

## АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВІДБРАКУВАННЯ АНОМАЛЬНИХ ВИМІРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ ТЕЛЕМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

к.т.н. П.П. Топольницький, О.В. Андреев, О.Р. Рихальський  
(подав д.т.н., проф. Д.В. Голкін)

*Визначено можливості застосування різноманітних статистичних методів для виявлення аномальних телеметричних вимірів та розроблено рекомендації щодо їх застосування.*

Практика статистичної обробки вимірів показує, що серед безлічі результатів вимірювань є окремі аномальні значення, які містять грубу похибку. Наявність похибок вимірів вимагає прийняття у процесі обробки телеметричних вимірів спеціальних заходів щодо виключення впливу аномальних вимірів, а також зменшення впливу випадкових похибок на результати обробки. Для виключення аномальних вимірів (відбракування) потрібно мати комплекс алгоритмів, що дозволяють проводити обробку різноманітних параметрів.

Для систем автоматизованої обробки телеметричної інформації найбільшого поширення набула теорія статистичних рішень, яка дозволяє, на відміну від ручної обробки, формалізувати алгоритми перевірок та вибрати критерії відбракування невірогідних вимірів.

Усі методи, що базуються на теорії статистичних рішень, об'єднують у дві групи [1]. Методи першої групи ґрунтуються на припущенні, що виміри незалежні та проводяться над випадковими нормально розподіленими параметрами. Виявлення та виключення аномальних похибок здійснюється за допомогою критеріїв, побудованих на застосуванні різноманітних статистик. Методи другої групи ґрунтуються на використанні кореляційних зв'язків між вимірами. До них належать методи, що використовують розрахунок поточних різниць різноманітних порядків між сусідніми вимірами та порівняння їх з обраним допустимим значенням.

Серед методів першої групи найбільшого поширення для обробки вибірки вимірів визначеного об'єму набув параметричний критерій Ст'юдента, який використовує статистику [2]:

$$\tau_i = \frac{|Y_i - m_y|}{\sigma_y},$$

де  $Y_i$  - вимір, отриманий в момент часу  $t_i$ ;  $m_y$ ,  $\sigma_y$  - математичне очікування

ня та середньоквадратичне відхилення (СКВ) вимірів вибірки об'єму  $n$ .

Вимір  $Y_i$  вважається аномальним, якщо виконується умова  $\tau_i \geq \tau_{n,\alpha}$ , де  $\tau_{n,\alpha}$  - квантіль розподілення Ст'юдента.

Серед методів другої групи найбільше поширення набув метод перших сусідніх різниць та метод допусків [1].

Сутність методу допусків полягає у тому, що вимір  $Y_i$  вважається аномальним за умови, що попередній вимір  $Y_{i-1}$  був вірогідний, якщо

$$|Y_i - Y_{i-1}| > \Delta Y = |\dot{Y}| \Delta t + \beta \sigma,$$

де  $\dot{Y}$  - швидкість зміни параметра;  $\Delta Y$  - допустиме значення відхилення між вимірами;  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  - період опитування датчика;  $\sigma$  - СКВ похибок вимірів;  $\beta$  - деякий коефіцієнт, що вибирається за умови забезпечення потрібного рівня значущості  $\alpha$ .

У разі, коли поводження телеметричного параметра може бути описане поліномом  $m$ -го ступеня, вірогідність виміру  $Y_i$  може перевірятися за методом ковзного згладжування [3]. При цьому вимір  $Y_i$  вважається аномальним, якщо виконується умова

$$|\hat{Y}_i - Y_i| > \Delta Y = \beta \sqrt{\sigma^2 + \sigma_{\text{оц}}^2}, \quad \text{при } i > n_6,$$

де  $\hat{Y}_i$  - екстрапольоване значення параметра, що вимірюється;  $n_6$  - довжина базового інтервалу;  $\sigma_{\text{оц}}$  - середньоквадратичне відхилення похибок екстраполяції параметра.

Екстрапольоване значення телеметричного параметра може бути визначене як

$$\hat{Y}_i = \sum_{j=0}^m \hat{a}_j t_i^j.$$

При цьому невідомі коефіцієнти полінома  $\hat{a}_j$  розраховуються за сукупністю значень телеметричних вимірів, що становлять базовий інтервал. Найбільш поширеним методом пошуку невідомих параметрів відомої функціональної залежності є метод найменших квадратів, що базується на критерії мінімуму квадрата випадкової похибки згладжування [3].

Для проведення порівняльного аналізу якості відбракування аномальних вимірів різнорізними методами введемо в розгляд математичну модель вимірів. Припустимо, що дискретні виміри телеметричного параметра, отримані у моменти часу  $t_i$ , можуть бути подані таким чином:

$$Y(t_i) = Y_u(t_i) + \gamma \xi(t_i),$$

де  $Y_u(t_i)$  - дійсне значення телеметричного параметра в момент часу  $t_i$ ;  $\xi(t_i)$  - випадкова величина, що має нормальний закон розподілення з нульовим математичним очікуванням та СКВ  $\sigma$ ;  $\gamma$  - відносна величина аномалії, яка показує у скільки разів СКВ аномальної похибки переви-

щуче СКВ похибок вимірів.

Різноманітність телеметричних процесів не дозволяє мати єдиний математичний опис телеметричного параметра  $Y_u(t)$ , але у зв'язку з тим, що ряд телеметричних параметрів бортового комплексу космічного апарата "Січ-1" має коливальний характер зміни у часі [4], то для проведення порівняльного аналізу якості відбракування аномальних вимірів різнорідними методами використовуватимемо математичну модель гармонійної зміни телеметричного параметра. Моделювання телеметричного параметра  $Y_u(t)$  проведемо за умови, що амплітуда сигналу дорівнює 30 умовних одиниць, а період зміни параметра – 100 періодам опитування датчика. При моделюванні похибок вимірів телеметричних параметрів доцільно прийняти значення відносної похибки вимірів не більше 3 % [5], а відносну величину аномалії  $\gamma$  – не більше 6 [6].

Як критерій ефективності відбракування оберемо коефіцієнт ефективності  $K_{\text{еф}} = N_{\text{в}} / N_{\text{а}}$ , де  $N_{\text{в}}$  - кількість виявлених аномальних вимірів;  $N_{\text{а}}$  - загальна кількість аномальних вимірів.

Дослідимо залежність коефіцієнта ефективності  $K_{\text{еф}}$  від параметрів, що змінюються для кожного з методів, за умови місткості аномальних вимірів у вибірці не більше ніж 10 %. Залежність  $K_{\text{еф}}$  методу Ст'юдента від об'єму вибірки, що використовується для розрахунку  $\sigma_y$  та  $m_y$ , для різних значень рівня значущості  $\alpha$  наведена на рис. 1.

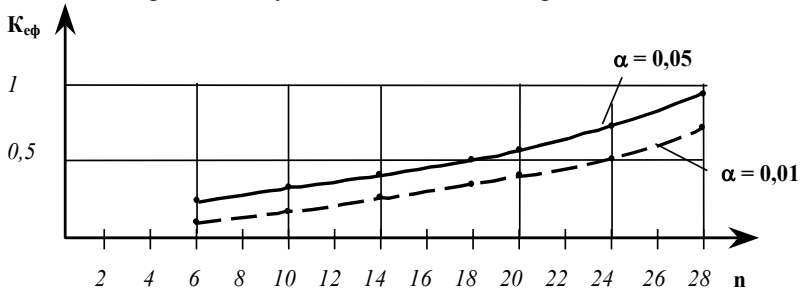


Рис.1. Графік залежності  $K_{\text{еф}} = f(n, \alpha)$  для методу Ст'юдента

Із наведених залежностей, навіть для двох значень  $\alpha$ , виходить, що метод Ст'юдента дуже чутливий до об'єму вибірки, за якою проводяться розрахунки параметрів розподілу. Тому коефіцієнт ефективності наближується до одиниці лише при достатньо великих значеннях  $n$ . Залежність  $K_{\text{еф}}$  від рівня значущості  $\alpha$  дещо менша. Однією з основних вимог правильного використання критерію Ст'юдента є достатньо точний розрахунок параметрів розподілу отриманої вибірки вимірів, що саме по собі може бути складною задачею з урахуванням можливого нестационарного характеру поведінки параметра [5]. Результати розрахунку ефективності методу ковзного згладжування, при використанні полінома другого ступеня, для різних значень кое-

фіцієнта  $\beta$  та різної довжини базового інтервалу  $n_6$  наведені на рис. 2.

Із наведених залежностей виходить, що при достатньо малих значеннях  $\beta$  в обох випадках кількість вимірів, що вважаються аномальними, значно перевищує їх дійсну кількість. При збільшенні коефіцієнта  $\beta$  кількість помилково відбракованих вимірів зменшується і  $K_{ef}$  наближається до одиниці, але подальше збільшення коефіцієнта  $\beta$  призводить до відповідного збільшення кількості аномальних вимірів, які визнаються алгоритмом вірогідними. Однією з основних труднощів при застосуванні цього методу є правильний вибір ступеня полінома, що згладжує [3], що у свою чергу потребує ретельного аналізу поведінки телеметричного параметра. Залежність  $K_{ef}$  методу допусків від коефіцієнта  $\beta$  для різних значень апіорної швидкості зміни телеметричного параметра  $\dot{Y}$  наведена на рис. 3.

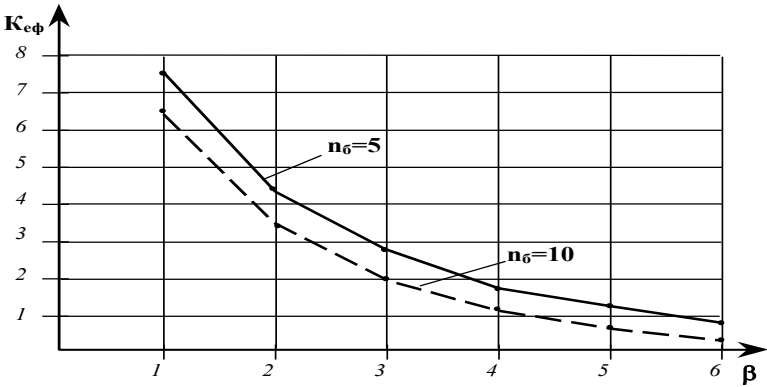


Рис. 2. Графік залежності  $K_{ef} = f(\beta, n_6)$  для методу ковзного згладжування

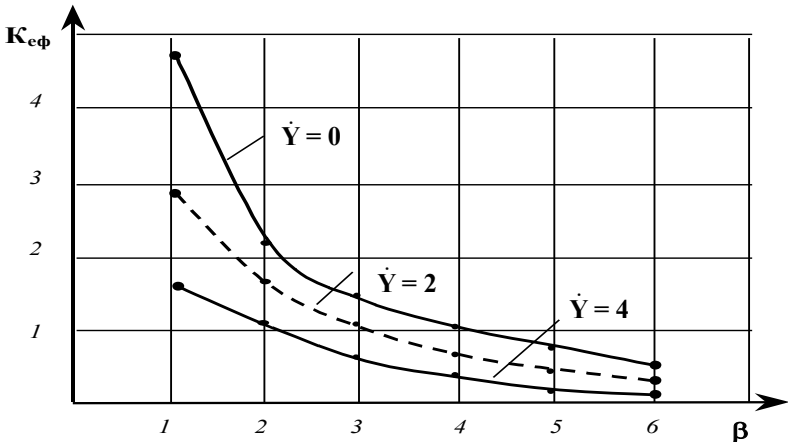


Рис. 3. Графік залежності  $K_{ef} = f(\beta, \dot{Y})$  для методу допусків  
Як і у попередньому випадку для методу допусків проглядається та сама

тенденція у залежності значення  $K_{\text{еф}}$  від  $\beta$ . При цьому треба зазначити, що метод допусків потребує достатньо точного знання динаміки поведінки телеметричного параметра. При моделюванні як телеметричний параметр  $Y_u(t_i)$  був обраний гармонійний сигнал із максимальним значенням швидкості зміни 1,87 ум.од./с. Виходячи з того, що закон розподілення похибок вимірів задавався нормальним, можна чекати, що коефіцієнт ефективності наближатиметься до одиниці за умови відповідності параметрів алгоритму моделі вимірів. Справді, з рис. 3 видно, що найбільш близько до одиниці  $K_{\text{еф}}$  наближається при  $\beta \approx 3$ , лише для значення швидкості зміни параметра  $\dot{Y} \approx 2$  ум. од./с.

Не менш важливим при виявленні аномальних похибок вимірів є питання про вплив кількості аномальних вимірів на якість їх виявлення. Залежність кількості виявлених аномальних вимірів від процентного змісту їх у вибірці для методу ковзного згладжування, критерію Ст'юдента та методу допусків наведена на рис. 4.

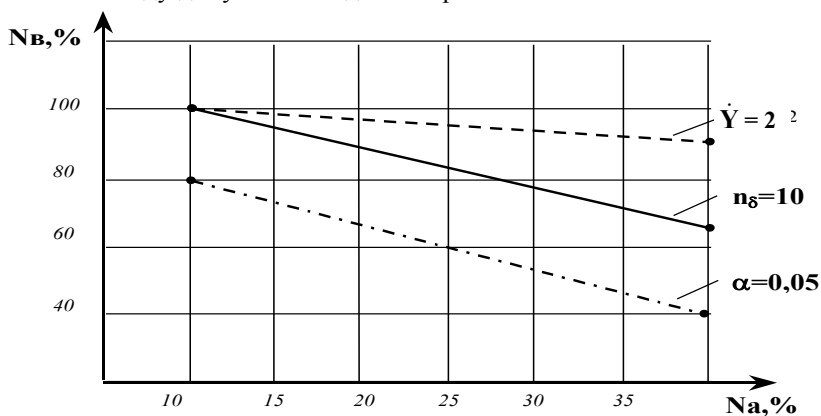


Рис. 4. Залежність  $N_b = f(N_a)$  для різних методів

Параметри алгоритмів вибирались на основі попередньо проведеного аналізу такими, що забезпечували значення  $K_{\text{еф}} \approx 1$ . Аналіз графіків, наведених на рис. 4, дає змогу зробити висновок, що найменше всього кількість аномальних вимірів впливає на результати виявлення аномалій методом допусків. Погіршення якості відбракування аномальних вимірів методом ковзного згладжування безпосередньо пов'язане із збільшенням кількості аномальних вимірів, тому що коефіцієнти полінома, який використовується для розрахунку екстрапольованого значення телеметричного параметра, визначаються на основі отриманої вибірки вимірів. Зниження якості відбракування аномальних вимірів за методом Ст'юдента також пояснюється безпосередньою залежністю точності визначення параметрів розподілу вимірів від кількості аномальних вимірів у вибірці, що використовувалась для їх розрахунку. Таким чином, при збільшенні кількості аномальних вимірів

зменшується точність розрахунку відповідних параметрів методів, що призводить до погіршення якості відбракування аномальних вимірів. У той же час показники якості відбракування методу допусків значно не змінюються, бо цей метод не використовує результати вимірів для розрахунку параметрів, що впливають на виявлення аномальних вимірів.

З проведених досліджень виходить, що ефективність методів Ст'юдента і ковзного згладжування істотно залежить від кількості аномальних вимірів, що містяться у вибірці, за якою розраховуються параметри алгоритмів.

Метод допусків забезпечує достатньо високий коефіцієнт відбракування аномальних телеметричних вимірів і дозволяє підвищити вірогідність телеметричних даних шляхом виключення з подальшої обробки вимірів, що містять грубі похибки. На етапі первинної обробки телеметричних вимірів доцільно застосовувати метод допусків, тому що він є найменш чутливим до кількості аномальних вимірів.

Як недоліки методу допусків можна відзначити складність визначення граничних значень для кожного параметра, що потребує як знання величини похибок радіотелеметричної системи, так і апріорних даних відносно меж та швидкості зміни параметрів, що передаються. Однак у цьому разі слід проявляти достатню обережність, оскільки зміни в поведінці параметра у деяких випадках можуть бути прийнятні за аномальні виміри, які будуть виключені з подальшої обробки. З іншого боку, бажання запобігти подібній ситуації, завдяки завищенню граничних значень знаходження телеметричного параметра, призведе до погіршення якості відбракування аномальних вимірів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Степкин В.С., Шмыголь С.С. Автоматизированная обработка и анализ телеметрической информации. – М.: МО СССР, 1980. – 516 с.
2. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
3. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. Квазиправдоподобные оценки. – М.: Радио и связь, 1983. – 304 с.
4. Результаты эксплуатации космического аппарата «Січ-1». Технический отчет. – Днепропетровск: КБЮ, 1998. – 58 с.
5. Сафаров Р.Т., Зверев Р.И., Шитов И.В. Радиотелеметрия. Ч.2. – М.: МО СССР, 1973. – 308 с.
6. Белицкий В.И., Зверев В.И. и др. Телеметрия. – М.: МО СССР, 1984. – 465 с.

Надійшла 20.02.2002

**ТОПОЛЬНИЦЬКИЙ Павло Петрович** – канд. тех. наук, заступник нач. кафедри Житомирського військового інституту радіоелектроніки. У 1994 році закінчив ХВУ. Галузь наукових інтересів – обробка інформації в інформаційно-вимірювальних системах.

**АНДРЕЄВ Олександр Володимирович** – доцент кафедри Житомирського військового інституту радіоелектроніки. У 1990 році закінчив Новосибірський державний університет. Галузь наукових інтересів – обробка інформації в інформаційно-вимірювальних системах.

**РИХАЛЬСЬКИЙ Олександр Ростиславович** – доцент кафедри Житомирського війсь-

*кового інституту радіоелектроніки. У 1988 році закінчив ВІРТА. Галузь наукових інтересів – телеметричні вимірювання, обробка інформації в інформаційно - вимірювальних системах.*