

001-70  
Ф55

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

О.О. Філоненко, В.Ю. Бережний, М.М. Кудін

АНАЛІЗ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ  
ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Навчальний посібник

Научно-техническая  
библиотека  
"ХАИ"



mt0109413

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНА  
БІБЛІОТЕКА**  
Національного аерокосмічного  
університету ім. М.Є.Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

Харків «ХАІ» 2009

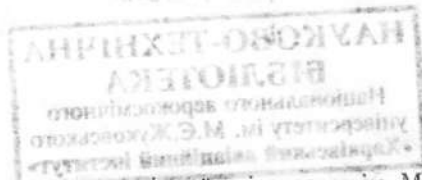
Філоненко О.О. Аналіз сигналів датчиків при випробуваннях газотурбінного двигуна : навч. посіб. / О.О. Філоненко, В.Ю. Бережний, М.М. Кудін. — Х. : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2009. — 36 с.

Викладено методику щодо загального порядку комп'ютерного аналізу сигналів датчиків при випробуванні ГТД. Розглянуто застосування кореляційного, спектрального, кепстрального й статистичного аналізу за допомогою популярної програми MATLAB та її безкоштовного аналога OCTAVE. Відображено особливості аналізу нестационарних сигналів, побудову спектрограм, застосування вейвлет-аналізу.

Для студентів, що вивчають курси "Комп'ютерне оброблення результатів випробувань" та "Експериментальні методи дослідження ЛМ і ГТД". Може бути використано при виконанні спецчастин дипломного проекту.

Лл. 24. Бібліогр.: 8 назв

Рецензенти: канд. техн. наук В.І. Рубльов,  
канд. техн. наук В.Є. Спіцин



## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Цифровий запис сигналів датчиків відрізняється від реальних сигналів. Необхідно виконати деякі умови, щоб цей запис можна було аналізувати замість сигналів.

1. У пам'яті комп'ютера сигнали датчиків зберігаються у вигляді миттєвих величин, записаних у деякі моменти часу й перетворених у числа. Величина, протилежна затримці між моментами часу, — це частота дискретизації. Сигнал не повинен містити складових, що змінюються з частотою, більшою за половину частоти дискретизації, інакше запис не буде відображати форму реального сигналу. Щоб це гарантувати, сигнал пропускають через електронний фільтр низьких частот.
2. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) робить з миттєвої величини сигналу цифровий код. Чим менша кількість розрядів отриманого коду, тим більша похибка квантування. Якщо вона є великою, то дрібні деталі сигналу можна втратити. Зазвичай АЦП бувають 6-, 8-, 16- і 24-розрядними. Проблеми з похибкою квантування зникають уже в 16-розрядних АЦП.

Запис сигналів датчиків має різні формати. Їх можна розподілити на дві групи.

Перша група — записи у сирому вигляді — послідовність двійкових паралельних або двійково-десяткових (BCD) кодів. Якщо дані знаходяться у сирому вигляді, то найбільш розповсюдженими є засоби імпорту звукових (.wav) файлів. Файли у форматі .raw припускають використання окремих звукових редакторів (наприклад Audacity) і програм для візуалізації даних. У цьому випадку може виникнути необхідність у написанні спеціальної програми для перетворення формату даних.

Друга група — записи у вигляді кодів ASCII, де цифри вже знаходяться у символічному вигляді. Коди ASCII можна відразу імпортувати в більшість програм оброблення даних. Бажано, щоб цифри були розташовані у стовпчик.

На першому етапі оброблення сигналу необхідно вміти маніпулювати цифровими записами сигналу: перетворювати формати, вирізувати частини довгих записів, переглядати їх у графічному вигляді, імпортувати записи в програми, що призначені для аналізу даних.

Не існує якого-небудь загальноприйнятого порядку аналізу сигналів —

усе залежить від мети аналізу й властивостей даних, однак можна дати загальні рекомендації, що дозволять уникнути грубих помилок. Мета аналізу визначається практичною необхідністю, наприклад: дослідити характеристики небезпечних вібрацій двигуна, потім знайти джерело цих вібрацій. Залежно від вибраної мети знаходять види аналізу. Наприклад, для пошуку періодичних складових застосовують кореляційний аналіз, для визначення їхніх характеристик — спектральний, для пошуку лунки, що є в записі сигналу, — кепстральний, для дослідження пульсаційних складових, які виникають і зникають під час запуску двигуна, — короткочасне перетворення Фур'є і вейвлет-аналіз, а для визначення характеристик випадкової складової — статистичний аналіз. Розподілення сигналу на такі складові є умовним, воно не існує насправді, однак допомагає уявити структуру сигналу й проаналізувати причини, що визначають його форму. Один із варіантів класифікації складових сигналу зображено на рис. 1, інші можна знайти в роботах [1–3].



Рис. 1. Класифікація сигналів

*Детерміновані складові* точно описати можна математичною функцією, використовуючи при цьому математичний апарат інтерполяції й апроксимації, розкладання в ряди.

*Випадкова складова* цілком визначається функцією розподілу щільності ймовірності. Форму цієї функції можна описати шляхом використання методу моментів Чебишева.

Періодичні складові найчастіше породжуються обертанням. Наприклад, у двигуні обертається ротор, при цьому його дисбаланс породжує періо-

дичні вібрації. Якщо вібрації мають в загальному випадку більш складну форму, ніж синусоїда, однак породжуються обертанням одного ротора, — така складова сигналу називається *гармонійною*. Найнижча частота, що є у гармонійному сигналі, називається *фундаментальною*, інші частоти одержують шляхом множення її на ціле число. Вони мають назву *гармонік*. Якщо обертається кілька роторів, то породжуються *полігармонійні* складові. Це просте накладення (суперпозиція) гармонійних сигналів.

Для тестування обладнання й методів оброблення застосовують *псевдовипадкові* сигнали з дуже низькою фундаментальною частотою, однак це все ж таки періодичні сигнали.

Універсальним математичним апаратом аналізу періодичних складових є *перетворення Фур'є*. Спеціальний алгоритм такого перетворення — *швидке перетворення Фур'є (FFT)*, що є основою для більшості комп'ютерних програм спектрального й кореляційного аналізу даних.

Якщо сигнал отримано шляхом змішування періодичних складових, частоти яких відносяться як ірраціональні числа, то він може мати "періодичний" вигляд, але нульову фундаментальну частоту. Цей сигнал має назву *квазіперіодичного* сигналу.

Розповсюдженим видом неперіодичної складової є *тренд* — складова, що плавно змінюється за час спостереження. Така складова може породжуватися, наприклад, нагріванням приладів на початку роботи. Однак немає чіткої межі між трендом і періодичною складовою. Іноді те, що на перший погляд здається трендом, насправді може бути маленькою частинкою періодичної складової. Додаткову інформацію про це можна знайти в [4].

Складова сигналу може одноразово виникати й зникати під час роботи двигуна. Так, при запуску виникають зривні явища в компресорі, які у свою чергу можуть викликати небезпечні вібрації конструкції. Однак при спрацьовуванні протипомпажної автоматики ці явища зникають. Така складова є короткочасною, й аналізувати її за допомогою необмежених функцій (синусоїд) незручно. У такому разі застосовують спеціальні обмежені функції — *вейвлет* (малі згасаючі хвилі) [5].

При дослідженні випадкових складових виконують кореляційний, спектральний аналіз і аналіз розподілу щільності ймовірності із застосуванням методу моментів Чебишева. Випадкові сигнали можуть бути унікальними (*неергодичними*), і тоді необхідно, якщо це можливо, створити умови для їх багаторазового повторення. Кожне таке повторення має назву *реалізація*, а декілька реалізацій — *ансамбля реалізацій*. Характеристики таких скла-

дових визначають "за ансамблем", використовуючи значення реалізацій в однакові моменти часу. Для *ергодичної* складової момент часу не має значення, тому записувати такий сигнал можна "на прохід" і визначати характеристики за сусідніми точками однієї реалізації [1].

Крім аналізу одного запису датчика часто застосовують спільний аналіз записів для визначення взаємозв'язку сигналів, шляхів їх розповсюдження, властивостей трактів розповсюдження й відбиваючих поверхонь. При цьому використовують функції когерентності, взаємні кореляційні функції, розподіли щільності ймовірності й спектри. Інформацію про спільний аналіз записів датчиків наведено в [2]. У загальному випадку сигнал можна розглядати як просторово-часовий і визначати його відносно до записів ґрат датчиків [6].

Метою цього завдання є аналіз окремої реалізації сигналу згідно з таким порядком:

- попереднє оброблення даних;
- аналіз і вилучення тренду;
- пошук періодичних складових;
- визначення характеристик періодичних складових;
- розроблення цифрового фільтра для вилучення періодичних складових;
- аналіз випадкової складової.

Цей порядок застосовується до штучно сгенерованого сигналу. Сигнал генерується шляхом додавання постійної, логарифмічної, однієї-двох гармонійних і випадкової складових з різними параметрами. Логарифмічна складова генерується з використанням залежностей  $1 - k \cdot \log(x)$  і  $k \cdot \log(x)$ , гармонійні складові — з використанням залежності  $k_1 \cdot \cos(k_2 \cdot x + k_3)$ . Випадкова складова може бути нормальною, логарифмічно нормальною, рівномірною або з розподілом Вейбулла. Відношення сигнал/шум можуть бути різними. Результатом виконання завдання має бути правильний висновок про характер складових.

На другому етапі аналізуються ділянки реальних стаціонарного або нестационарного сигналів датчика, які записані при запуску, зупинці або холодному прокручуванні двигуна. Тут додатково потрібно застосувати нестационарні методи аналізу — побудування спектрограми й проведення вейвлет-аналізу.

Внаслідок виконання завдання студенти мають зрозуміти такі поняття, як тренд, кореляція, спектр, кепстр, вейвлет-перетворення, метод моментів Чебишева в аналізі випадкових сигналів, набути навичок із застосування функцій програм OCTAVE (MATLAB) при виконанні статистичного, кореляційного, спектрального, кепстрального й вейвлет-аналізу, сформулювати уявлення щодо призначення, характеристики й побудови цифрових фільтрів, але найважливіше — робити правильні висновки за результатами різних видів аналізу.

## 1 АНАЛІЗ ЗАПИСУ СИГНАЛУ В MATLAB

Під час запуску MATLAB відкриваються три основних вікна (рис. 2): командне вікно (COMMAND WINDOW), робоча область (WORKSPACE) та історія виконання команд (COMMAND HISTORY). У лівому нижньому куті розташована кнопка START для запуску підпрограм MATLAB.

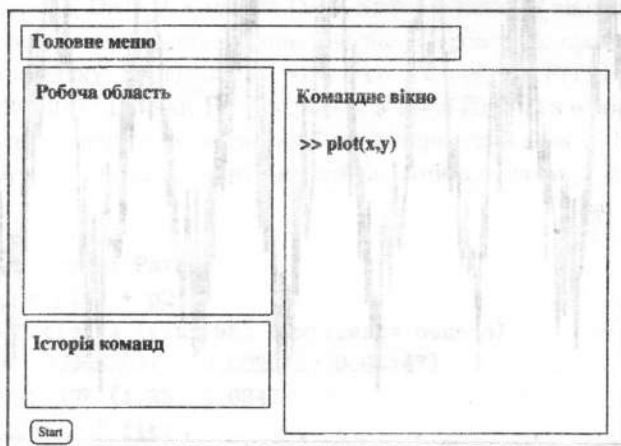


Рис. 2. Видгляд віконного інтерфейсу MATLAB

У MATLAB можна набирати команди у командному вікні або працювати з використанням віконного інтерфейсу (на це орієнтовано й більшість його підпрограм, так званих *пакетів*), тоді всі дії будуть виконуватися за допомогою миші. Набори цих команд можна готувати в спеціальному текстовому редакторі, зберігати у файлах у вигляді *скриптів* із розширенням *.m* та запускати їх на виконання з командного вікна.

Повернутися до недавніх команд можна за допомогою стрілок на додатковій клавіатурі, а до більш ранніх — через вікно історії команд.

У вікні робочої області знаходяться змінні. Працювати з ними можна з допомогою контекстного меню, що з'являється при натисканні правої кнопки миші.

### 1.1 Імпорт в робочу область MATLAB

В основному меню виберемо FILE-IMPORT DATA... Значок змінної виникне у вікні робочої області. Для того щоб побудувати графік сигналу, скористаємося функцією *plot* (рис. 3).

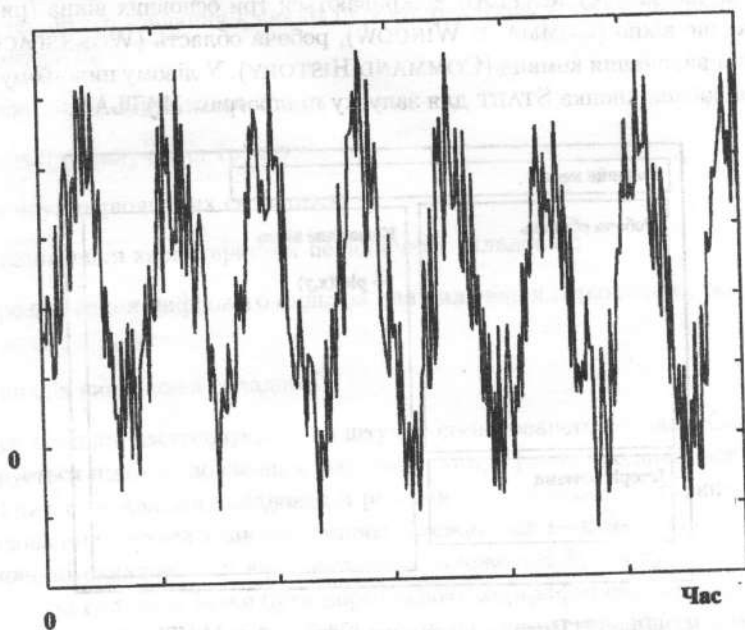


Рис. 3. Запис сигналу

Ім'я, що змінна одержує при імпорті, зазвичай збігається з ім'ям файлу. Його можна змінити в командному вікні:

```
a=signal;
```

Крапка з комою наприкінці рядка зупиняє виведення на екран.



## 1.2 Аналіз і вилучення тренду

*Trend* — це плавне збільшення або зменшення величини сигналу під час спостереження.

Для визначення наявності тренду проведемо між відліками сигналу пряму за методом найменших квадратів (так, щоб сума квадратів відстаней від відліків до прямої була мінімальною). Для цього скористаємося підпрограмою MATLAB *Curve Fitting Tool*. Вектор ординат — це сигнал, а вектор абсцис потрібно сформувати:

```
x=(1:300)';
```

Тут вектор-рядок формується таким чином:

```
початок:шаг:кінець
```

Апостроф транспонує рядок у стовпець. Якщо шаг дорівнює одиниці, то його можна не вказувати. Тепер задамо дані з допомогою меню: DATA — X DATA — Y DATA — CREATE DATA SET — CLOSE. У вікні підпрограми виникне зображення відліків запису сигналу. Проведемо пряму — поліном першого порядку: FITTING... — NEW FIT — TYPE OF FIT: POLYNOMIAL — POLYNOMIAL: LINEAR POLYNOMIAL. У вікні RESULTS виникне рівняння проведеної прямої та статистичні характеристики моделі. Коефіцієнти прямої будуть подані з довірчими інтервалами для заданої довірчої ймовірності:

```
Linear model Poly1:
```

```
f(x) = p1*x + p2
```

```
Coefficients (with 95% confidence bounds):
```

```
p1 = -0.0007037 (-0.002877, 0.00147)
```

```
p2 = 2.307 (1.93, 2.684)
```

```
Goodness of fit:
```

```
SSE: 817.7
```

```
R-square: 0.001361
```

```
Adjusted R-square: -0.00199
```

```
RMSE: 1.656
```

Така пряма, що побудована для даних, де кожному  $x$  відповідає кілька  $y$ , має назву *прямої регресії* (рис. 4).

*Пряма регресії* відбиває лінійний кореляційний зв'язок між  $x$  та  $y$ .

Поняття кореляційного зв'язку є основним в аналізі сигналів.

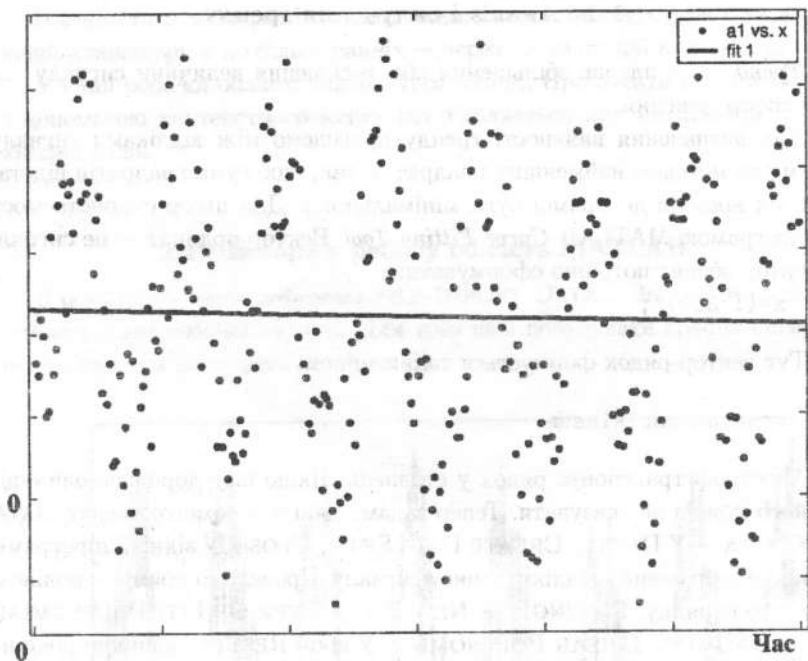


Рис. 4. Пряма регресії

*Кореляційний зв'язок* — це статистичний (а не строго функціональний) зв'язок між двома величинами, що має ймовірнісний характер. Якщо кореляції немає, то величини не зв'язані одна з одною, якщо кореляція максимальна, то це не випадковий функціональний зв'язок.

*Для підвищення якості спектрального й кореляційного аналізу середнє й тренд необхідно вилучити із сигналу.* Зробити це можна шляхом віднімання від кожної ординати сигналу відповідної їй ординати кривої тренду. Надалі аналізуємо отриману різницю (залишки, *residuals*). Збережемо результати вилучення тренду в робочій області: SAVE TO WORKSPACE... — SAVE FIT OUTPUT TO MATLAB STRUCT NAMED: OUTPUT1 і закриємо вікна підпрограми. Змінна *output1* — це запис бази даних, у полях якого знаходиться різноманітна інформація. Щоб подивитися, які є поля, наберемо її ім'я (*output1*) у командному вікні та натиснемо клавішу ENTER. Присвоїмо ім'я залишкам:

```
a1=output1.residuals;
```

(необхідне поле вказується після крапки). Зобразимо сигнал без тренду графічно (рис. 5).

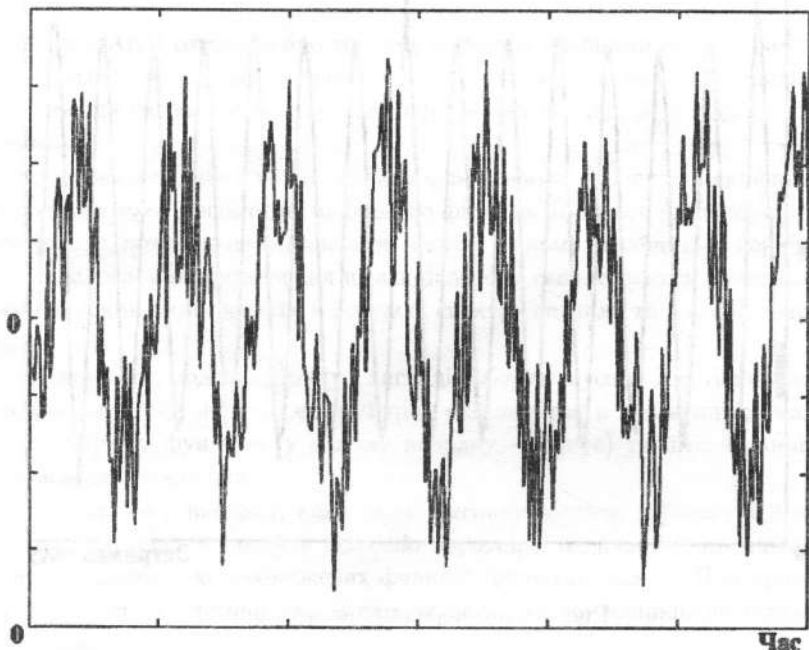


Рис. 5. Результат вилучення тренду

### 1.3 Пошук і визначення характеристик та вилучення періодичних складових

Наявність періодичної складової у даному сигналі є зрозумілою, але коли випадковий шум сильніший за періодичні складові, то їх не видно у сигналі, і тоді потрібно розраховувати *автокореляційну послідовність (АКП)*:

```
a2=xcorr(a1,'unbiased');
```

Наявність опції *unbiased* показує, що слід обчислювати незміщену АКП (рис. 6). Якщо максимальна затримка значно менша за довжину запису сигналу, то ця опція не потрібна.

АКП

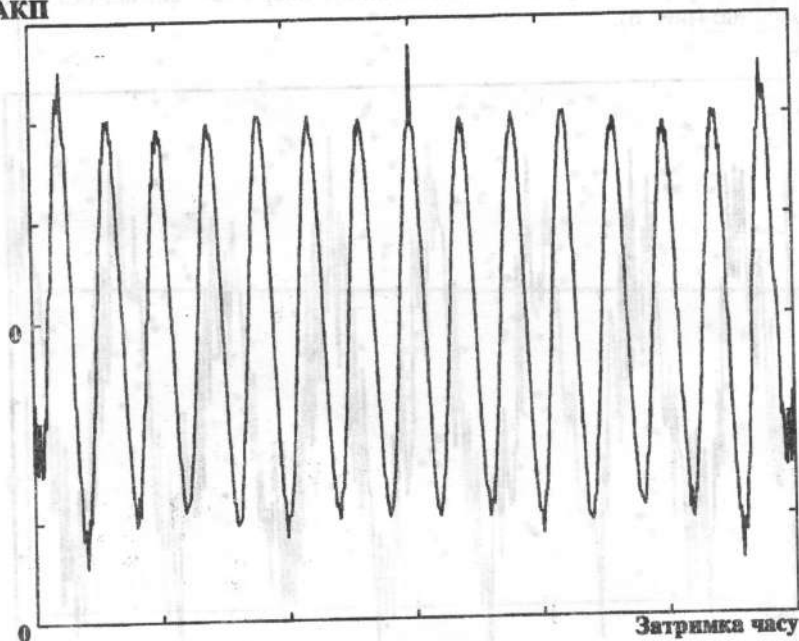


Рис. 6. Автокореляційна функція

Під час побудови АКП робиться копія сигналу й визначається сила кореляційного зв'язку між оригіналом сигналу й копією, яку зсунуто (затримано, *lag*) уздовж осі абсцис. Якщо затримка дорівнює нулю, то коефіцієнт кореляції дорівнює одиниці. Якщо сигнал є синусоїдою, то при затримці на величину, кратну періоду, копія буде точно відповідати оригіналу (коефіцієнт кореляції дорівнює одиниці). Якщо сигнал є випадковим шумом, то вже при будь-якій затримці сигнал не буде схожим сам на себе, тоді коефіцієнт кореляції дорівнюватиме нулю.

У MATLAB автокореляційна послідовність обчислюється за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), тому достовірними будуть значення до затримки, яка дорівнює половині довжини запису сигналу.

Функція `xcorr` використовується також для визначення взаємної кореляційної функції, тому на графіку присутні від'ємні затримки, які при обчисленні автокореляційної послідовності не потрібні. Графік потрібно

переробити:

```
x1=(1:150)'; plot(x1,a2(300:449))
```

Вигляд АКП говорить про те, що в сигналі є наявними випадкова (пік при нульовій затримці) і періодична (незатухаючі коливання) складові. Відношення сигнал—шум (для цієї періодичної складової) є відносно великим.

Наступним етапом аналізу сигналу є вилучення періодичної складової. Його зробимо за допомогою цифрового фільтра. Для того щоб розробити цей фільтр, потрібно знати діапазон частот, у якому знаходиться періодична складова. Для визначення цього діапазону скористаємося спектральним аналізом, який полягає в побудові спектра сигналу та його інтерпретації.

*Спектр* — це модель сигналу у вигляді набору синусоїд. Для її побудови використовується перетворення Фур'є, яке полягає в множенні сигналу на аналізуючу функцію (у даному випадку — синус) та інтегруванні в необмежених границях.

У загальному випадку, коли запис сигналу містить періодичні й випадкові складові, а також є відносно коротким, одержати його якісний спектр з допомогою необмежених функцій (синусоїд) важко. При прямому застосуванні перетворення Фур'є до такого запису виникне дві основні проблеми:

- отриманий спектр, як і сигнал, буде випадковим;
- через різкі початок і закінчення сигналу в отриманому спектрі виникне багато помилкових піків (*пелюстків*).

Тому розроблено спеціальні методи, що дозволяють поліпшити результати такого аналізу. Умовно їх можна поділити на дві групи:

- *класичний спектральний аналіз*, при якому з випадковим характером спектра борються усередненням багатьох спектрів, а з пелюстками — множенням даних на віконні функції, що спадають до країв;
- *параметричний спектральний аналіз* (наприклад, *авторегресійний*), коли за даними будують статистичну (імовірнісну) модель, використовують її для моделювання даних, за якими визначають спектр [6].

У MATLAB для спектрального аналізу призначено пакет *Signal Processing Tool*. Заваптажимо сигнал без тренду у середовищі пакета: FILE — IMPORT — FROM WORKSPACE — A1 —> DATA — IMPORT AS: — SIGNAL — SAMPLING FREQUENCY —> 1000 (НАПРИКЛАД) — NAME — A3 — OK.

У вікні SIGNALS виникне змінна *a3*. Її можна докладно розглянути (VIEW), а потім зробити спектральний аналіз: SPECTRA — CREATE. У більшості випадків починати краще з класичного спектрального аналізу Велча (*Welch*). Він дає достовірні й стійкі результати, однак потребує, щоб сигнал був "довгим": у ньому навіть найбільш низькочастотні компоненти мають встигнути повторитися кілька разів (більше трьох). Оскільки періодична складова, частоту якої необхідно визначити, повторюється за час спостереження сім разів, вважаємо, що цього досить для застосування методу Велча.

*Метод Велча* полягає в застосуванні FFT безпосередньо до сигналу. При цьому весь сигнал розбивається на фрагменти (вікна, WINDOW), які трохи перекривають один одного (OVERLAP). Дані в кожному вікні множаться на віконну функцію (HANNING, HANNING, BARTLETT і т.д., по краях вікна вона спадає до нуля). До результатів у кожному вікні застосовується FFT. Отримані спектри усереднюються.

Необхідність цієї процедури викликана тим, що сигнал має випадкову складову й кінцеву довжину. Щоб спектр не був випадковим, потрібне усереднення результатів у вікнах. Щоб у спектрі було менше пелюстків через різкі початок і закінчення сигналу, застосовується спадна по краях віконна функція.

Залишимо кількість точок, за якими буде обчислюватися FFT (NFFT), без змін (1024). Виберемо розмір вікна 64 (не більше третини довжини сигналу), а перекриття вікон — 16 (не більше половини довжини вікна). Застосуємо найпростішу віконну функцію, що спадає до країв вікна, — трикутну (TRIANGLE). Спектр зображено графічно на рис. 7.

Кількість відліків для обчислення FFT може бути довільною, програма автоматично доповнює сигнал нулями до кількості, кратної степеню двійки, як того потребує процедура FFT. Доповнення нулями не додає інформації в спектрі, він тільки стає більш "гладким". Чим більший розмір вікна, тим менше вікон розмістяться в сигналі, — усереднення буде гіршим, а спектр — більш випадковим, однак в ньому можна буде побачити дрібні деталі.

Форма вікна дозволяє керувати пелюстками. У разі, коли вікно прямокутне (RECTANGLE), рівень пелюстків і *роздільна здатність* є макси-

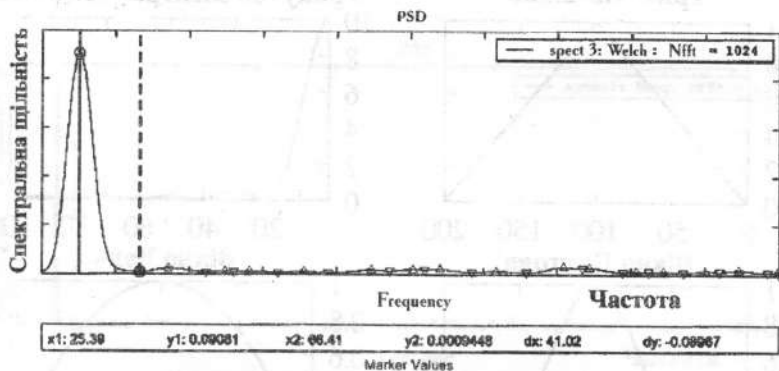


Рис. 7. Спектр, одержаний за методом Велча

мальними.

*Роздільна здатність* — це мінімальна відстань по осі частот між сусідніми піками спектру. Вона обернено пропорційна довжині сигналу (або розміру вікна).

Зазвичай пелюстки виникають поблизу всіх максимумів спектра, при цьому вони можуть приховувати дрібні його деталі. Для того щоб правильно вибрати віконну функцію, потрібно знати її спектральну форму, бо вона визначає те, що можна буде побачити в спектрі (рис. 8).

При обробленні вікном роздільна здатність залежить від ширини його центральної пелюстки. Більш дрібних деталей, ніж центральна пелюстка вікна, в спектрі не буде. Ця здатність краща у прямокутного вікна, гірша — у вікна Наттола, однак при обробленні вікном Наттола пелюстки практично непомітні. Рівнохвильове вікно Чебишева дозволяє зробити всі пелюстки з однаковою амплітудою, а вікно Хеммінга має мінімальний рівень бічних пелюсток біля центральної пелюстки й, таким чином, дозволяє розрізнити близько розташовані піки спектра.

Велч рекомендував для свого методу використовувати вікно Ханна та 50–60 %-не перекриття вікон, яке дозволяє вмістити в сигналі більше вікон і одержати додаткове усереднення (зменшити дисперсію спектра).

Коли запис сигналу відносно короткий, можна поліпшити роздільну здатність спектра, застосовуючи *метод Берга*. Він належить до параметричних методів, тому що за даними будується *авторегресійна модель*, а за її параметрами визначається спектр.

*Авторегресія* — це регресія сигналу самого на себе.



Рис. 8. Віконні функції

Якщо між сусідніми відліками сигналу існує кореляційний зв'язок, то з їх допомогою можна побудувати авторегресійну модель, де величину кожного відліку сигналу можна визначити за сусідніми значеннями з урахуванням наявності *білого шуму*.

*Порядок авторегресійної моделі* — це кількість сусідніх відліків сигналу, між якими є кореляційний зв'язок.

Цей порядок має відповідати реальній ситуації в сигналі. Якщо порядок занадто великий, то у спектрі виникають помилкові піки, якщо занадто малий — спектр стає занадто гладким і малоінформативним (частина інформації губиться). Оцінити порядок можна, використовуючи різноманітні критерії, запропоновані дослідниками [6], або приблизно від третини до половини довжини сигналу.

Виберемо порядок моделі 64 (не більше третини довжини ряду) і побудуємо спектр (рис. 9).

З допомогою маркерів визначимо полосу частот, яку треба вилучити. У даному випадку це полоса від 15 до 36 Гц.

Для вилучення цієї полоси частот побудуємо цифровий *режекторний* (*смугово-заглушувальний*, BANDSTOP) фільтр.



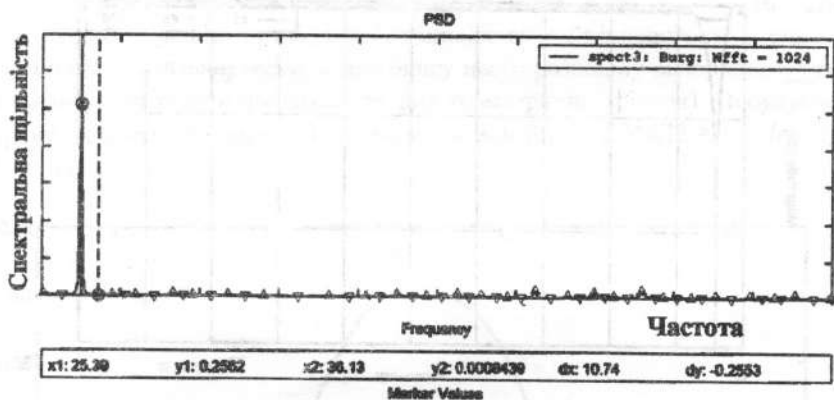


Рис. 9. Спектр, одержаний за методом Берга

Для автоматичної побудови фільтра використаємо *Signal Processing Tool*. Для цього позначимо у вікні SIGNALS запис сигналу *a3* і натиснемо клавішу NEW, розташовану під вікном FILTERS.

У вікні, що відкрилося, введемо: SAMPLING FREQUENCY: 1000 — ALGORITHM: BUTTERWORTH IIR — TYPE: BANDSTOP — AUTO DESIGN — PASSBAND FP1: 5 — PASSBAND FP2: 40 — PASSBAND RP: 3 STOPBAND FS1: 12 — STOPBAND FS2: 36 — STOPBAND RS: 7,

де  $F_s$  — гранична частота смуги заглушення, Гц,

$F_p$  — гранична частота смуги пропускання, Гц,

$R_p$  — максимально припустиме заглушення у смузі пропускання, дБ,

$R_s$  — мінімально припустиме заглушення у смузі заглушення, дБ.

Використаємо фільтр із необмеженою імпульсною характеристикою (IIR), що є аналогом електронного фільтра (рис. 10).

Застосуємо фільтр до сигналу. Переконаємося, що у вікні SIGNALS маркер показує на запис сигналу *a3*, потім натиснемо клавішу APPLY під вікном FILTERS. У вікні, що відкрилося, зазначимо ім'я відфільтрованого запису сигналу *a4*.

Експортуємо цей запис до робочої області. На графіку запису періодична складова не спостерігається (рис. 11)

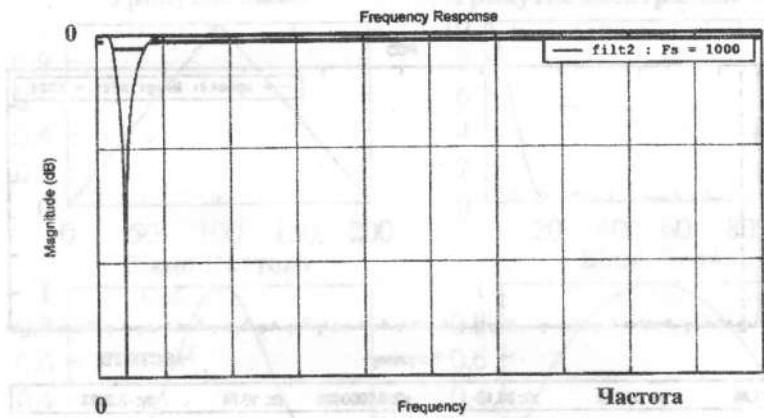


Рис. 10. АЧХ шумоподавляющего фильтра

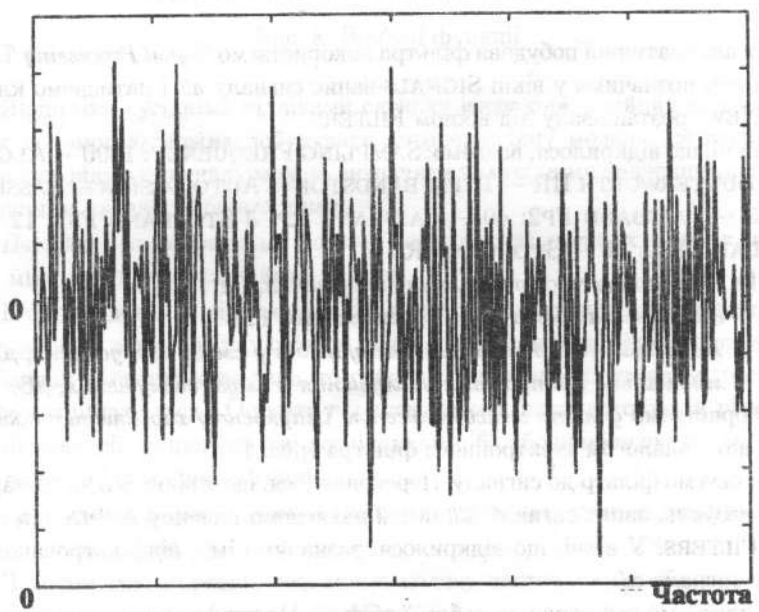


Рис. 11. Сигнал с выделенной периодической составляющей

#### 1.4 Визначення характеристик випадкової складової

Застосуємо метод моментів Чебишева. Він полягає у тому, що для випадкової величини визначають не випадкову характеристику — розподіл щільності ймовірності, а для опису цього розподілу використовують його моменти різних порядків (як для геометричної фігури). Побудуємо криву щільності ймовірності з використанням функції MATLAB *ksdensity* (рис. 12).

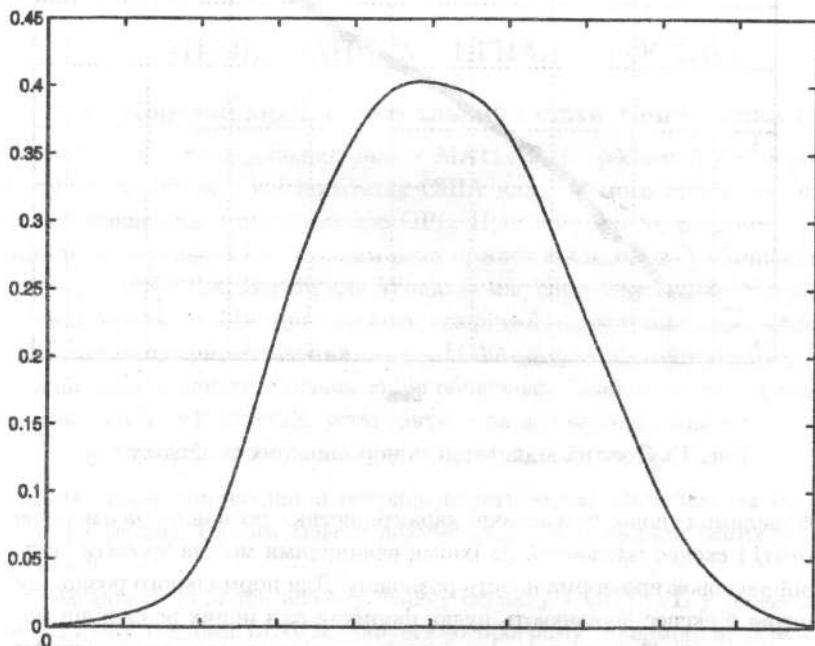


Рис. 12. Функція щільності ймовірності

Як видно з графіка, крива дуже нагадує нормальний розподіл. Для уточнення відповідності розподілу до нормального використаємо спеціальний статистичний графік *probability plot*, на якому нормальний розподіл зображено у вигляді прямої лінії, і якщо відліки сигналу відповідають нормальному розподілу, то вони мають бути на цій лінії (рис. 13).

Як видно з графіка, більшість відліків лежить на лінії, однак "хвости" (точки, що відхилились далеко від середнього) не належать до нормального розподілу.

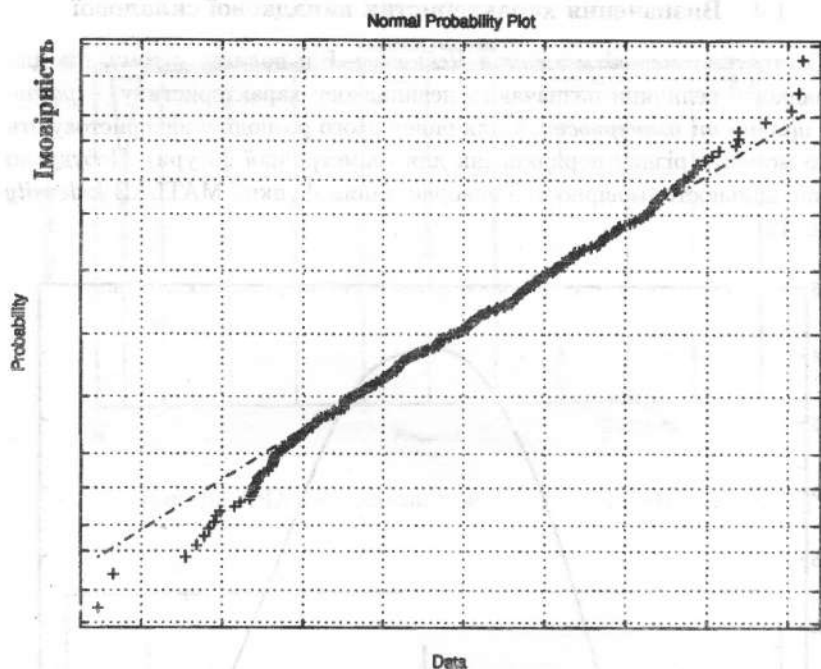


Рис. 13. Тест на відповідність нормальному розподілу

Обчислимо основні статистичні характеристики розподілу: *асиметрію* (*kurtosis*) і *ексцес* (*skewness*). За їхніми величинами можна зробити остаточний висновок про нормальність розподілу. Для нормального розподілу асиметрія й ексцес дорівнюють нулю, формули для інших розподілів можна знайти в [7]. Визначимо основні статистичні характеристики: *середнє значення* (*mean*) і *середньоквадратичне відхилення* (*std*).

Для аналізу було умовно прийнято, що в сигналі є тренд, періодична й випадкова складові. Однак це спрощення реальності, тому деякий вид аналізу, пов'язаний з вилученням із сигналу будь-якої складової, спотворює запис сигналу й усі його складові. Потрібно контролювати ступінь цих перекручувань, інакше, починаючи з деякого моменту оброблення сигналу, будемо аналізувати не дійсність а те що виконано своїми руками.

Особливість аналізу запису сигналу у MATLAB — значна автоматизація обчислень. Підпрограми у MATLAB є віконними, із зручним інтерфейсом. Деякі процедури (наприклад, побудова фільтрів) дозволяють фор-

мувати необхідні властивості (АЧХ) шляхом переміщення миші. Процес проектування істотно спрощується й прискорюється, однак увага відвертається від математичної основи виконуваних дій. У середовищі MATLAB можна й безпосередньо використовувати функції оброблення в командному вікні, а також описувати процедури оброблення в так званих скриптах — текстових файлах, де функції оброблення об'єднані в програми.

## 2 АНАЛІЗ ЗАПИСУ СИГНАЛУ В OCTAVE

### 2.1 Кореляційний, спектральний і статистичний аналіз

OCTAVE — це спрощений аналог MATLAB, розроблений у 80-х роках минулого століття в університетах США для допомоги студентам, який зараз розвивається під ліцензією GPL. Програму включено до популярних дистрибутивів LINUX, і там вона працює в консолі з графічною підсистемою GNUPlot. Версія для Windows має спрощену подобу віконного інтерфейсу MATLAB і два варіанти графічної підсистеми: традиційний з GNUPlot і експериментальний на базі JAWA. У сучасних версіях OCTAVE можна додати пакети з різних видів обчислень. Знайти ці пакети можна на сайті OCTAVE-FORGE, установити — за допомогою команди

```
pkg install /home/packages/signal-1.0.7.tar.gz
```

Для виконання завдання потрібні пакети *signal*, *statistics*, *tsa* (аналіз часових рядів). Пакети мають документацію й приклади застосування функцій.

Розглянемо порядок аналізу запису сигналу в OCTAVE у середовищі операційної системи LINUX. Запустимо програму в терміналі. Для того щоб імпортувати сигнал, його потрібно попередньо підготувати. Він може бути у форматі MATLAB (.mat) або у вигляді текстового файла, де значення розташовані у стовпчик (попередню підготовку зручно робити в електронних таблицях, наприклад GNUmeric). Для імпорту призначено команду load:

```
load -ascii filename
```

Тут у випадку імпорту текстового файла вказуємо опцію *-ascii*, а у випадку формату MATLAB — опцію *-mat*.

Заглянути в робочу область можна з використанням команди *who*.

Побудуємо графік імпортованого запису сигналу:

```
plot(a1)
```

Вилучимо тренд з використанням функції

```
detrend(a1,1)
```

Тут *a1* — запис сигналу; одиниця — порядок кривої тренду (лінійний). Результат вилучення тренду зображено на рис. 14.

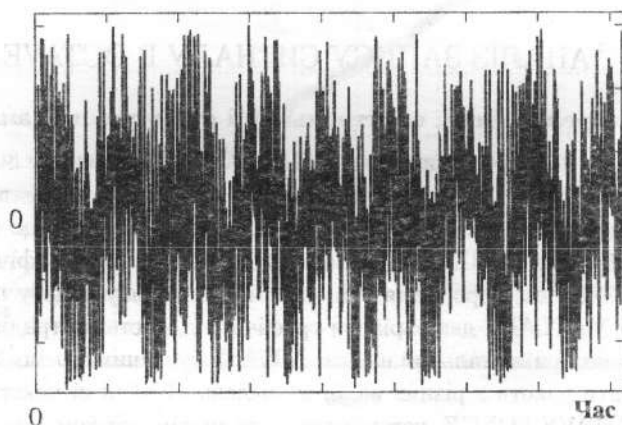


Рис. 14. Запис сигналу з вилученим трендом

Як видно з графіка, тренд вилучено. Пошук періодичних складових зробимо з використанням функцій *xcorr*, *autocor*:

```
a3=autocor(a2); a3=xcorr(a2,'unbiased');
```

Автокореляційну послідовність побудовано з використанням функції *autocor* (рис. 15).

Вигляд послідовності свідчить про присутність періодичної складової й випадкового шуму. Відношення сигнал-шум є великим.

Для визначення характеристик періодичних складових застосуємо спектральний аналіз та зобразимо спектр (рис. 16):

```
[a4,xa4]=pwelch(a2,nuttallwin(512),0.2,4096,11050,  
'half','plot','none');
```

У результаті отримуємо вектор ординат *a4* і вектор частот *xa4* спектру.

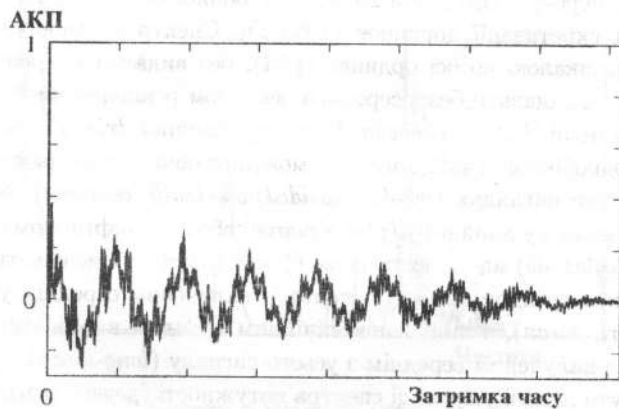


Рис. 15. Автокореляційна функція

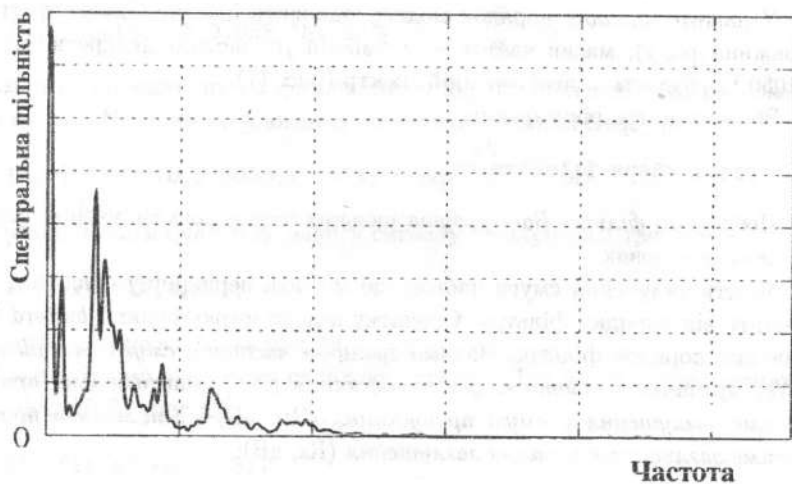


Рис. 16. Спектр сигналу, одержаний за методом Велча

Це — класичний спектр Велча з використанням вікна Натола довжиною 512 точок, перекриттям вікон 20 %, FFT обчислюється за 4096 точками. Частота дискретизації дорівнює 11050 Гц. Спектр є однобічним (*half*), з лінійною шкалою по осі ординат (*plot*), без видалення тренду (*none*). Вікна можна задавати безпосередньо вектором реальних чисел або із зазначенням імені (*boxcar, chebwin, hamming, hanning, triang* і т.д.) і довжини. Крім однобічного (*half, onesided*) можливе обчислення двостороннього спектра у двох виглядах: (*whole, twosided*) або (*shift, centerdc*). Зображувати спектр можна у лінійному (*plot, squared*) або логарифмічному (*semilogx, semilogy, loglog, db*) масштабі по осях. Є можливість обчислювати спектр із невилученим трендом (*no-strip, none*), з вилученим середнім у кожному вікні (*short, mean*), з вилученим лінійним трендом в кожному вікні (*linear*) або з вилученим середнім з усього сигналу (*long-mean*). Результати можуть бути подані у вигляді спектра потужності (*power*), взаємного спектра (*cross*), функції когерентності (*coher*), передавальної функції (*trans*).

Як видно з графіка, запис сигналу має одну періодичну складову.

Для підвищення роздільної здатності скористаємося методом Берга:

```
fr=1:10:5000; [a5,xa5]=pburg(a2,512,fr,11050,'whole');
plot(xa5,a5)
```

У даному випадку порядок моделі становить 512 (не більше третини довжини ряду), масив частот — у змінній *fr*, частота дискретизації — 11050 Гц, будується двосторонній спектр (рис. 17).

Збережемо графік у файлі:

```
print -deps filename.eps
```

Побудуємо *фільтр Батерворта* низьких частот для вилучення періодичних складових.

Якість вилучення смуги частот, що містить періодичну складову, залежить від порядку фільтра. Спочатку з допомогою функції *buttord* визначимо порядок фільтра. Задамо *граничні частоти смуги заглушення* ( $W_s$ ), *граничні частоти смуги пропускання* ( $W_p$ ), *максимально припустиме заглушення у смузі пропускання* ( $R_p$ , дБ) і *мінімально припустиме заглушення у полісі заглушення* ( $R_s$ , дБ):

```
[n,Wn]=buttord(Wp1,Ws1,Rp,Rs)
```

Частоти зведені до безрозмірного вигляду з допомогою *частоти Найквіста* (дорівнює половині частоти дискретизації):



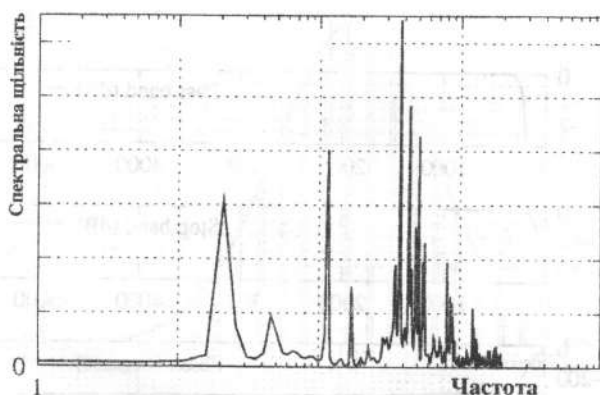


Рис. 17. Спектр сигналу за методом Берга

```
[n,wn]=buttord(0.04,0.03,3,10) n=4 wn=0.039976
```

Для забезпечення заданих характеристик необхідний четвертий порядок фільтра. З допомогою функції *butter* визначимо коефіцієнти *передвальної функції* фільтра четвертого порядку:

```
[b,a]=butter(4,0.035,'high')
```

Амплітудно-частотну та фазочастотну характеристики фільтра показано на рис. 18. Вони побудовані з допомогою функції *freqz\_plot*:

```
[h,w]=freqz(b,a,5000,11050); freqz_plot(w,h)
```

Застосуємо цей фільтр до запису сигналу з вилученим трендом:

```
a3=filter(b,a,a2);
```

Результати показано на рис. 19.

Проаналізуємо випадкову складову сигналу. Для цього скористаємося функцією *histfit* (рис. 20):

```
histfit(a3./max(a3))
```

Як видно з рисунка, періодичні складові в сигналі ще не цілком відфільтровані, але більшість відліків підлягає нормальному розподілу.

У стислому вигляді послідовність аналізу буде такою:

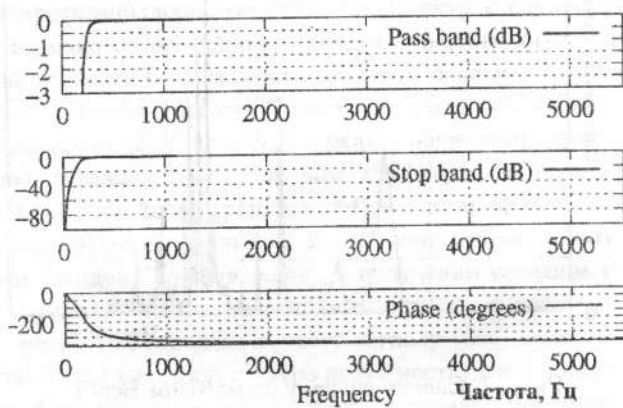


Рис. 18. Характеристики фільтра

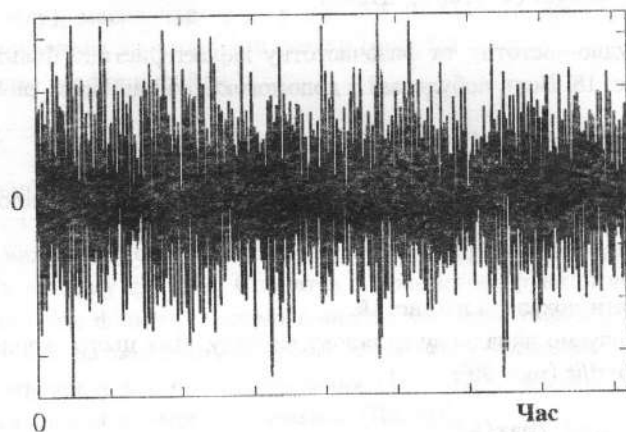


Рис. 19. Сигнал з вилученою періодичною складовою

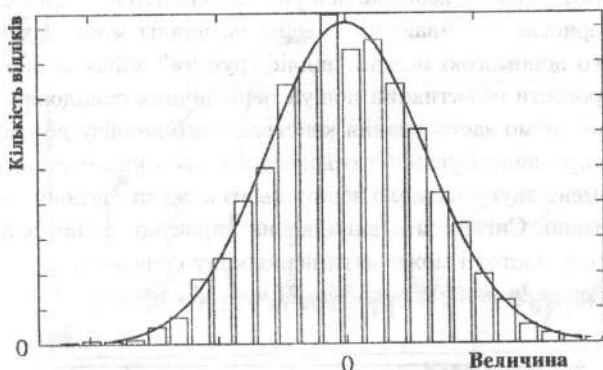


Рис. 20. Гістограма випадкової складової

- наявність тренду оцінюємо візуально, якщо це зробити важко, проводимо пряму за методом найменших квадратів, за необхідності переходимо до більш складних функцій;
- приховані періодичності в сигналі шукаємо з використанням автокореляційної функції;
- для визначення характеристик періодичних складових застосовуємо спектральний аналіз, а для їх вилучення — цифрову фільтрацію;
- для визначення властивостей випадкової складової використовуємо метод моментів Чебишева.

*Складові є абстракцією, у сигналі вони єдині, тому будь-яке оброблення спотворює їх усіх.*

## 2.2 Особливості застосування кепстрального аналізу сигналу

*Кепстр* — це спектр потужності логарифмічного спектра потужності. Його перше призначення — пошук луни у сейсмічних сигналах. Оскільки це спектр спектра, то термінологію спектрального аналізу було збережено, але англійські терміни були записані навпаки: *спектр* — *кепстр*, *частота (frequency)* — *квефренція*, *гармоніка* — *рагмоніка*, *амплітуда (magnitude)* — *гамнітуда*, *фаза (phase)* — *сафе*, *фільтр* — *ліфтр*. Слід зауважити, що квефренція має розмірність часу, а алгоритм побудови кепстра нагадує один з алгоритмів побудови автокореляційної функції.

Галузі застосування кепстра: пошук і усунення луни у сигналі, визначення характеристик відбиваючих поверхонь, аналіз мови, діагностика машин. З його допомогою можна "відліфтувати" зайву інформацію в сигналах і провести ефективний пошук періодичних складових у їхніх спектрах. Розглянемо застосування кепстрального аналізу до двох сигналів, записаних при випробуваннях осьового компресорного ступеня. Перший — це фрагмент звуку навколо зовнішнього кожуха ступеня, що вже було проаналізовано. Сигнал має випадковий характер, однак займає досить вузьку полосу частот і може мати періодичну складову.

Кепстр сигналу показано на рис. 21.

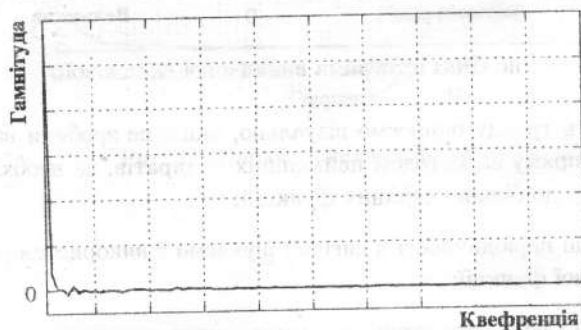


Рис. 21. Кепстр звуку

Для його побудови в OCTAVE використовується функція `rceps`, наприклад:

```
p=rceps(pres);
```

Його вигляд свідчить про відсутність луни у сигналі.

Зробимо цей аналіз для сигналу НВЧ, відбитого від рухомих лопаток колеса ступеня, де луна має бути.

Кепстр показано на рис. 22.

Як можна побачити, на графіку кепстра є ряд піків, рівномірно розташованих уздовж осі квєренції. Це свідчить про присутність луни, накладеної на сигнал. Якщо кепстр модифікувати таким чином, щоб усунути ці пікі й повернутися до сигналу або спектра оберненим перетворенням, то зайву інформацію, що пов'язана з луною, буде усунено. Такий спектр легше інтерпретувати.

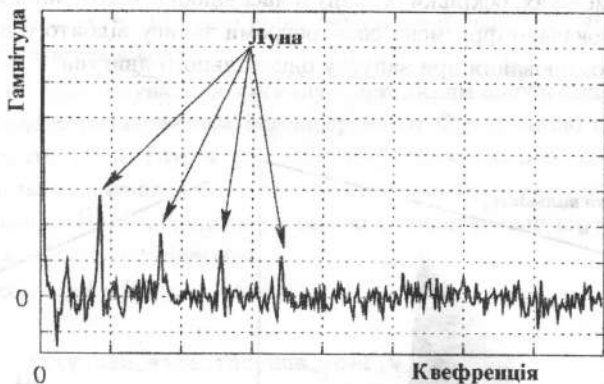


Рис. 22. Кепстр НВЧ-сигналу

### 3 АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

Аналіз значно ускладнюється при нестационарному характері сигналу. Під нестационарністю розуміється зміна характеристик складових сигналу в часі. У періодичній складовій змінюються амплітуда, частота і фаза, у випадковій — середні значення, дисперсії й моменти більш високих порядків.

Такі процеси становлять найбільший інтерес під час доведення газотурбінного двигуна. Його характеристики сильно погіршуються на нерозрахункових режимах роботи, наприклад при запуску й зупинці. У цей час виникають і зникають фізичні явища, що викликають небезпечні вібрації, які можуть призвести до руйнування двигуна. Досліджувати їх з використанням класичного спектрального аналізу незручно, тому що потрібно проаналізувати безліч схожих складних спектрів, що містять багато гармонік, які рухаються одна відносно одної або є нерухомими, шумів, що виникають і зникають, які займають різні частотні полоси. Тому для нестационарного аналізу краще застосовувати спеціальні нестационарні методи.

Якщо вікна, у яких розраховується перетворення Фур'є, не усереднювати, а приписати їм відповідні послідовні моменти часу і подати набір спектрів у вигляді двовимірного зображення, то одержимо *спектрограму*. У MATLAB її можна побудувати з допомогою функцій *specgram* і *specgramdemo* (остання має графічний інтерфейс). Тут складніше заплута-

тися в гармоніках, оскільки їх зміну в часі відображають лінії. На графіку (рис. 23) показано фрагмент спектрограми запису відбитого від лопаток НВЧ-випромінювання при запуску обновального двигуна.

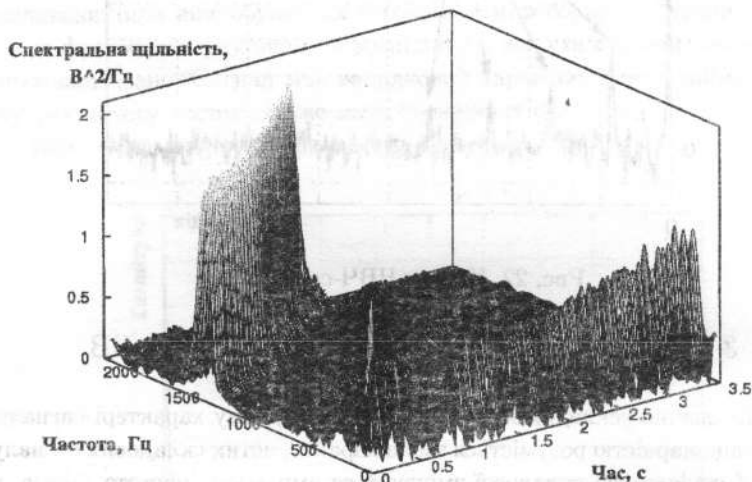


Рис. 23. Фрагмент спектрограми НВЧ-сигналу при запуску двигуна

У графічному вікні, що виникає під час роботи команди *specgramdemo*, крім загального вигляду спектрограми є можливість спостерігати спектри й змінення частотних компонентів у часі з допомогою двох рухомих маркерних лінійок, а також задавати основні параметри перетворення: кількість відліків, за якими розраховується перетворення Фур'є (NFFT), розмір вікна (NWIN) і величину перекриття вікон (NLAP). Одиниця виміру — це кількість відліків сигналу.

В OCTAVE для побудови спектрограми використовують команди *specgram* пакета *signal* і *stft*, остання виконує короткочасне перетворення Фур'є. Формат команди *specgram* такий:

```
[S,f,t]=specgram(y,Nfft,Fs>window,overlap)
```

Тут  $S$  — матриця комплексної спектральної щільності;  $f$  — вектор частот;  $t$  — вектор відліків часу;  $y$  — сигнал;  $Nfft$  — кількість відліків сигналу.

лу, за якими обчислюється перетворення Фур'є;  $F_s$  — частота дискретизації, Гц; *window* — тип і розмір вікна (наприклад, *hanning(100)*); *overlap* — розмір перекриття вікон.

Якщо вікно переміщувати по сигналу з невеликим шагом (майже плавно), то це буде *короткочасним перетворенням Фур'є*. Якщо при цьому використовувати вікно Гауса, що забезпечує максимальну просторово-часову роздільну здатність, то таке перетворення буде мати назву *перетворення Габора*. Його недоліками є великі обчислювальні витрати й використання необмежених функцій.

Формат команди *stft* трохи інший:

```
[S,c]=stft(y,win_size,inc,num_coef,w_type)
```

Тут  $S$  — матриця результатів перетворення;  $c$  — триелементний вектор, що містить розмір, шаг і тип вікна;  $y$  — сигнал; *win\_size* — розмір вікна; *inc* — переміщення вікна; *num\_coef* — числовий коефіцієнт; *w\_type* — тип вікна (1 — *hanning*, 2 — *hamming*, 3 — *rectangle*).

На спектрограмах інформація про поведінку періодичних компонентів сигналу знаходиться у більш зрозумілому вигляді, ніж в окремих спектрах. Відразу можна розділити гармоніки, зв'язані з обертанням ротора і, наприклад, гармоніки з частотою 50 Гц. Ця властивість спектрограми стає особливо корисною, коли двигун є многовальним. Кожен ротор має свою динаміку розганяння й зупинення, нестационарні явища можуть викидати у різних каскадах двигуна й переходити з каскаду на каскад. У цьому випадку окремі спектри стають майже марними у зв'язку з труднощами інтерпретації. Але й спектрограма має свої обмеження. Головне — це використання необмежених функцій (синусоїд), що погіршує її просторово-часову роздільну здатність.

Для аналізу поведінки нестационарних явищ краще застосовувати обмежені періодичні функції — *вейвлети*. Під час аналізу вейвлети можуть масштабуватися: розтягуватися й стискуватися по осі часу. Так вони пристосовуються до особливостей форми сигналу. Крім того, вони виникають і зникають у певні моменти часу. Це дає гнучкість у застосуванні аналізу до нестационарного сигналу. Якщо при спектральному аналізі сигнал розкладається на синусоїди певної частоти, то при *вейвлет-аналізі* — на вейвлети певного масштабу. На графіку (рис. 24) видно, як сигнал подається у вигляді композиції дрібних і великих деталей, кожна з яких апроксимується вейвлетом де Мейера 5-го порядку.

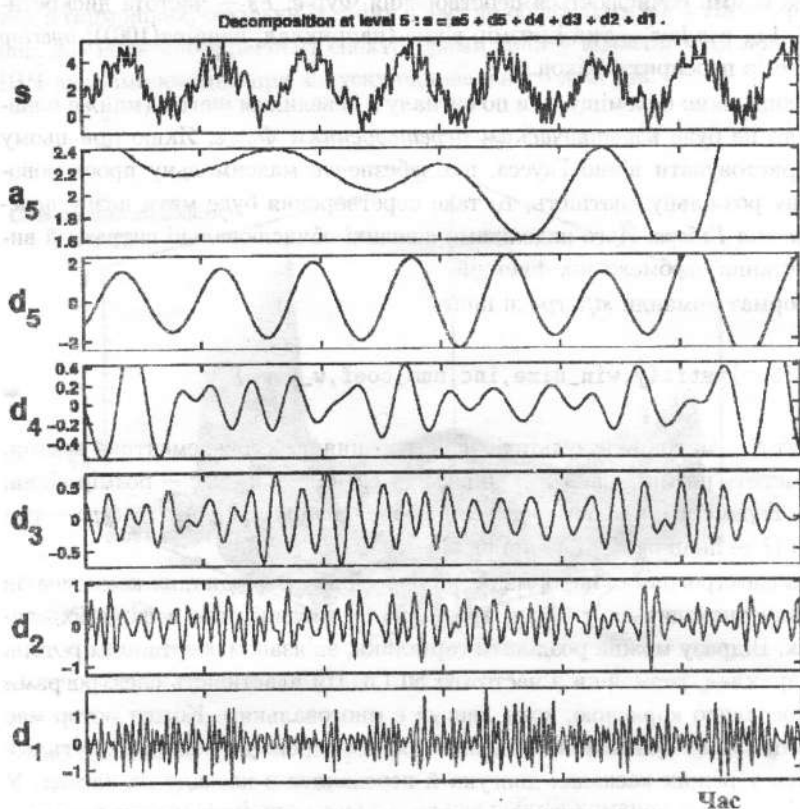


Рис. 24. Вейвлет-декомпозиція сигналу

На рисунку показано, як апроксимація 5-го порядку відображає спадний тренд, деталь 5-го порядку — періодичну складову, а деталі 1-го і 2-го порядку — випадкову складову. Одержати інтегральну інформацію про структуру сигналу можна шляхом використання *безупинного вейвлет-перетворення*. Воно потребує великого обсягу обчислень і містить багато інформації, інтерпретувати яку не завжди зручно. В останніх версіях OSAVE почали виникати команди, що працюють з вейвлетами. У закінченому вигляді цього виду аналізу в OSAVE ще немає, однак його можна зробити самостійно. Приклад програми-скрипта наведено нижче.



```

# використано вейвлет 'мексиканський капелюх'
# імпорт файла
s=loadaudio('ім'я','raw',16);
# вирізання із сигналу фрагмента для аналізу
s2=s(10000:200000);
# вилучення тренду
s1=detrend(s2(1:131072),1);
# визначення довжини фрагмента
N = length(s1);
# формування вектора даних для аналізу
signal=reshape(s1,1,N);
# визначення частоти й періоду дискретизації
oms = 2*π*44100; Ts = 2*π/oms;
# формування симетричних векторів часу
if floor(N/2) == (N/2), t = (-floor(N/2):(floor(N/2)-1))*Ts;
else t = (-floor(N/2):(floor(N/2)))*Ts; endif
# ініціалізація масштабних факторів
a = (1:8:480)*Ts; row = length(a);
# перетворення Фур'є
yhat = fft(signal);
# ініціалізація матриці результатів
matrix = zeros(row,N);
# цикл за масштабними факторами
for k=1:row,
psi_scale=conj((1-(t./a(k)).^2).*exp(-(t./a(k)).^2/2));
psi_scale_hat=fft(psi_scale);
trans=exp((-j*t(1)*(0:(N-1))*oms/N));
conv_hat=((yhat.*psi_scale_hat).*trans)/sqrt(a(k));
matrix(k,:)=ifft(conv_hat); end
# візуалізація на екрані
m=rot90(flipud(abs(matrix)),-1); save_precision = 3;
gset pm3d map gset palette color gset xlabel "time";
gset ylabel "scale";
gsplot(m(1:20:60000,:))
# запис графіка на диск
gset terminal png; gset output 'mexhat.jpg'; replot

```

## 4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Використовуючи різні методи аналізу в комп'ютерних системах OCTAVE або MATLAB, потрібно виділити складові сигналу й по можливості визначити їхні параметри. Свої висновки необхідно доповнити графічним матеріалом. На другому етапі навички, набуті при виконанні першого, застосовують для аналізу реального сигналу. Сигнали являють собою записи нестационарних тисків у проточній частині двигуна, вібрацій деталей двигуна. Під час аналізу необхідно виділити із сигналу гармонійні складові й подати їх інтерпретацію (визначити частоту обертання ротора й режим з витрат. Записку оформити з використанням видавничої системи LATEX [8]. Увесь графічний матеріал слід виконати у форматі jpeg 200dpi та кожен рисунок перерахувати на ширину 120 міліметрів.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. — М. : Мир, 1974.
2. Бендат Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол. — М. : Мир, 1983.
3. Рандал Р.Б. Частотный анализ / Р.Б. Рандал. — Глоструп, Дания: К. Ларсен и сын, 1989.
4. Кендэл М. Временные ряды / М. Кендэл. — М. : Финансы и статистика, 1981.
5. Штарк Г.Г. Применение вейвлетов для ЦОС / Г.Г. Штарк. — М. : ТЕХНОСФЕРА, 2007.
6. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл-мл. — М. : Мир, 1990.
7. Мюллер П. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. — М. : Финансы и статистика, 1982.
8. Котельников И.А. LATEX по-русски / И.А. Котельников, П.З. Чеботаев. — Новосибирск: Сибирский хронограф, 2004.

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	3
1 АНАЛІЗ ЗАПИСУ СИГНАЛУ В MATLAB	7
1.1 Імпорт в робочу область MATLAB . . . . .	8
1.2 Аналіз і вилучення тренду . . . . .	9
1.3 Пошук і визначення характеристик та вилучення періодичних складових . . . . .	11
1.4 Визначення характеристик випадкової складової . . . . .	19
2 АНАЛІЗ ЗАПИСУ СИГНАЛУ В OCTAVE	21
2.1 Кореляційний, спектральний і статистичний аналіз . . . . .	21
2.2 Особливості застосування кепстрального аналізу сигналу . . . . .	27
3 АНАЛІЗ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ	29
4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ	34
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	34

Філоненко Олександр Олександрович  
Бережний Валерій Юрійович  
Кудін Михайло Михайлович

## АНАЛІЗ СИГНАЛІВ ДАТЧИКІВ ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Редактор О.Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2009

Підписано до друку 22.01.2009

Формат 60x84 1/16. Папір офс. № 2. Офс. друк

Ум. друк. арк. 2. Обл.-вид. арк. 2,25. Наклад 100 прим. Заказ 19.

Ціна вільна

---

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
<http://www.khai.edu>  
Видавничий центр «ХАІ»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)