



DOI 10.28925/2663-4023.2024.23.328337

УДК 004.4-047.63

Доровська Ірина Олександрівна

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID 0000-0001-8694-5395

i.dorovska@e-u.edu.ua

Доровський Володимир Олексійович

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID 0009-0008-7816-4546

volodymyr.Dorovskyi@e-u.edu.ua

Доровський Дмитро Володимирович

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID 0009-0008-7816-4546

dmytro.dorovskyi@e-u.edu.ua

Скляренко Олена Вікторівна

Приватний вищий навчальний заклад «Європейський університет»

ORCID 0000-0001-6555-1223

olena.skliarenko@e-u.edu.ua

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮВАЧІВ У ПОВІТРІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ МЕРЕЖІ ПОСТІВ КОНТРОЛЮ ВИКИДІВ

Анотація. Авторами розглянуто задачу аналізу структури мережі моніторингу та розміщення стаціонарних постів. Моніторинг стаціонарних джерел забруднювача частково може проводитися з використанням стаціонарних постів контролю стану повітря. У зв'язку з високою вартістю впровадження та експлуатації таких постів, а також стохастичним характером поширення домішки в атмосфері, ефективність роботи групи стаціонарних постів регіону істотно залежить від розташування їх у просторі. Необхідною умовою успішного проведення заходів щодо зниження концентрації шкідливих викидів у навколишнє середовище та робіт з охорони чистоти атмосфери є контроль стану атмосферного повітря, що дає об'єктивну оцінку працездатності та ефективності всієї діяльності щодо попередження забруднення навколишнього середовища. Авторами сформульовано завдання аналізу структури мережі стаціонарних постів спостереження атмосферного повітря з метою підвищення якості поінформованості про забруднення за мінімальних витрат. Моделювання розсіювання від стаціонарних джерел дозволяє визначити масив розподілу максимальних концентрацій у просторі у районі дії джерела забруднення. Запропоновано методику розміщення мережі постів спостереження, засновану на моделях розсіювання домішки в атмосфері, теорії про регіоналізовану змінну та методах крігінгу для отримання адекватних оцінок про викиди стаціонарних техногенних джерел емісії домішки. Згідно наведеного авторами методу пропонується послідовне звуження зони пошуку найкращих місць розміщення постів із застосуванням різних підходів, що надає можливості визначення зони можливого перевищення гранично допустимих концентрацій домішок, моделювання розподілу концентрацій забруднювачів у приземному шарі повітря, визначення місць розміщення постів, виходячи з розрахунків просторової мінливості забруднень.

Ключові слова: моделювання; оптимізація; моніторинг; мережа постів контролю; джерела забруднювачів повітря.



ВСТУП

Актуальність та мета дослідження. Моніторинг стаціонарних джерел забруднювача частково може проводитися з використанням стаціонарних постів контролю стану повітря. У зв'язку з високою вартістю впровадження та експлуатації таких постів, а також стохастичним характером поширення домішки в атмосфері ефективність роботи групи стаціонарних постів регіону істотно залежить від розташування їх у просторі. З одного боку необхідно вибрати таку кількість постів та їх розміщення, щоб протягом часу нормування спостережень ймовірність виявлення концентрацій викидів, що перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК), була не менше встановленого довірчого інтервалу (зазвичай, обирають 95% ймовірність виявлення для сукупності стаціонарних постів), з іншого боку вартість експлуатації всіх постів протягом часу нормування не повинна перевищувати очікуваної шкоди від детермінованих джерел забруднення, інакше використання таких постів є економічно недоцільним. Метою досліджень було розроблення оптимального моніторингу мережі постів контролю джерел забруднювачів повітря промислових підприємств.

Постановка задачі аналізу структури мережі моніторингу та розміщення стаціонарних постів. Нехай m існуючих джерел викидів розміщено у різних точках P_1, P_2, \dots, P_m простору, а n стаціонарних постів спостереження — у точках X_1, X_2, \dots, X_n . Позначимо витрати на забезпечення роботи одного стаціонарного посту через c_{ij} . Нехай також на досліджуваному просторі задана мінімально допустима можливість виявлення викидів мережею стаціонарних постів r_{\min} . Тоді багатоеlementна задача розміщення може бути сформульована як завдання вибору додаткових постів i такого їх розташування в точках виділеного простору, при якому будуть виконані такі умови: інтегральна ймовірність виявлення забруднення групою стаціонарних постів повинна бути не меншою за встановлене значення r_{\min} (зазвичай 0.95): $p_{\Sigma} \geq r_{\min}$; розташування стаціонарних постів у місцях найбільш ймовірного виявлення викиду з урахуванням роза вітрів, характерної для даної місцевості, для багатьох стаціонарних місць викиду має бути таким, щоб усі джерела забруднювачів були представлені максимальним чином; інтегральна експлуатаційна вартість всіх N постів стаціонарного спостереження має не перевищувати сумарні очікувані збитки від аналізованих стаціонарних джерел забруднювачів: експлуатаційна вартість стаціонарних постів спостереження протягом часу нормування визначається на основі техніко-економічного аналізу, а очікувані збитки регламентовані вартістю квоти викидів та розміром штрафних санкцій їх перевищення. Так як величина перевищення квоти на прогнозований період невідома, допускається приймати її рівною розміру перевищень за попередній звітний період. Понад на квотовані викиди від стаціонарних джерел для прогнозованого періоду можна віднести до стохастичної компоненти забруднювачів. Як вихідні дані для аналізу існуючої структури мережі моніторингу лише на рівні території необхідна така інформація: план території; просторовий розподіл промислових підприємств (із зазначенням типу, технологій, що потенційно призводять до значних викидів забруднюючих речовин, та існуючих засобів контролю викидів); дані про параметри та викиди з усіх значних точкових джерел забруднення та основних розосереджених джерел; шляхи проходження та інтенсивність основних транспортних потоків; топографічні та метеорологічні дані, з якими можуть бути пов'язані розсіювання викидів та перенесення забруднення; просторовий розподіл густини населення, що проживає на даній території; основні характеристики населення, включаючи стан здоров'я, розподіл за віком, тощо.

u_{\min} , u_{\max} — максимальна та мінімальна координата зони визначення концентрацій по осі y ;

z_{\min} , z_{\max} — максимальна та мінімальна координата зони визначення концентрацій по осі z .

За допомогою моделювання отримуємо масив $cm(x,y,z)$ з урахуванням рози вітрів цієї місцевості. Тоді можна виділити простір, у якому концентрація перевищує гранично допустиме значення. У межах цього простору потрібно проводити виміри визначення просторової мінливості забруднення.

Для отримання інформації про очікувані концентрації забруднювачів використовуються відомі моделі поширення домішки в атмосфері від стаціонарних джерел, за допомогою яких обчислюється просторово-часовий розподіл концентрації домішки за умов викиду для заданого джерела забруднюючої домішки.

На рис. 2 відображається моделювання розподілу максимальних концентрацій забруднювача при викиді від одиночного стаціонарного джерела забруднення, що перевищують ГДК (гранично допустимої концентрації для обраного для моніторингу речовини небезпечної домішки).

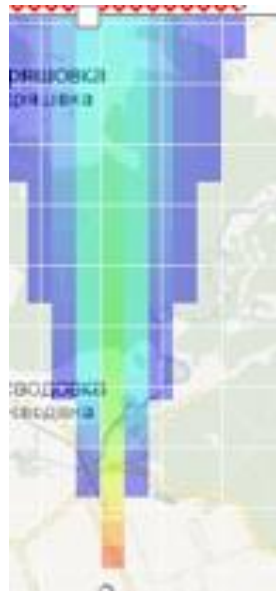


Рис. 2. Розподіл максимальних концентрацій (вище ГДК) від одного джерела забруднювача за заданих погодних умов

Модель дисперсії домішки в атмосфері відома та представлена в роботах, а також програмних кодах ЕФФЕКТ, АЛОНА, RIZEX-2 та інших. Вхідні дані для моделювання розподілу концентрацій у просторі є стохастичними (b_u): напрям вітру; швидкість вітру; стабільність атмосфери (інверсія, конвекція, ізотермія); потужність джерела забруднення та інших. Кожен стохастичний i -й параметр характеризується ймовірністю перебування у межах діапазонів його зміни. Будь-який набір можливих вхідних параметрів виключає прояв іншого набору, отже, об'єднується з логічного зв'язку «що виключає АБО». Це означає, що за наявності вектора фазових змінних вхідних даних для кожного джерела, їх значення розподіляються з різною ймовірністю діапазонів повного набору значень. Метеорологічні дані, властиві цій місцевості характеризуються «трояндою вітрів». Троянда вітрів, побудована за реальними даними спостережень, дозволяє за довжиною променів збудованого багатокутника виявити ймовірність напрямків вітру, а

також ймовірність швидкості на висоті 10 метрів. На рис. 3 представлена діаграма для 16 секторів напрямів вітру. Існують дані для 4, 8 та 16 секторів. Найбільш поширені дані для 8 секторів, але краще для 16.

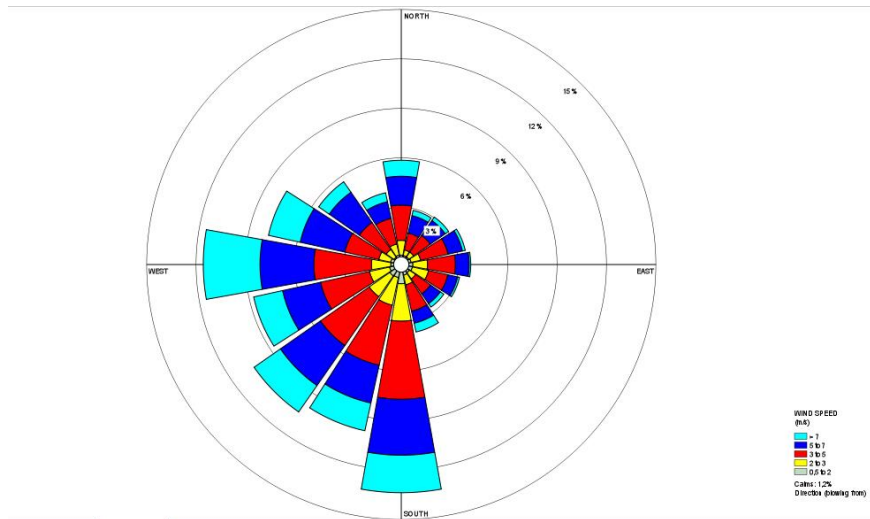


Рис. 3 Троянда вітрів для обраної місцевості

Дані в таблиці, число секторів та класів вітру редагується та задається відповідно до доступних дослідникам даних. Рекомендується використовувати фіксоване, наведене в таблиці число діапазонів швидкостей вітру. При швидкості вітру понад 7 м/с інтенсивність розсіювання хмари досить висока, і загроза від неї суттєво зменшується. Дані для рози вітрів можна отримати безпосередньо з метеорологічних даних або провести виміри (збирати дані інших вимірів) та обробити їх для наповнення таблиць за результатами спостережень наступним способом: фіксувати усереднені швидкості та напрямки вітру протягом часу усереднення для кожного одиночного виміру (час усереднення, наприклад, приймати рівним 1 годині). Чим більшу кількість вимірів буде проведено протягом часу визначення рози вітрів, тим точніший результат буде отримано. Рекомендується проводити щоденні виміри у різний час доби протягом чотирьох — п'яти років.

Троянда вітрів будується на підставі даних вимірювань, отриманих протягом певного періоду, що представлені в табличному вигляді (рис. 4). Потрібно сортувати отриманий масив швидкостей за зростанням та обчислити масив, що зберігає значення числа вимірів, для яких значення швидкостей вітру потрапляли у зазначені діапазони.

Directions / Wind Classes (m/s)	0,5 - 2	2 - 3	3 - 5	5 - 7	>= 7	Total	
1	348,75 - 11,25	9	78	185	152	84	508
2	11,25 - 33,75	8	30	91	94	28	251
3	33,75 - 56,25	8	31	107	96	22	264
4	56,25 - 78,75	13	51	148	78	15	305
5	78,75 - 101,25	21	77	147	73	8	326
6	101,25 - 123,75	20	87	104	53	10	274
7	123,75 - 146,25	12	40	96	63	22	233
8	146,25 - 168,75	17	52	142	65	47	323
9	168,75 - 191,25	61	197	411	294	197	1160
10	191,25 - 213,75	30	149	323	204	149	855
11	213,75 - 236,25	33	133	313	257	169	905
12	236,25 - 258,75	23	108	264	205	156	756
13	258,75 - 281,25	15	102	303	284	299	1003
14	281,25 - 303,75	17	64	183	241	171	676
15	303,75 - 326,25	6	50	173	194	67	490
16	326,25 - 348,75	11	59	138	90	48	346
Sub-Total		304	1308	3128	2443	1492	8675
Calms							109
Total							8784

Рис. 4. Дані рози вітрів



Алгоритм отримання середніх значень напрямку вітру для заданого часу усереднення виміру за миттєвими значеннями напрямків наступний. При наявності n значень напрямку вітру, отриманих протягом часу усереднення T , визначаємо середній напрямок вітру (град) за мінімальним відхиленням середнього значення від усіх миттєвих показників (град) отриманих протягом часу усереднення. Значення напрямку вітру отримуємо цілими величинами в градусах від напрямку на північ.

Перебираючи показник a_i для фіксованого x отримуємо r_i :

$$\text{якщо, } |x - a_i| \leq 180 \text{ то } r_i = |x - a_i|; \text{ інакше } r_i = 360 - |x - a_i|;$$

$$\text{розраховуємо суму всіх відхилень від величини } x : z_n = \sum_{i=0}^n r_i ;$$

проходимо в циклі всі значення x від 0 до 359 градусів з кроком 1 градус і обчислюємо значення z_n для кожного значення x ;

у процесі циклу визначаємо мінімальне значення z_n для всіх значень x та відповідне йому значення x .

Отримане значення є величиною напрямку вітру, що відхиляється від масиву миттєвих значень на мінімальну величину.

Дані можуть бути отримані іншими методами. У більшості випадків дані метеорологічних спостережень доступні у вигляді стандартних файлів, представлених відкритим форматом (наприклад, LAKES FORMAT).

Підсумкова умовна ймовірність реалізації набору вхідних параметрів визначається як:

$$P_j = \prod_{k=1}^N P_k , \quad (2)$$

де N — сумарна кількість незалежних вхідних параметрів, що визначають інтенсивність поширення забруднювача у просторі. Підсумкова ймовірність визначення концентрації речовини, що перевищує ГДК, обраного для моніторингу від одного джерела, у заданій точці поверхні землі (x, y) обчислюється як:

$$P_{ГДК}(x, y) = \sum_{j=1}^F \left(\prod_{k=1}^N P_k \right)_j , \quad (3)$$

де $F = \prod_u b_u$ — кількість можливих поєднань можливих незалежних вхідних

властивостей. Ймовірність того, що вітер матиме напрямок від джерела викиду в координату (x, y), визначається з «роза вітрів».

Наприклад, для одиночного джерела забруднення підсумкове поле умовної ймовірності виявлення концентрацій, що перевищують ГДК (за умови реалізації викидів заданої продуктивності від джерела), обмежене нижньою ймовірністю порядку 0.005 (рис. 5).

Пунктирною лінією обмежена територія, всередині якої ймовірність виявлення викидів від цього джерела перевищує мінімальну 0.005, жирною пунктирною лінією зазначено простір, ймовірність виявлення забруднювача в якому перевищує мінімально допустиму 0.05. Поле малюнку (та ізолінії) отримано шляхом урахування рози вітрів і ймовірностей викидів домішки даного джерела небезпеки.



Рис. 5 Поле ймовірності виявлення концентрацій, що перевищують ГДК від одного джерела забруднення

Сортування вектору ймовірностей (поля ймовірності) за спаданням дозволяє виділити набір координат, для якого підсумкова ймовірність нижче прийнятої. При цьому необхідний набір щонайменше 4-х стаціонарних постів.

Якщо враховувати множинні стаціонарні джерела забруднення, необхідно побудувати таке ж поле для всіх джерел, що враховуються. Об'єднане поле ймовірності від багатьох незалежних джерел NI інтегрується за формулою:

$$PI_{ГДК}(x, y) = 1 - \prod_1^{NI} \left(1 - \sum_{j=1}^F \left(\prod_{k=1}^N P_k(x, y) \right)_j \right)$$

На рис. 6 представлено таке поле трьох різних джерел забруднювачів. Якщо кількість датчиків або стаціонарних постів відома, то при виборі вузлів координатної сітки для їх розміщення, в яких ймовірність виявлення викиду максимальна, сума цих ймовірностей дає уявлення про надійність виявлення викидів. Якщо сумарна ймовірність у цих вузлах нижче прийнятної, величина якої визначається шляхом узгодження з органами місцевого та державного управління, можна зробити висновок про необхідність додаткових точок контролю за станом атмосфери. Підсумовуючи значення ймовірностей далі за списком координат додаткових постів, до досягнення прийнятного значення ймовірності, виявлення викидів дає нам необхідну кількість стаціонарних постів чи датчиків.

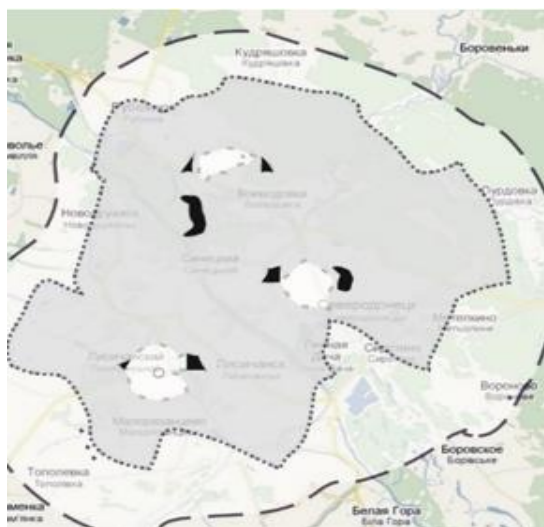


Рис. 6 Поле ймовірності виявлення концентрацій, що перевищують ГДК від трьох різних стаціонарних джерел забруднення



ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Необхідною умовою успішного проведення заходів щодо зниження концентрації шкідливих викидів у навколишнє середовище та робіт з охорони чистоти атмосфери є контроль стану атмосферного повітря, що дає об'єктивну оцінку працездатності та ефективності всієї діяльності щодо попередження забруднення навколишнього середовища. Сформульовано завдання аналізу структури мережі стаціонарних постів спостереження атмосферного повітря з метою підвищення якості поінформованості про забруднення за мінімальних витрат. Запропоновано метод розміщення мережі постів спостереження, заснований на моделях розсіювання домішки в атмосфері, теорії про регіоналізовану змінну та методи крігінгу для отримання адекватних оцінок про викиди стаціонарних техногенних джерел емісії домішки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lakhno, V. A., Kasatkin, D. Y., Skliarenko, O. V., & Kolodinska, Y. O. (2022). Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 269, 9–22.
2. Nevzorov, A. V., Skliarenko, O. V., Kolodinska, Y. O., & Yarovyi, R. O. (2023). Features of analytical support for the operation of information systems and equipment in modern conditions. *Applied questions of mathematical modelling*, 6 (1), 117–123. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-13>
3. Nevzorov, A. V., Skliarenko, O. V., Kolodinska, Y. O., & Nikolaievskiy, O. Y. (2023). Models for assessing the structural survivability and reliability of computer networks. *International Scientific and Technical Journal "Measuring and Computing Technology in Technological Processes"*, 3, 164–169.
4. Varzar, R. L. (n.d.). *Development of an automated system for monitoring atmospheric pollution*. <http://masters.donntu.edu.ua/2009/fvti/varzar/diss/index.htm>
5. Gessing, R. (1985). Two-level hierarchical control for stochastic optimal resource allocation. *International Journal of Control*, 41(1), 161–175. <https://doi.org/10.1080/0020718508961118>
6. Fussel, J. B. (1979). Improving System Safety Through Risk Assessment. *Proceedings 1979 annual reliability and maintainability symposium*, 160–164.
7. Ryazantsev, A. (2006). Principles of information grouping in process diagnostic system. *Radioelectronic computer systems*, 7(19), 136–139.

**Iryna Dorovska**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID 0000-0001-8694-5395

i.dorovska@e-u.edu.ua**Volodymyr Dorovskiy**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID 0009-0008-7816-4546

volodymyr.Dorovskiy@e-u.edu.ua**Dmytro Dorovskoy**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID 0009-0008-7816-4546

dmytro.dorovskiy@e-u.edu.ua**Olena Skliarenko**

Private Higher Educational Establishment "European University"

ORCID 0000-0001-6555-1223

olena.skliarenko@e-u.edu.ua

MODELING THE DISTRIBUTION OF POLLUTANT CONCENTRATIONS IN THE AIR AND OPTIMIZING THE MONITORING OF THE NETWORK OF EMISSION CONTROL STATIONS

Abstract. The authors considered the problem of analysis of the structure of the monitoring network and placement of stationary posts. Monitoring of stationary pollutant sources can be partially carried out using stationary air condition monitoring stations. Due to the high cost of implementation and operation of such stations, as well as the stochastic nature of the impurity distribution in the atmosphere, the efficiency of the group of stationary stations in the region significantly depends on their location in space. A necessary condition for the successful implementation of measures to reduce the concentration of harmful emissions into the environment and work to protect the purity of the atmosphere is the control of the state of the atmospheric air, which provides an objective assessment of the efficiency and effectiveness of all activities related to the prevention of environmental pollution. The authors formulated the task of analyzing the structure of the network of stationary atmospheric air monitoring stations in order to improve the quality of awareness about pollution at minimal costs. Modeling of dispersion from stationary sources allows to determine the array of distribution of maximum concentrations in space in the area of influence of the pollution source. A method of placement of a network of observation posts is proposed, based on models of impurity dispersion in the atmosphere, the theory of a regionalized variable, and kriging methods for obtaining adequate estimates of emissions from stationary man-made sources of impurity emissions. According to the method given by the authors, it is proposed to successively narrow the area of the search for the best places for placing posts using various approaches, which provides the possibility of determining the zone of possible exceeding of the maximum permissible concentrations of impurities, modeling the distribution of concentrations of pollutants in the surface layer of the air, determining the places of placing posts, based on calculations of the spatial variability of pollutants.

Keywords: modeling; optimization; monitoring; network of control posts; sources of air pollutants.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Lakhno, V. A., Kasatkin, D. Y., Skliarenko, O. V., & Kolodinska, Y. O. (2022). Modeling and Optimization of Discrete Evolutionary Systems of Information Security Management in a Random Environment. *Machine Learning and Autonomous Systems. Smart Innovation, Systems and Technologies*, 269, 9–22.



2. Nevzorov, A. V., Scliarenko, O. V., Kolodinska, Y. O., & Yarovy, R. O. (2023). Features of analytical support for the operation of information systems and equipment in modern conditions. *Applied questions of mathematical modelling*, 6 (1), 117–123. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-13>
3. Nevzorov, A. V., Scliarenko, O. V., Kolodinska, Y. O., & Nikolaievskyi, O. Y. (2023). Models for assessing the structural survivability and reliability of computer networks. *International Scientific and Technical Journal "Measuring and Computing Technology in Technological Processes"*, 3, 164–169.
4. Varzar, R. L. (n.d.). *Development of an automated system for monitoring atmospheric pollution*. <http://masters.donntu.edu.ua/2009/fvti/varzar/diss/index.htm>
5. Gessing, R. (1985). Two-level hierarchical control for stochastic optimal resource allocation. *International Journal of Control*, 41(1), 161–175. <https://doi.org/10.1080/0020718508961118>
6. Fussel, J. B. (1979). Improving System Safety Through Risk Assessment. *Proceedings 1979 annual reliability and maintainability symposium*, 160–164.
7. Ryazantsev, A. (2006). Principles of information grouping in process diagnostic system. *Radioelectronic computer systems*, 7(19), 136–139.

