

Ліганенко В.В. Державний університет інфраструктури та технологій, старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті, м.Ізмаїл

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНОК СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ПРИ СПЕКТРАЛЬНОМУ АНАЛІЗІ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ

Постановка проблеми. Під спектральним аналізом розуміють вимірювальний процес або експериментальний аналіз спектрів сигналів за допомогою спеціальних вимірювальних приладів – аналізаторів спектра (або спектроаналізаторів). Такі прилади дозволяють визначити одну або декілька спектральних характеристик випадкових сигналів [1,2].

Мета дослідження – здійснити аналіз методів дослідження оцінок спектральної щільності потужності при спектральному аналізі випадкових сигналів.

Однією з найважливіших спектральних характеристик випадкових сигналів є СЩП, а при апаратурному аналізі – її оцінка [3]. Цим пояснюється те, що сучасні аналізатори спектра дозволяють проводити вимірювання оцінки СЩП випадкових сигналів.

Відомі методи спектрального аналізу можуть бути об'єднані у чотири взаємопов'язані групи [4]:

- метод, заснований на часовому усередненні квадрата фільтрованої реалізації досліджуваного випадкового сигналу $x(t)$ або так званий «фільтровий метод»;
- метод, що використовує усічене перетворення Фур'є оцінки кореляційної функції реалізації випадкового сигналу;
- метод, що використовує усереднення коефіцієнтів Фур'є реалізації випадкового сигналу по частотах;

– метод, заснований на часовому усередненні квадратів коефіцієнтів Фур'є реалізації випадкового сигналу. Проведемо аналіз цих методів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Показники якості

Різними методами дослідження (аналізу) оцінок спектральної щільності потужності випадкових сигналів (процесів) присвячено багато робіт [5]. Однак домінуючими серед використовуваних показників (і пов'язаних з ними критеріїв) є показники якості: незміщеність, спроможність і ефективність, а також відносна середньоквадратична похибка вимірювання оцінки СЦП, яка визначається виразом [6]:

$$\delta \hat{G}_x = \frac{D[\hat{G}_x]}{(M[\hat{G}_x])^2}, \quad (1)$$

де $D[\hat{G}_x]$ – дисперсія оцінки СЦП;

$M[\hat{G}_x]$ – математичне очікування оцінки СЦП.

Наведемо добре відомі за різними джерелами результати такого аналізу вказаних вище оцінок СЦП [5, 6].

Оцінка СЦП \hat{G}_1 є зміщеною. Причому, якщо смуга частот Δf вузько-смугового фільтра досить мала, то зміщенням оцінки можна знехтувати. При більш суворій оцінці зсуву запишемо наступне співвідношення для дисперсії СЦП G (з точністю до другого члена розкладання в ряд Тейлора):

$$D[\hat{G}_1(f)] = \frac{\hat{G}_1(f)}{T\Delta f} + \left[\frac{(\Delta f)^2}{24} \hat{G}_1''(f) \right]^2. \quad (2)$$

Як виходить із виразу (2), середньоквадратичне похибка оцінки СЩП прагне до нуля при $T \rightarrow \infty$ тільки за умови, якщо смуга частот Δf обрана так, що $\Delta f \rightarrow 0$ і $T\Delta f \rightarrow \infty$. Наприклад, якщо $\Delta f = \alpha T^{\beta-1}$, де $\alpha > 0$ і $0 < \beta < 1$. Отже, вибір параметрів Δf і T для методу безпосередньої фільтрації, при визначенні оцінки СЩП \hat{G}_1 по безперервної реалізації випадкового процесу, коли величини Δf і T кінцеві, вимагає компромісного рішення. Так, для підвищення точності вимірювань оцінки СЩП \hat{G}_1 , відповідно до виразу (1), необхідно зменшувати її дисперсію. Як виходить з рівності (2), при кінцевому, заданому, часу аналізу T збільшувати смугу пропускання Δf . Але збільшення Δf відповідає погіршення іншої найважливішої характеристики аналізаторів спектра – роздільної здатності. Отже, компроміс при синтезі параметрів фільтра для фільтрових аналізаторів спектра полягає в тому, щоб при заданому часу аналізу T вибрати смугу частот Δf , що задовольняє двом суперечливим параметрам: кореляційній функції, і оцінці $\hat{G}_3(f)$, яка одержувана методом, що використовує усереднення коефіцієнтів Фур'є (або перетворення Фур'є).

Для нормальних стаціонарних процесів не існує межі оцінок $\hat{G}_2(f)$ і $\hat{G}_3(f)$ в середньому квадратичному. Це обумовлено тим, що функція $A(j\omega)$, на якій будуються оцінки СЩП $\hat{G}_2(f)$ і $\hat{G}_3(f)$, є випадковою функцією частоти f (або ω). Вона, аналогічно випадковій функції часу $x(t)$, змінюється випадковим чином близько деякого свого математичного очікування та має дисперсію, яка зі збільшенням часу аналізу T не прагне до нуля, тобто збільшення часу аналізу не дозволяє досягти бажаної статистичної точності. Тому безпосереднє використання точкових оцінок СЩП $\hat{G}_2(f)$ і $\hat{G}_3(f)$ в аналізаторах спектра не є виправданим, можна навіть сказати коректним, і вони не знайшли широкого поширення в апаратному спектральному аналізі.

При згладжуванні (усередненні) оцінки $\hat{G}_3(f)$ порівняно невеликому інтервалу частот отримують адекватні оцінки СЩП з деяким зміщенням, але вони цілком придатні для вимірювання оцінки СЩП.

Іншим способом поліпшення оцінки СЩП $\hat{G}_3(f)$ є усереднення періодограми за декількома незалежними реалізаціями, що вище віднесено до методу апаратурного спектрального аналізу, заснованому на тимчасовому усередненні квадратів коефіцієнтів Фур'є. Тоді оцінку $\hat{G}_4(\omega)$ можна прийняти за оцінку СЩП на частоті, розташованій в центрі інтервалу усереднення. При цьому зміщенням нової оцінки можна знехтувати, дисперсія ж її при збільшенні часу аналізу T прагне до нуля. Однак досягається цей ефект за рахунок ускладнення апаратурної реалізації та збільшення часу вимірювання.

2. Методи підвищення періодограмних оцінок СЩП

Для поліпшення періодограмних оцінок СЩП використовуються різні методи згладжування, зокрема методи Даньєла, Бартлетта і Уелча. Ці методи згладжування оптимальні для певних умов, але вони статистично стійкі (і працездатні) для багатьох класів сигналів. Однак застосування методів згладжування призводить, по-перше, до погіршення роздільної здатності (за рахунок розширення головної пелюстки АЧХ фільтра) без будь-якого компенсуючого зменшення дисперсії оцінки СЩП і, по-друге, до суттєвого ускладнення апаратурної реалізації.

Таким чином, фільтровий метод, або метод безпосередньої фільтрації, відрізняючись найбільшою простотою апаратурної реалізації, не поступається за показниками якості іншим методам апаратурного спектрального аналізу, якщо не вживати спеціальних заходів для їх поліпшення, що призводить до ускладнення апаратурної реалізації цих методів і збільшення часу вимірювання.

У той же час весь досвід розвитку техніки апаратурного аналізу випадкових процесів показує, що ускладнення закладаються в його основу методів без відповідного технічного вдосконалення самої апаратури не

призводить до скільки-небудь позитивних результатів, так як отримана додаткова інформація про характеристики процесу втрачається [8]. Саме тому відносно прості методи апаратного аналізу випадкових процесів, в тому числі фільтровий апаратний аналіз, розвивалися найбільш динамічно та доведені до певного ступеня досконалості.

Таким чином, результати проведеного аналізу відомих методів дослідження оцінок СЦП ще раз підтверджують необхідність подальшого вдосконалення фільтрового методу спектрального аналізу. Це перший висновок даного параграфа.

Інший висновок полягає в тому, що у відомій літературі немає єдиного, узагальненого показника для порівняльного аналізу оцінок СЦП по точності та науково-обґрунтованого вибору оцінок СЦП за критерієм оптимальності для цього узагальненого показника. Дане питання постійно піднімається в наукових публікаціях [8]. Перевага віддається методам (і показникам) теорії статистичних рішень, які є найбільш адекватними для визначення граничної точності вимірювання (оцінки) характеристик випадкових сигналів. В даний час теорія статистичних рішень найбільшою мірою розвинена стосовно синтезу оптимальних вимірювачів параметрів детермінованих сигналів на тлі перешкод і до аналізу їх характеристик точності [9].

У теорії статистичних рішень в загальному вигляді, завдання оцінки параметрів випадкових процесів зводиться до визначення деякого багатовимірного параметра на основі обробки реалізації, що спостерігається [9].

Залежно від вимог, що пред'являються до процесу оцінки і до самих оцінок параметрів випадкових сигналів, можливі різноманітні методи оцінювання. При цьому кожна оцінка, в тому числі оцінка СЦП, характеризується своїми показниками якості, які в більшості випадків вказують міру близькості тієї чи іншої оцінки до істинного значення оцінюваного параметра. Показник якості, в свою чергу, визначається вибором критерію

оцінки. Тому, перш ніж побудувати (визначити) будь-яку оцінку, потрібно вибрати критерій оцінки. Як показано в [10], найбільш достовірними є критерії теорії статистичних рішень, що забезпечують мінімальні похибки, яка нас цікавить параметра випадкового процесу. У такій ситуації найбільш повні відомості про можливі значення параметра (оцінки СЦП) даються апостеріорною щільністю ймовірностей, яка є умовною щільністю ймовірностей параметра в тому випадку, якщо прийнята дана реалізація, а точніше, умовна щільність ймовірностей вихідних даних $\{x(t)\}$, що розглядається як функція оцінювання параметра випадкового процесу, зокрема СЦП. Саме ця функція, звана також функцією правдоподібності, використовується в подальшому при отриманні узагальненої математичної моделі точкових оцінок СЦП, що визначають відповідні методи апаратного спектрального аналізу.

Відомо кілька підходів до завдання вимог про необхідні властивості точкових оцінок. До основних із цих властивостей слід віднести [11]:

- умовна щільність ймовірності даної точкової оцінки повинна бути згрупована якомога тісніше навколо значення цієї оцінки;
- оцінка повинна бути незміщеною та ефективною;
- оцінка повинна бути достатньо статистичною, тобто такою, коли всі судження про передбачені параметри можуть бути винесені на підставі цієї статистики без додаткового звернення до реалізації прийнятих даних.

Апостеріорна ймовірність, або функція правдоподібності, завжди є достатньою статистикою. Функція правдоподібності при фіксованій вибірці $\{x(t)\}$ показує, наскільки одне можливе значення оцінки СЦП, отримане будь-яким апаратним методом, «більш правдоподібно», ніж інша оцінка СЦП. Удосконалені апаратні методи спектрального аналізу випадкових сигналів пропонується використовувати при контролі технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

3. Обґрунтування методів удосконалення фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів

Основним елементом фільтрових аналізаторів спектра є вузько-смуговий фільтр, який в значній мірі визначає їх характеристики. Звідси природною виглядає вимога вдосконалення методів фільтрації. Розробці та дослідженню методів фільтрації присвячена велика кількість робіт [12]. В даний час в аналізаторах спектра використовуються активні вузько-смугові фільтри [12, 13], які повинні володіти в ідеалі прямокутною ФСВ або АЧХ. Однак відомо, що ідеальний фільтр фізично (апаратно) не реалізуємо, так як його імпульсна характеристика повинна змінюватися в діапазоні від $t = -\infty$ до $t = +\infty$ [13, 14].

Для наближення реальної АЧХ до ідеальної або збільшують порядок фільтра, що ускладнює синтез його параметрів і схемну реалізацію, або використовують різні способи апроксимації ФСВ.

Найбільшого поширення знаходять так звані поліноміальні фільтри, зокрема фільтри Баттерворта, Чебишева, інверсний Чебишева, Кауера (еліптичний), Бесселя, відмінність яких один від іншого полягає в різному підході до вибору показників апроксимації [13, 15]. Так, критерієм для фільтра Баттерворта є максимальна площа або максимальна гладкість ФСВ.

Фільтр Чебишева має АЧХ, яка в смузі пропускання характеризується пульсаціями однакової амплітуди, тому його називають фільтром рівнохвильових пульсацій. За межами смуги пропускання АЧХ цього фільтра монотонно зменшується, причому крутість спаду АЧХ в цій області у фільтра Чебишева більше, ніж у фільтра Баттерворта такого ж порядку.

Інверсний фільтр Чебишева має АЧХ, яка монотонно змінюється в межах смуги пропускання і пульсує в смузі загородження.

Фільтр Кауера (еліптичний фільтр) має АЧХ, пульсуючу і в смузі пропускання, і в смузі загородження. Порівняно з усіма іншими типами фільтрів він забезпечує найбільш крутий спад АЧХ при переході від смуги пропускання до смуги загородження.

При цьому для фільтрів Чебишева, інверсного Чебишева і Кауера АЧХ залежить не тільки від порядку фільтра, але і від прийнятих параметрів, що визначають пульсації АЧХ.

Фільтри, які характеризуються більш крутим спадом АЧХ в перехідній смузі, мають зазвичай більший час встановлення вихідного сигналу при стрибкоподібній зміні вхідного сигналу.

Фільтр Бесселя відрізняється від описаних вище фільтрів тим, що має хорошу фазочастотну характеристику та забезпечує найкраще наближення реальної АЧХ до ідеальної лінійної залежності.

Таким чином, відомі способи апроксимації ідеальної АЧХ фільтрів застосовні тільки для поліпшення окремих часткових показників їх частотних характеристик. Однак жоден з цих показників не є інтегральним і не використовує головного для аналізаторів спектра критерію – мінімуму двох найважливіших складових методичної похибки вимірювання оцінки СЦП. Така похибка, одержувана із застосуванням даного фільтра, залежить від:

- похибки апроксимації АЧХ в смузі пропускання фільтра;
- похибки, що вноситься бічними пелюстками (пульсаціями) АЧХ поза смуги пропускання (у смузі загородження).

Ці пульсації АЧХ фільтра поблизу точок розриву (як в смузі пропускання, так і поза нею), звані ефектом (явищем) Гіббса, викликаються урізанням частотного спектра сигналу [13, 16].

Для зменшення впливу пульсацій АЧХ, а отже, підвищення точності аналізаторів спектра, широко використовуються вагові вікна (windowing). Запропоновано та застосовується велика кількість (каталог) вагових вікон (функцій вікна): прямокутне, або вікно Діріхле; трикутне, або вікно Барттлета; вікна Ханна, Хеммінга, Блекмана, Блекмана-Херріса, Рісса, Рімана, Парзена, Наттола, Бома, Гаусса, Дольфа-Чебишева, Кайзера-Бесселя, Барсілона-Темешем тощо [14, 17].

Вибір вагових вікон для спектрального аналізу здійснюється, в основному, за двома групами показників:

- по характеристикам ширини смуги пропускання головної пелюстки АЧХ фільтра на певному рівні, наприклад половинній потужності;

- по характеристикам бічних пелюсток АЧХ фільтра, серед яких найчастіше використовується два показники:

- а) піковий (або максимальний) рівень бічних пелюсток, який дозволяє судити про те, наскільки добре вікно пригнічує просочування потужності сигналу, що фільтрується;

- б) швидкість спаду рівня бічних пелюсток, особливо найближчих до головного пелюстка ФСВ.

Для ілюстрації в таблиці 1 наведені характеристики деяких, досить поширених при спектральному аналізі вагових вікон.

Таким чином, вагові вікна дозволяють поліпшити і навіть отримати оптимальне значення одного із зазначених вище показників ФСВ фільтра. Однак серед відомих вагових вікон немає таких, які б забезпечували мінімум наведених похибок вимірювання оцінок СЦП.

Таблиця 1

Характеристики вагових вікон

Вікно	Максимал. рівень бокових пелюсток, дБ	Асимптотична швидкість падіння бокових пелюсток, дБ	Еквівалентна ширина смуги	Ширина смуги за рівнем половинної потужності
Прямокутне	– 13,3	– 6	1,00	0,89
Трикутне	– 26,5	– 12	1,33	1,28
Ханна	– 31,5	– 18	1,50	1,44
Хеммінга	– 43	– 6	1,36	1,30
Наттола	– 98	– 6	1,80	1,70
Гауссовске	– 42	– 6	1,39	1,33
Кайзера	– 50	0	1,39	1,33

З наведеного вище аналізу робимо висновок, що вузько-смугові фільтри для спектрального аналізу вимагають постановки і розв'язання принципово нових завдань щодо їх удосконалення. Такими завданнями (і напрямками удосконалення фільтрації) в даній роботі є:

- розробка методу оптимізації АЧХ фільтра по мінімуму похибки апроксимації у вимірюванні оцінок СЦП фільтровими методами;
- розробка методу оптимізації АЧХ по мінімуму впливу бічних пелюсток на точність вимірювання оцінки СЦП фільтровими методами.

Розробка цих методів оптимізації є першим напрямком удосконалення фільтрових методів спектрального аналізу, досліджуваним в роботі. Інший, принципово новий напрямок вдосконалення фільтрових методів спектрального аналізу пов'язано з дослідженням можливості застосування вузько-смугових динамічних фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів при контролі технічного стану засобів водного транспорту.

Застосування традиційних методів синтезу смугових фільтрів для апаратурної реалізації ФСВ пов'язано з великими теоретичними та технічними труднощами, що обумовлено високим порядком смугових фільтрів, а, отже, і великим числом елементів, необхідних для їх побудови [12, 18]. Особливо це відноситься до фільтрів низького та інфранизького діапазонів частот. Ускладнення смугових фільтрів неминуче веде до погіршення надійності та ускладнення експлуатації контрольно-вимірювальної апаратури спектрального аналізу.

Це обумовлено тим, що для забезпечення необхідних характеристик точності цієї апаратури необхідно проведення додаткових операцій з її налаштування та перевірку працездатності як у ході їх підготовки до застосування, так і при експлуатації. Крім того, ускладнення технічних об'єктів і розширення різних заходів щодо забезпечення їх надійності призводить до збільшення витрат на розробку, виготовлення та експлуатацію контрольно-вимірювальної апаратури спектрального аналізу.

У зв'язку з цим актуальним є завдання пошуку нових шляхів (підходів, можливостей) реалізації оптимальних АЧХ методів фільтрового аналізу, що дозволяють при заданих точності та достовірності вимірювання СЩП спростити апаратурну реалізацію аналізаторів СЩП, що, в свою чергу, призведе до підвищення їх надійності.

Одним з можливих шляхів вирішення цього завдання є використання для побудови аналізаторів СЩП динамічних (нестационарних, тих, що перебудовуються) фільтрів малих порядків [13, 19]. Пояснимо їх фізичну суть.

Форма АЧХ фільтра, особливо низьких порядків, далека від ідеальної. Однак, якщо при постійному коефіцієнті передачі фільтра змінювати в часі частоту настройки (аналізу) і коефіцієнт загасання фільтра в функції часу, то при певному виборі законів перебудови цих параметрів можна отримати необхідну точність апроксимації ідеальної, прямокутної функції спектрального вікна (рис. 1) [14, 20].

Найважливішою особливістю таких фільтрів є, як виходить з рисунку 1, те, що коефіцієнт загасання фільтра змінюють так, щоб його найбільше значення відповідало середині смуги пропускання фільтра (тобто на центральній частоті ω_0), а найменше - значенню країв цієї смуги (тобто при

$$\omega_0 - \frac{\Delta\omega}{2} \text{ і } \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}).$$

Звідси актуальним є завдання визначення оптимальних законів зміни параметрів динамічного фільтра, які забезпечують, при заданій дисперсії оцінки СЩП, мінімальну похибку апроксимації ідеальної ФСВ. Для вирішення цього завдання, перш за все, необхідно отримати вихідні співвідношення, які зв'язують статистичні характеристики оцінок СЩП із характеристиками динамічного фільтра.

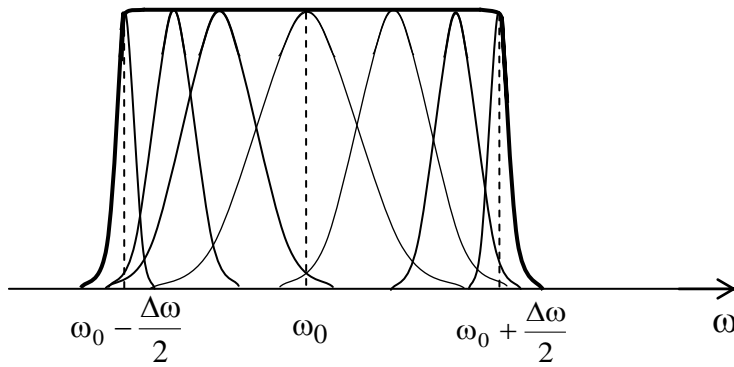


Рисунок 1 – Формування необхідної АЧХ за допомогою динамічного фільтра

Як виходить із введеного поняття динамічного фільтра, на відміну від класичного, традиційного фільтра, який є статичним, він працює в перехідному режимі. Методи синтезу статичних фільтрів добре розроблені та засновані на теорії чотиріполіусників [21].

Однак ці методи не можна застосовувати для динамічних фільтрів, для яких необхідно використовувати методи розрахунку електричних ланцюгів в перехідних режимах [22]. Тому одним з найважливіших завдань роботи є удосконалення методів синтезу динамічних фільтрів для спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

Висновки. Узагальнюючи і конкретизуючи напрями та задачу дослідження, сформулюємо такі часткові завдання дослідження, які в сукупності складають науково-технічну задачу удосконалення фільтрових методів спектрального аналізу випадкових сигналів для контролю технічного стану двигунів засобів водного транспорту.

1. Аналіз сучасного стану методів вимірювання оцінок СЩП випадкових сигналів. Вибір і обґрунтування напрямків дослідження та постановка часткових завдань дослідження.

2. Розробка узагальненої математичної моделі оцінок СЩП для апаратурних методів спектрального аналізу.

3. Розробка методу множення вимірювання оцінки СЩП випадкових сигналів.

4. Дослідження та порівняння різних методів апаратурного спектрального аналізу випадкових сигналів за допомогою розробленої математичної моделі оцінок СЩП, виявлення серед них оптимальних за критерієм максимуму функції правдоподібності.

5. Отримання аналітичних виразів для математичного очікування та дисперсії оцінок СЩП, які необхідні для оптимізації форми АЧХ вузько-смугових фільтрів для спектрального аналізу.

6. Проведення порівняльного аналізу результатів оптимізації АЧХ за критеріями мінімуму середньоквадратичної похибки апроксимації і мінімуму впливу бічних пелюсток ФСВ.

7. Проведення моделювання АЧХ динамічного фільтра методу вимірювання оцінки СЩП для двох окремих законів зміни характеристик фільтра в процесі вимірювання параметрів двигуна засобу водного транспорту.

У результаті аналізу методів дослідження оцінок СЩП обґрунтовано необхідність розробки узагальненої математичної моделі оцінок СЩП на основі теорії статистичних рішень, з використанням умовної щільності ймовірностей (або функції правдоподібності).

Список літератури

1. Мелещенко Ю.С. Техніка й закономірності її розвитку. К.: Наука, 2005. 176 с.

2. Мельник Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса СИМАС 2013). Двигателестроение. 2013. № 3. С. 39–53.

3. Мельник Г.В. Развитие среднеоборотных дизелей. Двигателестроение. № 1 (239). 2010. С. 41–53.

4. Мирошник И.В., Никифоров А.Л., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. С-Пб.: Наука, 2000. 549 с.
5. Морозов А.А., Яценко В.А. Ситуационные центры – основа стратегического управления. Математические машины и системы. 2003. № 1. С. 3–14.
6. Морозов А.А., Кузьменко Г.Е. Построение сценариев развития событий-основа функционирования информации на аналитических системах типа ситуационные центры. С-Пб., 2005. С. 42–44.
7. Неймарк Ю.И. Простые математические модели и их роль в постижении мира. Сорровский образовательный журнал. 1997. № 3. С. 139–143.
8. Новицкий П.В., Зограф И.В. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1985. 245 с.
9. Овсянников М.К., Петухов В.А. Судовые автоматизированные энергетические установки. М.: Транспорт, 1989. 256 с.
10. Овсянников М.К. Петухов В.А. Судовые дизельные установки: справочник. Л.: Судостроение, 1986. 424 с.
11. Малиновский М.А., Фока А.А., Ролинский В.И. Обеспечение надежности судовых дизелей на эксплуатационных и особых режимах работы. Одесса: Феникс, 2007. 152 с.
12. Основы автоматизации измерений / под ред. В.Б. Коркина. М.: Издательство стандартов, 1991. 253 с.
13. Пахомов Ю.А. Судовые энергетические установки с двигателями внутреннего сгорания. М.: ТрансЛит, 2007. 528 с.
14. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока. *Новости ЭлектроТехники*. 2005. № 1(31). С. 50–52.
15. Поспелов Д.А. Ситуационное управление и практика. М.: Наука. 1986. 288 с.

16. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений. К.: Наукова думка, 1980. 419 с.
17. Пухов Г.Е. Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных T-преобразований. К.: Наукова думка, 1988. 216 с.
18. Пярнпуу А.А. Программирование на современных алгоритмических языках. М.: Наука, 1990. 384 с.
19. Ричард А. Кейхилл. Столкновения судов и их причины / пер. с англ. М: Транспорт, 1987. 240 с.
20. Сборник резолюций Международной морской организации по вопросам судоходства. М.: В/О Мортехинформреклама, 1989. 68 с.
21. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2006. 751 с.
22. Сизых В.А. Судовые энергетические установки. М.: РКонсульт, 2002. 264 с.