omega_{M \text{ прав.}} / \Delta \omega_{M \text{ нач.}} ;$$

J_{33} – відносне зниження швидкості руху судна з виходом його на сталу циркуляцію $(\Delta v)_Ц = v_Ц / v_{\text{нач.}} ;$

J_{34} – кутова швидкість обертання судна Ω_Z на усталеній циркуляції – $\Omega_Ц ;$

J_{35} – відносний діаметр циркуляції – $D_Ц ;$

J_{36} – тактичний діаметр циркуляції – $D_T ;$

J_{37} – висування судна – $L_1 ;$

J_{38} – пряме зміщення – $L_2 ;$

J_{39} – кут курсу судна по закінченню заданого проміжку часу – $\psi_c ;$

J_{40} – тривалість виконання повного обороту – $T_Ц ;$

J_{41} – тривалість еволюційного періоду маневру – $T_{ЭВ} ;$

J_{42} – витрати енергії на виконання судном повного обороту – $W_Ц .$

Позначення "нач" в індексах показників, які описують циркуляційний рух, означає початкове (на момент виходу на циркуляцію) значення відповідного показника.

Сукупність перерахованих показників (а їх запропоновано понад 40) в достатньою мірою охоплює кожен елемент силової установки електроходу окремо і весь електрохід загалом, і має необхідну достатність для того, щоб повною мірою оцінити маневрені якості пропульсивних комплексів.

Далі в усій роботі (крім тих місць, де це спеціально обумовлено) відносні значення режимних показників позначатимуться (для полегшення сприйняття) без символу "0" у показнику ступеня.

Велика кількість чинників (параметрів пропульсивного комплексу), що впливають на значення показників якості, істотно ускладнює аналіз маневрених режимів роботи, а якщо врахувати, що і кількість самих показників перевищує 40, то розв'язання завдання стає нездійсненним. Єдиним виходом із такої ситуації є виявлення параметрів (чинників), які найсильніше впливають на величини показників якості. Інакше кажучи, необхідно виокремити з множини факторів $q_i, i=1,..., n$ підмножину факторів $q_j, j= 1,..., p (p < n)$, відхилення яких від розрахункових значень Δq_j визначає основну частину приросту показника $J(\Delta q_j) \approx J(\Delta q_i)$. Розкид решти $s=n-p$ чинників не чинить істотного впливу на досліджувані показники і зміни їхніх значень можна не враховувати.

Розв'язання подібних завдань доцільно здійснювати методами відсіювальних експериментів, що базуються на припущенні, що тільки мала кількість чинників істотно позначається на величині показника якості. Причому ефекти цих факторів, розташовані в порядку убуття, являють собою залежність експоненціального типу. Це дає змогу більшості чинників віднести до шумового поля, на тлі якого виокремлюється порівняно невелика кількість чинників, які **істотно впливають** на показники якості.

Слід врахувати, що не всі безрозмірні параметри комплексу "працюють" на тому чи іншому маневрі. Крім того, низку параметрів можна апіорно, або керуючись здоровим глуздом, виключити з числа досліджуваних, вважаючи їхні значення неварійованими. У

результаті цього, кількість досліджуваних параметрів дещо скорочується. Усі досліджувані фактори, з відповідними їм порядковими номерами, наведено в табл. 7.1.

При кількості факторів, яка обчислюється кількома десятками (що відповідає досліджуваній системі), зручно скористатися методом випадкового балансу.

В основі методу лежить матриця випадкового балансу (матриця планування експериментів – розрахунків), яка складається на основі матриці повного факторного експерименту (ПФЕ). Для її отримання фактори q_i розділені на групи, що містять не більше чотирьох факторів. Фактори можуть перебувати на двох рівнях: одиниці з плюсом відповідає верхній рівень (максимальне значення), одиниці з мінусом – нижній рівень (мінімальне значення). Матриця планування складається з підматриць, складених на основі ПФЕ типу 2^4 .

Таблиця 7.1 Відповідність параметрів комплексів факторам q_i відсіювального експерименту

Фактор	Пара-метр	Фактор	Пара-метр
q_1	ω_{DR}^0	q_{25}	χ_{II}
q_2	β_D	q_{26}	C_{RY}
q_3	C_{DR}	q_{27}	C_{12}
q_4	N_D	q_{28}	C_{13}
q_5	N_{GV}	q_{29}	K_{UGU1}
q_6	N_M	q_{30}	C_{21}
q_7	C_{G5}	q_{31}	C_{22}
q_8	C_{G8}	q_{32}	C_{23}
q_9	C_{G11}	q_{33}	C_{61}
q_{10}	C_{M17}	q_{34}	C_{62}
q_{11}	C_{M18}	q_{35}	C_{63}
q_{12}	C_{M20}	q_{36}	C_{64}
q_{13}	C_{M21}	q_{37}	C_{65}
q_{14}	C_{M22}	q_{38}	$C_{\lambda 2}$
q_{15}	C_{M23}	q_{39}	$C_{\lambda 21}$
q_{16}	C_{M35}	q_{40}	N_X
q_{17}	C_{M36}	q_{41}	N_{Ω}
q_{18}	C_{M37}	q_{42}	a_M
q_{19}	C_{M38}	q_{43}	a_P
q_{20}	k_1	q_{44}	a_{γ}
q_{21}	k_2	q_{45}	K_{UGI1}
q_{22}	k_3	q_{46}	N_{RD}
q_{23}	KR		
q_{24}	C_{M16}		

Підматриці ПФЕ для різних груп чинників складаються з тих самих рядків, що й базова, проте порядок чергування рядків у кожній підматриці різний і визначається за допомогою матриці випадкових чисел. Підматриці планування, об'єднані послідовно в одну матрицю, утворюють матрицю випадкового балансу, що є вихідною для проведення експериментів (розрахунків), тобто являє собою план проведення експериментів.

У результаті розрахунків досліджуваних маневрів у точках, що задаються матрицею випадкового балансу, отримують вектор-стовпець показника якості J .

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ПОКАЗНИК ЯКОСТІ

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВОДИТЬСЯ ЗА НАВЕДЕНОЮ НИЖЧЕ МЕТОДИКОЮ

На першому етапі аналізу будується діаграма розсіювання. Її побудова зводиться до знесення значень J_r , де r – порядковий номер рядка розрахунку в матриці, в один із двох стовпчиків залежно від того, на якому рівні перебуває фактор. Внесок фактору E визначається величиною центрів зсуву змінних за кожним стовпчиком. Для кількісного оцінювання суттєвих чинників обирають m стовпців суттєвих чинників, виділених за діаграмою розсіювання, будують матрицю ПФЕ типу 2^l і допоміжну матрицю J^{VS} з результатами розрахунків матриці ПФЕ. На основі допоміжної матриці будується аналітична модель показника якості J виду

$$J = \sum_{i=0}^k b_i q_i. \quad (7.1)$$

У формулі (7.1) значенням b_i , $i=0,1,\dots, l$ відповідає лінійна модель показника. При $i = \overline{l+1, k}$ коефіцієнти b_i відображають ефекти взаємодії факторів. Коефіцієнти b_i визначаються як

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m q_{ir} \overline{J_j}, \quad (7.2)$$

де $m=2^l$;

$$\overline{J_j} = \frac{1}{\eta_j} \sum_{r=1}^{\eta_j} J_{jr}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (7.3)$$

η_j – кількість паралельних розрахунків.

На другому етапі аналізу виключають ефекти від знайдених на першому етапі значущих чинників. Для цього з кожного значення J_r віднімаються **величини**

$$J_{br} = \sum_{i=1}^{l_1} b_i (q_{ri} + 1), \quad (7.4)$$

де l_1 – число виділених істотних чинників ($l_1 \leq l$) на першому етапі;

q_{ri} – значення фактору в i -му стовпчику і r -му рядку матриці випадкового балансу.

Повторення описаних вище дій дає змогу проранжувати всю групу суттєвих факторів.

Для виділення ефектів взаємодій, у зв'язку з величезним числом їхніх сполучень, використовується метод виділення взаємодій з діаграм розсіювання лінійних ефектів. В основі його лежить припущення про те, що за великого внеску взаємодії точки, що виділяються, будуть на обох рівнях. Під точками i -го фактору, що виділяються, на верхньому (нижньому) рівні розуміють точки, для яких значення показника J більші, ніж найбільше значення J на нижньому (верхньому) рівні цього фактору. Істотні взаємодії – це ті, у яких у верхній (нижній) частині діаграми розсіювання точки, що виділяються, повторюють одна одну, а в нижній (верхній) утворюють дзеркальне відображення.

Кількісна оцінка суттєвих взаємодій проводиться, аналогічно оцінці суттєвих чинників, побудовою допоміжної матриці J^{VS} , у якій роль чинників виконують ефекти їхніх взаємодій.

Статистичний аналіз одержуваних на кожному етапі результатів проводять у такій послідовності:

– визначаються вибіркові дисперсії за рядками матриці J^{VS}

9	16,8	19,254	25,44	27,646	27,64	26,02	24,86
10	19,6	22,054	28,24	28,24	26,6	24,97	24,97
11	32,9	32,9	32,9	32,9	31,25	29,63	28,47
12	19,0	19,0	25,186	27,392	25,75	25,75	24,59
13	21,4	21,4	27,586	29,792	29,72	28,16	27,0
14	21,9	24,354	24,354	24,354	24,35	24,35	23,20
15	22,8	25,254	25,254	27,460	27,46	25,83	25,83
16	24,7	27,154	27,154	27,5	27,5	25,87	24,7
s_j^2	20,55	16,960	6,672	4,877	4,198	3,263	2,843
$(s^2 - s_j^2)/s^2$	-	0,175	0,675	0,763	0,796	0,841	
Відносний внесок	-	17,5 %	50,0 %	8,8%	3,3 %	7,2 %	2%
Коеф-т. b_i	-	-1,227	-3,093	-1,103	0,821	0,815	0,582

На першому етапі аналізу, з діаграми розсіювання (тут не наведено) знаходяться внески кожного фактору E_{1i} , що визначаються величиною центрів зміщення змінних. (Слід мати на увазі, що частина параметрів комплексів, що характеризують криволінійний рух судна, на маневрі, що розглядається, "не працює"). Ці внески наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 Внески факторів у показник якості J_1

Фактори	E_1	E_2	E_3	R_V	R_N
q_2	-2,325	-2.30	-1.707	-2.260	0.45
q_3	-4.0	-0.319	0.827	-1.470	0.45
q_4	-0.375	0.313	0.354	-1.470	-0.45
q_5	5.075	0.780	1.148	2.260	0.45
q_6	-3.575	-2.617	-0.046	-1.470	0.45
q_7	0.275	-1.910	-1.047	-1.470	0.45
q_8	0.850	0.162	-0.205	-2.260	0.45
q_9	1.475	-0.710	-0.256	-1.470	-0.45
q_{10}	-4.450	-0.768	-0.671	-2.260	-0.45
q_{11}	0.625	0.036	0.629	2.260	0.45
q_{12}	-1.850	-0.278	-0.319	2.260	-0.90
q_{13}	-2.0	-0.478	0.031	-1.470	0.45
q_{14}	0.550	0.575	1.168	3.610	0.45
q_{15}	-0.875	2.193	-0.043	1.470	-0.45
q_{16}	-1.025	-0.386	-0.430	-2.260	-0.45
q_{17}	-4.0	0.026	-0.482	-2.260	-0.45
q_{18}	-3.750	-0.632	-0.533	-1.470	-0.45
q_{19}	-1.80	-1.775	-1.267	-2.260	0.45
q_{20}	-1.350	0.172	-0.281	-2.260	0.90
q_{21}	3.125	0.990	1.442	2.260	-0.45
q_{24}	3.025	2.386	-0.370	2.260	-0.45
q_{38}	-0.750	-1.288	-0.138	2.260	-0.45
q_{40}	-6.80	-0.025	-0.338	-1.470	-0.45
q_{45}	-4.225	-2.703	-2.108	-3.610	-0.45

На підставі результатів аналізу стовпця E_1 , виділено параметри q_{17} і q_{40} , що мають найбільші внески

Для кількісної оцінки виокремлених суттєвих чинників будується матриця повного факторного експерименту на два входи – табл. 7.4.

Статистичне опрацювання результатів розрахунків дає такі результати:

– порядкові дисперсії s_j^2 – див. у табл. 6.4;

– дисперсія відтворюваності одиничного рішення

$$s^2\{J_j\} = 7,554;$$

– дисперсія відтворюваності середнього значення

$$s^2\{J_{CP}\} = 2,014;$$

– дисперсія відтворюваності коефіцієнтів регресії

$$s^2\{b_i\} = 0,504.$$

Коефіцієнти регресії b_{17} і b_{40} істотних чинників q_{17} і q_{40} , які розраховуються за формулою (6.2), дорівнюють

$$b_{17} = -1,227; \quad b_{40} = -3,093.$$

Таблиця 7.4 Матриця повного факторного експерименту на два входи

q_{17}	q_{40}	Поєднання номерів	J_j	$J_{j \text{ CP}}$	s_j^2
-1	-1	3, 5, 7, 8, 11	22,6; 29,0; 23,6; 27,6; 32,9	27,180	17,552
+1	-1	14, 15, 16	21,9; 22,8; 24,7	23,133	2,043
-1	+1	2, 12, 13	17,6; 19,0; 21,4	19,400	3,360
+1	+1	1, 4, 6, 9, 10	16,9; 19,4; 19,8; 16,8; 19,6	18,540	2,408

При перевірці значущості коефіцієнтів регресії було прийнято величину довірчої ймовірності, що дорівнює 0.9. Число ступенів свободи $f=16-4=12$. Величина t з таблиці розподілу Стюдента $t=1,356$. Добуток $t \cdot s\{b_i\}=0,962$. Оскільки, $|b_{17}| > t \cdot s\{b_i\}$ і $|b_{40}| > t \cdot s\{b_i\}$, то обидва коефіцієнти - **значущі**.

На другому етапі зі стовпця J_1 виключаються, відповідно до співвідношення (7.4), ефекти від значущих чинників (у цьому разі – значущими є обидва чинники – q_{17} і q_{40}). Виходять стовпці J_1^{17} і J_1^{40} (див. табл. 7.2). Внески кожного фактору, після виключення ефектів від q_{17} і q_{40} , на другому етапі – E_{2i} – наведено в табл. 7.3.

Виокремленими факторами на даному етапі є – q_6 та q_{15} . Коефіцієнти регресії за цими факторами визначаються аналогічно тому, як це було зроблено на першому етапі: $b_6 = -1,103$; $b_{15} = 0,821$. Перевірка рівня значущості ($t \cdot s\{b_i\}=0,787$) дає підстави віднести і ці коефіцієнти до значущих.

На третьому етапі було виокремлено фактори q_2 і q_{45} . Однак, після перевірки рівня значущості ($b_2 = -0,354$; $b_{45} = -0,621$; $t \cdot s\{b_i\} = 0,796$), ці фактори відійшли до шумового поля, оскільки умова (7.10) не виконувалася.

Для виявлення ефектів взаємодій будується діаграма взаємодій або її "табличний" варіант для кожного фактору, за якою:

– визначаються максимальні ($J_{V \max}$) і мінімальні ($J_{V \min}$) значення чинників на верхньому рівні та максимальні ($J_{N \max}$) і мінімальні ($J_{N \min}$) значення чинників на нижньому рівні;

– розраховуються різниці

$$R_V = J_{V \max} - J_{N \max}; \quad R_N = J_{V \min} - J_{N \min}.$$

Результати розрахунків наведено в табл. 7.3.

Аналіз результатів розрахунків показує, що великі внески можуть дати поєднання:

$$Z_1 = q_5 q_{38}; \quad Z_2 = q_{19} q_{21}; \quad Z_3 = q_3 q_5; \quad Z_4 = q_5 q_{19};$$

$$Z_5 = q_{15} q_{40}; \quad Z_6 = q_{13} q_{40}; \quad Z_7 = q_6 q_{40}; \quad Z_8 = q_7 q_{40};$$

$$Z_9 = q_9 q_{40}; \quad Z_{10} = q_2 q_{10}; \quad Z_{11} = q_2 q_{16}; \quad Z_{12} = q_2 q_{17}.$$

Діаграма розсіювання для суттєвих взаємодій будується за даними табл. 6.5. За позитивні приймаються значення Z_i у тих рядках, де взаємодії чинників мають однакові знаки, а за негативні - де знаки різні.

Внески ефектів взаємодій E_Z наведено також у табл. 7.5. Аналіз наведених тут даних дає змогу виокремити дві суттєві взаємодії: Z_6 і Z_7 . Розрахунки (за наведеною вище методикою) і статистичний аналіз дають такі результати:

$$b_{Z_6} = 0,815; \quad b_{Z_7} = 0,582; \quad t \cdot s\{b_i\} = 0,563,$$

тобто обидва коефіцієнти а, отже, і обидва ефекти взаємодій - значущі.

Таблиця 7.5. Матриця ефектів взаємодій

Ефекти, експери- менти	Z 1	Z 2	Z 3	Z 4	Z ₅	Z 6	Z 7	Z 8	Z 9	Z 10	Z 11	Z 12
1	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+
2	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+
3	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
5	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-
6	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+
7	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+
8	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
9	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-
10	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
11	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
12	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
13	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
14	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+
15	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
16	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Вклади, E_Z	0,6	-	-	-	2,8	2,4	2,0	1,4	-	1,4	1,7	-

Ефекти взаємодій, виокремлені на черговому етапі, виявилися (як засвідчив статистичний аналіз) не значимими, що дало підстави віднести їх до шумового поля і на цьому **завершити процедуру** виявлення значущих чинників і значущих взаємодій **за критерієм J_1** .

Внески суттєвих чинників і суттєвих ефектів взаємодій у показник J_1 визначають таким чином:

– вибіркова дисперсія J показника якості матриці випадкового балансу (стовпця J_1 табл. 7.1) розраховується за формулою

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (J_r - \bar{J})^2, \quad (7.11)$$

де $\bar{J}$ – середнє значення показника;

– дисперсія показника в міру виключення значущих чинників

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (J_r^i - \bar{J}^i)^2; \quad (7.12)$$

– відносний внесок кожного фактору й ефекту взаємодій знаходиться виходячи зі співвідношення

$$\frac{s^2 - s_i^2}{s^2} \cdot 100\%. \quad (7.13)$$

Результати розрахунків за формулами (7.11)–(7.13) – відносні внески значущих чинників і ефектів взаємодій, а також коефіцієнти b_i моделей вигляду (7.1) – наведено в табл. 7.2.

Внески значущих чинників і ефектів взаємодій у показник J_1 (T) можна наочно подати у вигляді аналітичної залежності виду (6.1), або у вигляді гістограми

Методичне забезпечення

1. Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси: Конспект лекцій для підготовки магістрів зі спеціальності 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики»/ Укл. В.О.Яровенко – Одеса: ОНМУ, 2023 – 57 с. <https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1026>

2. Суднова електроенергетична система. Тренажер суднової електроенергетичної установки ERS 4000 “General Cfrgo” / Яровенко В.О., Машин В.М. / Методичні вказівки/ Одеса.: ОНМУ. 2021. – 66 с.

<https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1026>

3. Яровенко В.О., Букарос А.Ю., Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси: методичні вказівки до практичних занять з дисципліни / В.О. Яровенко, А.Ю. Букарос – Одеса.: ОНМУ. 2023 – 54 с. <https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1026>

4. Букарос А.Ю., Яровенко В.О. Розрахунок та моделювання перехідних процесів в суднових автоматизованих електроенергетичних системах. [методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи] / А.Ю. Букарос., В.О Яровенко - Одесса.: - ОНМУ. 2023 - 59 с.

<https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1026>

5. Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси: методичні вказівки до самостійної роботи для студентів спеціальності 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики» / В.О. Яровенко, О.І. Зарицька. – Одеса: ОНМУ, 2021. – 23 с. (Електронна бібліотека) <https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1026>

Рекомендована література

1. Яровенко В.О., Зарицька О.І. Суднові пропульсивні електроенергетичні комплекси. / В.О. Яровенко, О.І. Зарицька // Навчальний посібник. – Одеса: ОНМУ, 2023. – 214 с.

<https://onmu-moodle.od.ua/mod/resource/view.php?id=90328>

2. Криворучко Д.Ю. Технічна експлуатація електричного та електронного обладнання. Частина 1 / Д.Ю. Криворучко, В.І.Цацко // Навчальний посібник. – Одеса: ОНМУ, 2021. – 251 с. <https://doi.org/10.47049/ONMU-2021-NP5>

3. Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems / Hans Klein Woud, Douwe Stapersma /Published by IMarEST The Institute of Marine Engineering, Science and Technology /1 Birdcage Walk, London SW1H 9JJ, United Kingdom. 2016.– 503 P. **ISBN 978-0-956600-2-5**

4. An Introduction to Ship Automation and Control Systems / Alex Stefani / /Published by IMarEST The Institute of Marine Engineering, Science and Technology /1 Birdcage Walk, London SW1H 9JJ, United Kingdom, 2018. – 432 P. **ISBN 1-902536-47-9**

5. Budashko V.V. Ship’s power plants propulsion complexes: concepts, technologies, researching: Monograph/ V.V. Budashko / – Odessa - NU “OMA”, 2020. - 136 p

14. Інформаційні ресурси

1. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського URL: <http://www.nbuv.gov.ua> (дата звернення: 17.05.2023)

2. Електронна бібліотека - ОНМУ. URL: <https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1361> (дата звернення: 17.05.2023)