

## **7. ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ЕКСПЕРТНІ СИСТЕМИ У ВИРІШЕННІ ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

### **КОНТРОЛЬ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ CONTROL OF SMOKE GASES OF POWER PRODUCTIONS WITH THE USE OF STATISTICAL MODELS**

*С.Ф. Артюх<sup>1)</sup>*

*Н.А. Любимова<sup>2)</sup>*

<sup>1)</sup>*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

<sup>2)</sup>*Харьковский национальный аграрный университет им. В.В. Докучаева,*

**Анотація.** Доведена можливість статистично значущого виявлення локальних періодичних трендів параметрів, що контролюються, на фоні змін нестационарності по математичному очікуванню, що прогресує.

**Ключові слова:** енергетика, димові гази, викиди, контроль.

**Аннотация** Доказана возможность статистически значимого обнаружения локальных периодических трендов контролируемых параметров на фоне прогрессирующих изменений их нестационарности по математическому ожиданию.

**Ключевые слова:** энергетика, дымовые газы, выбросы, контроль.

**Annotation.** Possibility is well-proven statistically meaningful discovery of local periodic trends of the controlled parameters on a background making progress changes their unstationarity on the expected value.

**Keywords:** energy, smoke gases, extrass, control.

**Вступление.** Основной проблемой контроля технологических выбросов энергопредприятий является априорная неопределенность параметров их случайных изменений на локальных интервалах наблюдения. Это в свою очередь не позволяет совершенствовать вероятностно-статистическую модель многопараметрического контроля, ограничивает его максимальную достоверность, быстрдействие и прогностические свойства.

**Актуальность.** Большинство работ по контролю и учету газообразных выбросов энергетических предприятий можно разделить на две группы. Во-первых, это работы по техническому и метрологическому обеспечению автоматизированных информационно - измерительных систем данного вида контроля[1-3]. Во-вторых, это работы, посвященные совершенствованию конструкций и показателей технического назначения первичных измерительных преобразователей и датчиков составляющих газовых смесей [4,5]. Работы, посвященные применению многофакторных

статистических моделей анализа нестационарных процессов технологических выбросов – практически отсутствуют.

**Цель работы.** Показать возможности применения многофакторного дисперсионного анализа кусочно-линейных регрессионных моделей нестационарности в реализациях контролируемых случайных процессов для обнаружения скачкообразных и прогрессирующих изменений в выбросах загрязняющих веществ теплоэлектростанций.

### **Математическая модель контролируемого процесса**

Контролируемые параметры физико-химических показателей, характеризующие те или иные свойства отходов энергетического производства, являются случайными функциями времени. Любой показатель контроля – это непрерывный случайный процесс  $X(t)$ , чаще всего нестационарный, а его реализация  $x(t)$  – это дискретный случайный процесс с дискретным временем.

Рассмотрим математическую модель такой реализации, в которой нестационарность по математическому ожиданию включает два тренда:

- 1) общий линейный, в виде регрессии

$$\hat{X} = A + B \cdot t; \quad (1)$$

- 2) последовательность  $k$  частных групповых регрессий со случайными коэффициентами (локальный тренд)

$$\hat{x}_j = a_j + b_j \cdot t, \quad j = \overline{1, k}. \quad (2)$$

С учетом выражений (1) и (2) математическая модель реализации  $x(t)$  нестационарного процесса  $X(t)$  примет вид:

$$x(t_{ji}) = \bar{X} + B(t_{ji} - \bar{t}) + \Delta_{a,j} + \Delta_{b,j} \cdot t_{ji} + \varepsilon_{ji}, \quad (3)$$

где  $\bar{X}$  – общее среднее значение всех результатов измерения;

$j$  – номер группы (частной регрессии);

$i$  – номер результата измерения процесса  $x(t)$  внутри  $j$ -ой группы;  $i = \overline{1, n_j}$ ;

$n_j$  – число результатов измерений внутри  $j$ -ой группы;

$\bar{t}$  – общее среднее время наблюдения;

$\Delta_{a,j}$  – аддитивное смещение внутри  $j$ -ой группы,  $\Delta_{a,j} = A - a_j$ ;

$\Delta_{b,j}$  – мультипликативное смещение внутри  $j$ - группы,  $\Delta_{b,j} = B - b_j$ ;

$\varepsilon_{ji}$  – остаточный шум модели (3).

Наложим линейные ограничения на систематические ( $\Delta_{aj}$ ,  $\Delta_{bj}$ ) и случайное ( $\varepsilon_{ji}$ ) отклонения [6]:

$$\sum_{j=1}^k \Delta_{aj} = 0, \quad \sum_{j=1}^k \Delta_{bj} = 0, \quad \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \varepsilon_{ji} = 0.$$

Кроме этого будем считать остаточную дисперсию случайного отклонения

$\varepsilon_{ji}$  постоянной величиной

$$M[\varepsilon_{ji}^2] = \sigma^2,$$

а закон распределения отклонений  $\varepsilon_{ji}$  – нормальным при условии взаимной независимости этих отклонений:

$$\varepsilon_{ji} \sim NORM(0, \sigma^2); \quad M[\varepsilon_{ji} \cdot \varepsilon_{lr}] = 0, \quad \text{при } j \neq l, i \neq r.$$

### Модель статистического контроля

Из математической модели (3) контролируемого процесса  $X(t)$  следует, что имеет место три составляющих систематических отклонений  $x(t_{ji})$  от общего среднего  $\bar{X}$ :

- общее линейное отклонение (общий линейный тренд)  $B(t_{ji} - \bar{t})$ ;
- частные скачкообразные аддитивные отклонения  $\Delta_{aj}$  (локальный аддитивный тренд).
- частные прогрессирующие отклонения  $\Delta_{bj} \cdot t_{ji}$ , (локальный мультипликативный тренд).

Перечисленные неслучайные систематические тренды могут отсутствовать, а могут и содержаться в контролируемом процессе  $X(t)$ . В последнем случае, частные локальные тренды могут провоцировать локальные выбросы процесса  $X(t)$ , что при наличии общего линейного тренда, повысит вероятность ненормативного загрязнения окружающей среды по данному показателю химического состава  $X$ , представленному во времени процессом  $X(t)$ .

Своевременное обнаружение перечисленных трендов (по отдельности или по множеству) позволит повысить достоверность контроля за счет адаптации процедур его планирования и управления. В этом случае любое изменение должно осуществляться на основе статистических решений, при тестировании модели (3) по реальным группированным результатам  $\{\{x_{1i}\}_1^{n_1}, \dots, \{x_{ji}\}_1^{n_j}, \dots, \{x_{ki}\}_1^{n_k}\}$  показателя  $X$  на интервале наблюдения  $[0, t_{kn_k}]$ .

Введем набор статистических решений  $\mathcal{Y}_0$  и  $\mathcal{Y}_1$ , позволяющие соответственно «не отвергнуть» или «отвергнуть» нулевые гипотезы  $\{H_0^{(s)}\}_1^3$ ,  $s = \overline{1,3}$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0^{(1)} : B = 0; \\ H_0^{(2)} : \Delta a_1 = \Delta a_2 = \dots = \Delta a_k = 0; \\ H_0^{(3)} : \Delta b_1 = \Delta b_2 = \dots = \Delta b_k = 0. \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Для получения правила выбора соответствующего решения, относительно справедливости перечисленных нулевых гипотез, проведем дисперсионный анализ модели (3). Для этого используем разложение общей суммы квадратов отклонений всех  $x(t_{ji})$  от общего среднего  $\bar{X}$ .

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [x(t_{ji}) - \bar{X}]^2$$

на составляющие  $Q_1, Q_2, Q_3$  и  $Q_\varepsilon$  [4]:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_\varepsilon$$

Результаты дисперсионного анализа для проверки гипотез  $H_0^{(1)}, H_0^{(2)}, H_0^{(3)}$  представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа математической модели (3)

| Источник изменений значений модели $x(t_{ji})$     | Сумма квадратов отклонений   | Число степеней свободы   | Средний квадрат   |
|--|--|--------------------------|---|
| Общий линейный ( $B \neq 0$ )                      | $Q_1 = B^2 \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t})^2$                   | $W_1 = 1$                | $\bar{Q}_1 = \frac{Q_1}{W_1}$                               |
| Локальный аддитивный ( $\Delta a; \neq 0$ )        | $Q_2 = Q - Q_1 - Q_3 - Q_\varepsilon$  | $W_2 = k - 1$            | $\bar{Q}_2 = \frac{Q_2}{W_2}$                               |
| Локальный мультипликативный ( $\Delta b; \neq 0$ ) | $Q_3 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (t_{ji} - \bar{t}_j)^2 (b_i - \bar{b})^2$   | $W_3 = k - 1$            | $\bar{Q}_3 = \frac{Q_3}{W_3}$                               |
| Случайный остаточный ( $\varepsilon_{ji} \neq 0$ ) | $Q_\varepsilon = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [x(t_{ji}) - a_j - b_j t_{ji}]^2$ | $W_\varepsilon = N - 2k$ | $\bar{Q}_\varepsilon = \frac{Q_\varepsilon}{W_\varepsilon}$ |
| Суммарный общий                                    | $Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} [x(t_{ji}) - \bar{X}]^2$                      | $W = N - 1$              | $\bar{Q} = \frac{Q}{W}$                                     |

В таблице 1:  $\bar{t}_j$  - групповое среднее времени наблюдения,  $N = \sum_{j=1}^k n_j$  - общее число

результатов измерения контролируемого показателя за все время наблюдения  $t_{kn}$ ;

$\bar{b}$  - средневзвешенный угловой коэффициент локальных трендов

Последний столбец таблицы 1 позволяет сформировать три критериальные  $F$ -статистики дисперсионного отношения с соответствующими степенями свободы [6]:

$$F^{(1)} = \frac{\bar{Q}_1}{Q_\varepsilon}, \quad F^{(1)} \sim F_{w_1, w_\varepsilon}; \quad (5)$$

$$F^{(2)} = \frac{\bar{Q}_2}{Q_\varepsilon}, \quad F^{(2)} \sim F_{w_2, w_\varepsilon}; \quad (6)$$

$$F^{(3)} = \frac{\bar{Q}_3}{Q_\varepsilon}, \quad F^{(3)} \sim F_{w_3, w_\varepsilon}; \quad (7)$$

Используя верхние процентные точки  $F$ -распределения [6], как критические статистики  $F_{кр}$

$$F_{кр} = \{F_{w_1, w_\varepsilon, \alpha}, F_{w_2, w_\varepsilon, \alpha}, F_{w_3, w_\varepsilon, \alpha}\},$$

можно сформулировать следующие правила выбора решений относительно справедливости гипотез (4), таблица 2.

Таблица 2

### Правила выбора статистических решений

| Проверяемая гипотеза | Решение                                    |   |
|----------------------|--|---|
|                      | $\gamma_0$                                 | $\gamma_1$                                    |
| $H_0^{(1)}$          | $F^{(1)} < F_{w_1, w_\varepsilon, \alpha}$ | $F^{(1)} \geq F_{w_1, w_\varepsilon, \alpha}$ |
| $H_0^{(2)}$          | $F^{(2)} < F_{w_2, w_\varepsilon, \alpha}$ | $F \geq F_{w_2, w_\varepsilon, \alpha}$       |
| $H_0^{(3)}$          | $F^{(3)} < F_{w_3, w_\varepsilon, \alpha}$ | $F \geq F_{w_3, w_\varepsilon, \alpha}$       |

Если в модели (3) пренебречь отклонениями  $\Delta_{aj}$  и  $\Delta_{bj} \cdot t_{ji}$ , считая их составляющими общего остаточного отклонения

$$Z_{ji} = \Delta\alpha_j + \Delta b_j \cdot t_{ji} + \varepsilon_{ji}, \quad (8)$$

то нулевые гипотезы (4) становятся одной нулевой гипотезой

$$H_0 : B = 0 \quad (9)$$

Гипотеза (9) эквивалентна гипотезе  $H_0^{(1)}$ , однако вероятность ошибки первого рода при проверке гипотезы  $H_0$  меньше, чем при проверке справедливости гипотезы  $H_0^{(1)}$ .

Статистика дисперсионного отношения для проверки этой гипотезы вычисляется по выражению

$$F^{(0)} = \frac{Q_1}{(Q_2 + Q_3 + Q_\varepsilon)} \cdot (N - 2) \quad (10)$$

Решения  $\gamma_0$  или  $\gamma_1$  принимают в соответствии с правилами:

- а) принять решение  $\gamma_0$ , если  $F^{(0)} < F_{1,(N-2),\alpha}$ ;
- б) принять решение  $\gamma_1$ , если  $F^{(0)} \geq F_{1,(N-2),\alpha}$ .

Статистика  $F^{(0)}$  позволяет с большей достоверностью проверить гипотезу об отсутствии общего линейного тренда (1).

### Экспериментальные результаты статистического контроля

Проверка эффективности предложенных статистических моделей нестационарного процесса и процедуры статистического контроля его трендов осуществлялась на примере варианта данных для Старобешевской ТЭС. Контроль газообразных выбросов осуществлялся газоанализатором ULTRAMAT 23, работающим в системах с отбором пробы с одновременным измерением компонентов в одном приборе, с использованием однолучевого метода с многослойным детектором и интегрированной функцией автоматической калибровки, в мае месяце. Анализировалась полученная выборка  $N = 6150$  измеренных значений количественного содержания в газообразных выбросах ТЭС концентраций пыли,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ . На рисунках 1 - 5 представлены типичные зависимости от времени каждого из перечисленных показателей контроля.

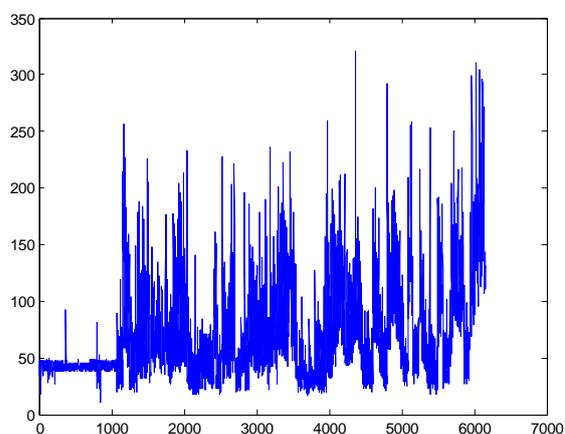
В таблице 3 представлены, для разных  $K$ , результаты расчета значений  $F$  - статистик (6), (7) и (10) для суточных локальных и общего трендов исследуемых процессов, а также соответствующие решения при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

Из таблицы 3 видно, что наибольшее число локальных трендов содержат процессы изменения  $\text{NO}_x$  (8 решений ( $\gamma_1$ )) и  $\text{SO}_2$  (7 решений ( $\gamma_1$ )), с периодами изменений от 8 до  $\sim 3,5$  часов ( $K = \overline{3,7}$ ).

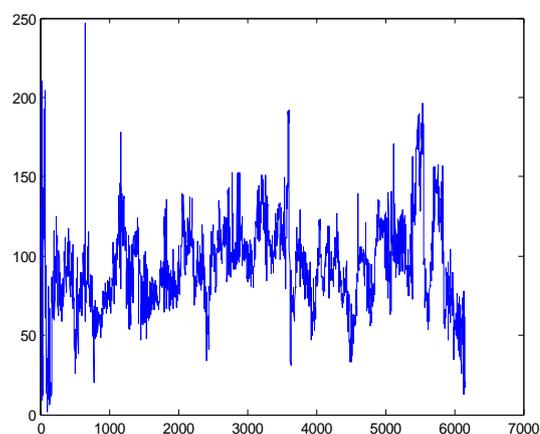
Показатели 1 и 5, для пыли и  $\text{O}_2$ , трендов не содержат вообще. У показателя  $\text{CO}$  имеется один тренд с аддитивной и мультипликативной составляющими, с периодом  $\sim 3,5$  часа ( $K=7$ ). Из всех показателей только у  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  имеются общие линейные суточные тренды (решения ( $\gamma_1$ ) для критериальной статистики  $F^{(0)}$ ).

**Выводы.** 1. Предложенный метод дисперсионного анализа кусочно-линейной регрессионной модели случайных временных рядов, как реализаций нестационарных

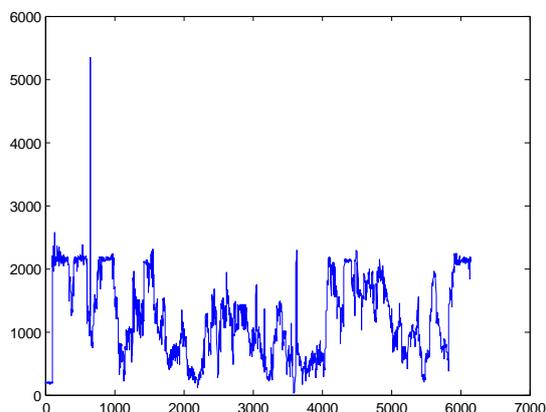
процессов контролируемых концентраций составляющих ингредиентов в газообразных выбросах ТЭС, позволяет независимо оценивать локальные нестационарности по математическому ожиданию, причем отдельно по аддитивному и мультипликативному систематическим изменениям. 2. Рассмотренная модель обнаружения локальных и общих систематических трендов, для наблюдаемых показателей загрязнения атмосферы, дает возможность оценивать взаимозависимость показателей (из таблицы 1 – это  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ ), для которых имеют место совпадения решений  $\gamma_1$  по составляющим локальных трендов. 3. Выявленные в ходе дисперсионного анализа локальные тренды могут быть использованы для адаптации плана контроля выбросов с учетом локализации интервалов времени наблюдения, причем, отдельно по каждому из контролируемых показателей.



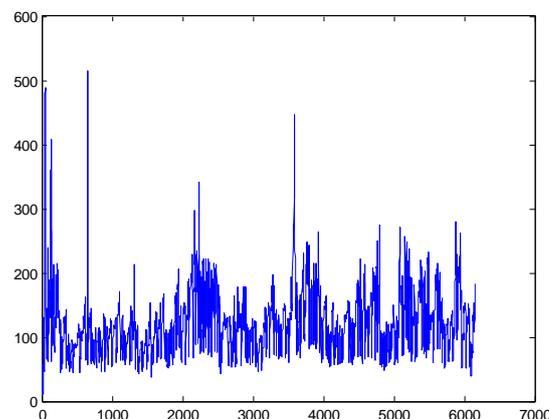
а). Пыль



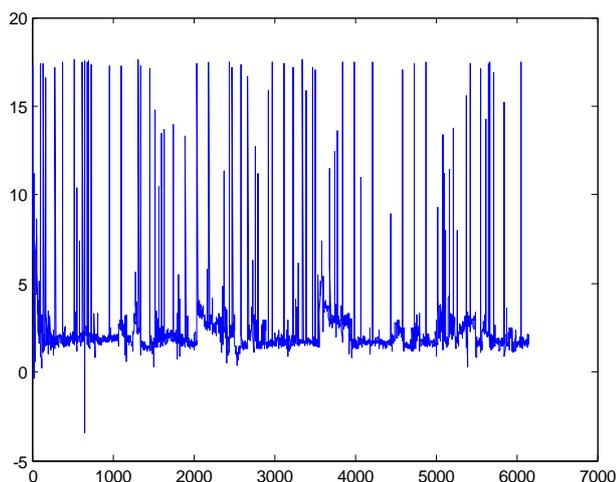
б).  $\text{NO}_x$



в)  $\text{SO}_2$



г) CO



д) O<sub>2</sub>

Рисунок —Типичные реализации контролируемых показателей загрязнения дымовых газов

Таблица 3

**Значения критериальных статистик и решения об отсутствии ( $\gamma_0$ ) и наличии ( $\gamma_1$ ) соответствующего тренда в процессе  $x(t)$**

| K                    | $F, F^{(2)}, F^{(3)}$<br>статистика | Значения F - статистик и решения $\gamma_0$ или $\gamma_1$ |                       |                      |                      |                      |
|----------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                      |                                     | пыль   | NO <sub>x</sub>       | SO <sub>2</sub>      | CO                   | O <sub>2</sub>       |
|                      |                                     | 1  | 2                     | 3                    | 4                    | 5                    |
| 3                    | $F^{(2)}$                           | 0,5542( $\gamma_0$ )                                       | 14,4815( $\gamma_1$ ) | 1,670( $\gamma_0$ )  | 0,2973( $\gamma_0$ ) | 1,1762( $\gamma_0$ ) |
|                      | $F^{(3)}$                           | 0,9301( $\gamma_0$ )                                       | 0,1263( $\gamma_0$ )  | 2,4998( $\gamma_0$ ) | 2,1363( $\gamma_0$ ) | 0,4375( $\gamma_0$ ) |
| 4                    | $F^{(2)}$                           | 0,1203( $\gamma_0$ )                                       | 31,278( $\gamma_1$ )  | 26,975( $\gamma_1$ ) | 1,4452( $\gamma_0$ ) | 2,059( $\gamma_0$ )  |
|                      | $F^{(3)}$                           | 0,5555( $\gamma_0$ )                                       | 5,9624( $\gamma_1$ )  | 27,937( $\gamma_1$ ) | 1,4664( $\gamma_0$ ) | 0,6873( $\gamma_0$ ) |
| 5                    | $F^{(2)}$                           | 0,8722( $\gamma_0$ )                                       | 21,321( $\gamma_1$ )  | 44,448( $\gamma_1$ ) | 0,0951( $\gamma_0$ ) | 3,0374( $\gamma_0$ ) |
|                      | $F^{(3)}$                           | 0,2389( $\gamma_0$ )                                       | 5,4653( $\gamma_1$ )  | 9,110( $\gamma_1$ )  | 2,7703( $\gamma_0$ ) | 0,9016( $\gamma_0$ ) |
| 6                    | $F^{(2)}$                           | 0,9826( $\gamma_0$ )                                       | 24,523( $\gamma_1$ )  | 24,691( $\gamma_1$ ) | 1,5699( $\gamma_0$ ) | 2,243( $\gamma_0$ )  |
|                      | $F^{(3)}$                           | 0,7159( $\gamma_0$ )                                       | 16,7536( $\gamma_1$ ) | 5,0655( $\gamma_1$ ) | 0,4453( $\gamma_0$ ) | 0,685( $\gamma_0$ )  |
| 7                    | $F^{(2)}$                           | 7,294( $\gamma_0$ )  | 31,537( $\gamma_1$ )  | 1,6128( $\gamma_0$ ) | 15,964( $\gamma_1$ ) | 0,6184( $\gamma_0$ ) |
|                      | $F^{(3)}$                           | 1,7849( $\gamma_0$ )                                       | 2,3756( $\gamma_0$ )  | 4,3516( $\gamma_1$ ) | 4,599( $\gamma_1$ )  | 0,6402( $\gamma_0$ ) |
| Статистика $F^{(0)}$ |                                     | 0,0017( $\gamma_0$ )                                       | 16,283( $\gamma_1$ )  | 3,886( $\gamma_0$ )  | 15,069( $\gamma_1$ ) | 4,175( $\gamma_0$ )  |

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богданович И. Автоматизированные системы контроля и учета выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферу / И. Богданович // Энергетика и ТЭК. - №2. – 2010. – с. 14 – 18.
2. Гейко О.Н., Акмедзянов И.Ш., Цвельх Ю.М. Автоматизированный многокомпонентный контроль выбросов промышленных объектов в атмосферу / О.Н.Гейко, И.Ш. Акмедзянов, Ю.М. Цвельх // Технология и конструирование электронной аппаратуры. - №5. – 2003.- с.18-22
3. У. Марікуца. Особливості побудови програмного забезпечення системи моніторингу навколишнього середовища / У. Марікуца, Б. Березнюк, І. Фармага // Lviv Politechnic National University Institutional Repository <http://ena.lp.edu.ua> 2011. – с.31-34
4. Хватов В.Ф. Научные основы методов и средств контроля экологического состояния автотранспорта и его воздействия на окружающую среду: дисс. докт. техн. наук: 05.11.13/Владимир Филиппович Хватов –СП.; 2007. – 332 с.
5. Шестопалов А.В., Повышение точности контроля концентрации выбросов в атмосфере города стационарными источниками: дисс. канд. техн. наук: 05.11.13./ Александр Владимирович Шестопалов – Омск.; 2007. – 114 с.
6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. Пер. С англ.. Н. Джонсон, Ф. Лион. М.: Мир,1981. – 520 с.

## КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА- ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

### CONTROL LEVEL PROFESSIONAL RELIABLE PERSON-OPERATOR-PROBLEMS AND SOLUTIONS

*Студент А.Н. Охрименко, руководители В.Г. Брусенцов, О.В. Брусенцов*

*Украинский государственный университет железнодорожного транспорта*

**Аннотация.** Рассматривается вопрос создания информационной экспертной системы контроля уровня профессиональной надежности человека-оператора.

**Ключевые слова:** профессиональная надежность, объективная оценка

**Анотація.** Розглядається питання створення інформаційної експертної системи контролю рівня професійної надійності людини-оператора.

**Ключові слова:** професійна надійність, об'єктивна оцінка

**Annotation** The question of creating an information expert system controls the level of professional reliability of the human operator.

**Keywords:** professional reliable, objective evaluation

**Вступление.** Безопасность движения является главной задачей любого вида транспорта, в том числе железнодорожного. Ее обеспечению существенно помогает внедрение информационных и экспертных систем, позволяющих, используя