

УДК 519.71

Е. И. КУЧЕРЕНКО, И. С. ГЛУШЕНКОВА, С. А. ГЛУШЕНКОВ

РАСШИРЕНИЕ СЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ И НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ

Рассмотрены расширения сетевых моделей на основе интеграции стохастических моделей и нечетких графов. Показано, что создание гибридных моделей интегрирует достоинства частных моделей и исключает из рассмотрения недостатки этих моделей. Исследованы стохастические и нечеткие графы, которые являются модификацией графической модели оценки и пересмотра планов (ГЕРТ) и if/then-моделей. Исследование моделей показало достоинства и недостатки моделей, эффективность подходов подтверждена экспериментально в географических информационных системах.

Ключевые слова: нечеткая сеть Петри, ГЕРТ-сети, стохастические и нечеткие графы, сетевые модели

Введение. Широкое использование геоинформационных технологий в управлении территориями создает необходимость исследования задач моделирования процессов оценивания сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности, характеризующихся пространственным распределением, взаимодействием и параллельной обработкой данных и знаний, влиянием субъективного фактора при принятии управленческих решений [1, 2]. Такие объекты выполняют свои функции на множестве взаимодействующих динамических процессов, которые носят детерминированный (D), вероятностный или стохастический (P), нечеткий (\tilde{F}) характер. Процессы D , P достаточно исследованы в научной литературе [3, 4], при этом проблема снижения уровня неопределенности остается актуальной и требует дополнительных исследований. Исходя из постулата о моделировании, как процессе снижения уровня неопределенности системы [5], рассмотрим расширение сетевых моделей на основе интеграции стохастических и нечетких графов для повышения эффективности моделей, что является важным и актуальным.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Часть процессов и явлений функционируют в условиях неопределенности [2], характеризуются нечетким пространством состояний [1]. Другая часть характеризуется стохастической природой [6]. Комбинации процессов и явлений различной природы требует новых интеллектуальных подходов для повышения эффективности принятия решений [5]. Нужно отметить, что они характеризуются функциональной и территориальной распределенностью [2], сложной иерархией взаимодействия их компонент [7, 8]. Существующие подходы для анализа [8, 9] обычно функционально ограничены, в ряде случаев они не дают практических подходов к решению поставленных задач.

Постановка проблемы: пусть задана сетевая модель \tilde{S}_Ω [10]. Процессы представлены на основе детерминированных – D , вероятностных (стохастических) – S , и нечетких отображений – $\tilde{F}(\tau)$. Модель на основе нечеткой сети Петри, ориентированная на моделирование дискретных процессов, ограничена функционально. Это требует создания гибридных моделей [4, 11].

Цель и задачи исследования. Целью поставленной проблемы является снижение уровня неопределенности на основе моделирования процессов новыми гибридными моделями, повышение эффектив-

ности программных приложений. Актуальность исследований является важной составляющей при проектировании систем [1 – 3].

В работе необходимо:

- предложить структуру гибридной модели на основе интеграции стохастических и нечетких графов;
- предложить расширение модели \tilde{S}_Ω функционально для решения широкого класса задач;
- определить множество ограничений на использование стохастических и нечетких графов;
- выполнить экспериментальные исследования для выявления эффективности рассматриваемых моделей и процессов.

Развитие сетевых моделей в задачах управления ресурсами с использованием ГИС и технологий. Можно представить сетевую модель в виде [1, 10].

$$\tilde{S} = \langle \tilde{P}, \tilde{T}, \tilde{F}, \tilde{M}_o, \tilde{L} \rangle, \quad (1)$$

где $\tilde{P}: \mu(x) \rightarrow [0,1]$ – нечеткое множество позиций; $\tilde{T}: \mu(x) \rightarrow [0,1]$ – нечеткое множество переходов; $\tilde{F} = \tilde{F}: (\tilde{P} \times \tilde{T}) \cup (\tilde{T} \times \tilde{P}) : \mu(x, y) \rightarrow [0,1]$ – нечеткая функция инцидентов; \tilde{M}_o – вектор нечеткой начальной маркировки нечетких позиций; $L = \{\tilde{L}_i\}$ – обобщенный предикат, $i \in I$.

Для полного выполнения типичной сети проекта необходимо выполнение всех дуг. Под выполнением дуг и узлов сети понимают выполнение соответствующих операций [6] – $\forall \tilde{P}_j \in \tilde{P} | \tilde{M}_{P_j} \neq \emptyset$.

Узлы стохастической сети могут быть интерпретированы как состояния системы, а дуги – как переходы из одного состояния в другое [6]. Такие переходы можно рассматривать как выполнение обобщенных операций, характеризуемых плотностью распределения или функцией массы и вероятностью выполнения [6].

Детерминированные сети могут быть представлены на основе дискретных и непрерывных процессов [12].

Для расширения процессов моделирования используют расширения на основе искусственных нейронных сетей [1], что вызывает определенные трудности в обучении и интерпретации результатов [1, 13].

Случай 1. Рассмотрим расширение (1) на основе стохастических графов [6]

© Е. И. Кучеренко, И. С. Глушенкова, С. А. Глушенков. 2015

$$G = \langle V, N \rangle, \tag{2}$$

где V – множество вершин; N – множество отношений.

Утверждение 1. Если существует S_Ω , множество вершин P и T , а также определена функция распределения вероятности

$$P(x, y) \neq 0 \tag{3}$$

случайной величины, то представление вершин из (3) $\tilde{P}: \langle V, N \rangle$ повышает эффективность системы.

Действительно, при выборе альтернатив из

$$Alt_\alpha \in \{Alt_\alpha\}, \alpha \in A \tag{4}$$

и наличии $P(x, y) \neq 0$ позволяет выбрать на основе (3) функционала

$$P(x, y) \xrightarrow{Alt_\alpha \in \{Alt_\alpha\}, P \geq P^*} \max. \tag{5}$$

Следствие 1. При вычислении (5) мы представляем результат как альтернативу на некоторых позициях из $P_\alpha \subseteq P$.

Случай 2. При условии, что

$$P(x, y) = \begin{cases} 0, \\ P(x, y) = false, \end{cases} \tag{6}$$

а также $\tilde{F}_\alpha: \mu(x) \neq 0$, возникает задача оценки альтернатив по критерию max четкости.

Утверждение 2. Если существует $P(x, y) = 0$, а также $\tilde{F}_\alpha \neq 0$, то поиск альтернатив из $\tilde{Alt}_\alpha \in \{\tilde{Alt}_\alpha\}, \alpha \in A$ может быть определен в виде:

$$\tilde{F}(x) \xrightarrow{\tilde{Alt}_\alpha \in \{\tilde{Alt}_\alpha\}, \mu(x)_0 \geq \mu(x)_0^*} \max. \tag{7}$$

Следствие 2. При вычислении (7) представляем результат как альтернативу на некоторых позициях из $P_\alpha \subseteq P$.

Рассмотрим некоторый пример функционирования объекта на основе нечеткого оператора (рис. 1).

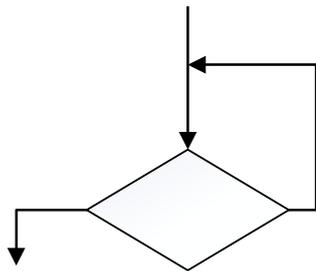


Рис. 1 – Схема логического оператора «или»

На рис. 2 предложен фрагмент сети Петри итерационных процедур (рис. 1). В табл. 1 приведены параметры сети Петри.

Таблица 1 – Параметры сети Петри

Позиция	\tilde{P}_1	\tilde{P}_2	\tilde{P}_3	\tilde{P}_4
Время τ, c	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
Вероятность	p'_1	p'_2	p'_3	p'_4

Затраты на выполнение всей задачи

$$W_R t_m = \forall \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_j(in)\} | M_{p_j} = A \wedge (\tau_m \cdot p'_m \geq R_2^*),$$

где $A = \forall \tilde{p}_j \in \{\tilde{p}_j(in) | M_{p_j} = 1$.

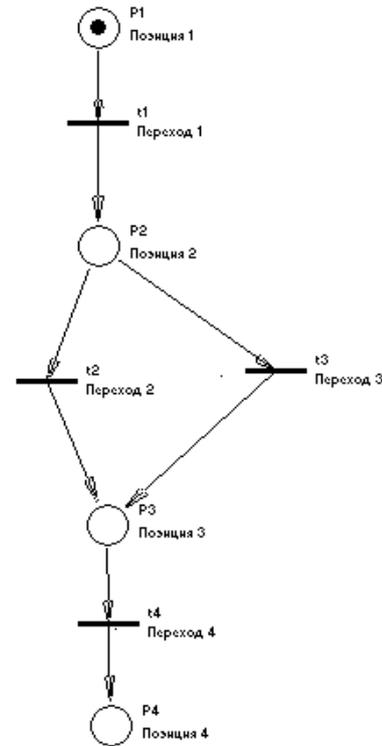


Рис. 2 – Представление фрагмента процесса в виде сети Петри

Используя итерационные процессы на схеме эквивалентного графа (рис. 3), мы можем сформулировать следующее утверждение.

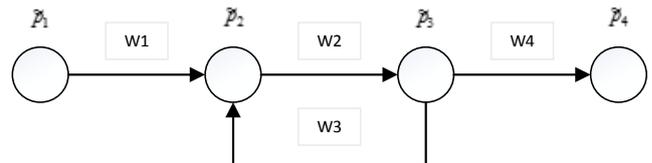


Рис. 3 – Схема эквивалентного графа нечеткой сети Петри

Утверждение 3. Если существует эквивалентный граф, для параметров которого справедливо $\tau_i = const$ – время выполнения i -перехода;

$\mu(x)_i = const$ – функция принадлежности выполнения i -перехода;

$R_i^* = const$ – верхняя оценка отношения $(p, t) \cup (t, p)$, то передаточная функция фрагмента равна

$$W_\Sigma = A \wedge K(2n + 3), \tag{8}$$

где $K = \tau_i: \mu(x)_i \geq R_i^*$; n – число итераций.

Действительно, приняв, что существуют циклы

- 1) $W_2 + W_3$;
- 2) $W_2 + W_3$;
- 3) $W_2 + W_3$;
- ...
- n) $W_1 + (W_2 + W_3)n + W_2 + W_4$,

для которых справедливо

$$\begin{aligned}
 W_{R^*t_1} &= \forall_{pj} \in \{p_i(in)\} | M_{pj} = 1 \wedge \tau_1 \cdot \mu'_1 \geq R_1^* ; \\
 W_{R^*t_2} &= \forall_{pj} \in \{p_i(in)\} | M_{pj} = 1 \wedge \tau_2 \cdot \mu'_2 \geq R_2^* ; \\
 W_{R^*t_3} &= \forall_{pj} \in \{p_i(in)\} | M_{pj} = 1 \wedge \tau_3 \cdot \mu'_3 \geq R_3^* ; \\
 W_{R^*t_4} &= \forall_{pj} \in \{p_i(in)\} | M_{pj} = \\
 &= 1 \wedge \tau_4 \cdot p'_4 \geq R_4^* \wedge (\tau_3 \cdot \mu'_3 \leq R_3^*), R_i^* \neq R_{i+\alpha}^* ; \\
 &..... \\
 W_{R^*t_m} &= A \wedge \tau_m \cdot \mu'_m \geq R_m^*, R_i^* \neq R_{i+\alpha}^*,
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

тогда окончательно получим (8).

Задав значения параметров: $\tau_i = 10,0c, \tau_i = const$, $\mu(x)_i = 0,99$, $\mu(x)_i = const$, $R^* = 5,0$; $R^* = const$, $n = 10$, получим из (8) с учетом (9), (10) $W_\Sigma = 0,99 \cdot 10 \cdot (2 \cdot 10 + 3) = 227,7c$.

Результаты исследований эффективности применения ГЕРТ-технологий

Представим структуру стохастического графа [6] в виде (рис. 4) с петлями. Эквивалентный граф представлен на рис. 5.

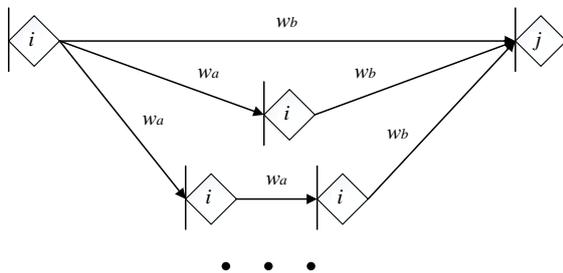


Рис. 4 – Структура стохастического графа с петлями

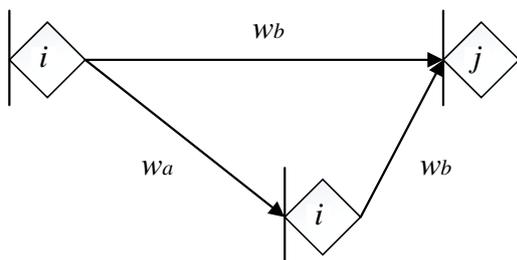


Рис. 5 – Эквивалентный граф

Используя эквивалентный граф (рис. 5), определим вес петли [6]

$$W_{ij} = W_b \left(1 + \sum_{m=1}^{\infty} W_a^m \right) \tag{11}$$

Представив значения $\tau = 10c = const$, $p' = 0,99 = const$, $W_b \approx 9,9c$, $W_a \approx 9,9c$, $n = 10$, в (11) получим

$$W_{ij} = 9,9 \cdot (1 + 9,9 + 9,9^2 + 9,9^3 + \dots + 9,9^{10}) .$$

Тогда, согласно (11) $W_{ij} \gg W_\Sigma$, что подтверждает эффективность случая 2 по отношению к случаю 1.

Следствие для случаев 1 и 2. Замечание справедливо, если $\tau = const$, $p' = const$, $\mu = const$.

Обсуждение результатов оценки эффективности разработанных гибридных моделей. В работе предложены результаты разработки и исследований гибридных моделей на основе интеграции стохастических и нечетких графов.

Показано, что стохастические графы реализуют совместно с нечеткой сетью Петри (1) гибридную модель, эффективность которой показана в виде решения функционала (5). В задачах выбора альтернатив, на основе правила Мейсона, выполнены расчеты по оценке временных затрат W_{ij} . Для нечетких графов (7) на основе эквивалентного нечеткого графа W_Σ определено, что $W_{ij}(\tau) \gg W_\Sigma(\tau)$ при условии $\tau = const$, $\mu = const$, $p' = const$.

Оценка вычислительной сложности на основе интеграции нечеткой сети Петри и нечеткого графа. Пусть задана передаточная функция нечеткого графа

$$W_\Sigma = A \wedge K(2n + 3) . \tag{12}$$

Утверждение 4. Если задана функция (13) и $A = const, K = const$, то вычислительная сложность является линейной $O = a_1n + a_0$ или

$$O(\tau) \approx O(n) , \tag{13}$$

где $O(\tau)$ – вычислительная сложность, n – число итераций.

Достоверность утверждения подтверждена экспериментально (рис. 6).

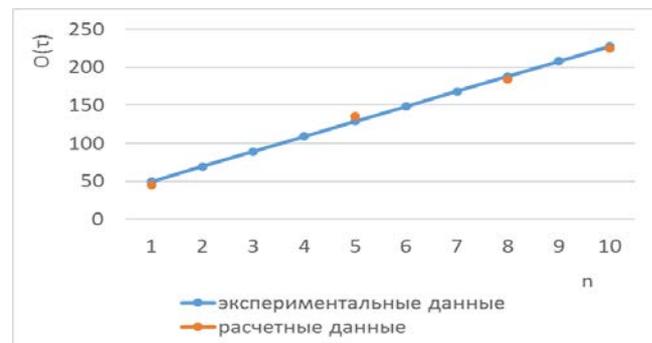


Рис. 6 – Зависимость вычислительной сложности от числа итераций

Экспериментом подтверждена адекватность модели по критерию вычислительной сложности, причем

$$|\epsilon^{(p)} - \epsilon^{(s)}| < \epsilon^* ,$$

где ϵ^* – норма ошибки.

Выводы

1. Выполнен анализ литературных источников, определены актуальность, цели и задачи исследований. Сформулирована постановка проблемы.

2. Предложена структура гибридной модели на основе интеграции стохастических и нечетких графов, которая является развитием существующих сетей Петри.

3. Предложено расширение модели \tilde{S}_Ω , которая функционально расширяет возможности для решения широкого класса задач. Модель функционирует на множестве ограничений на параметры стохастических и нечетких графов.

4. Выполнены экспериментальные исследования для выявления эффективности рассматриваемых моделей и процессов, подтверждена адекватность модели и процессов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках исследований госбюджетной НИР «Нейро-фаззи системы для текущей кластеризации и классификации последовательностей данных в условиях их искривления отсутствующими и аномальными наблюдениями» (No гос. регистрации 0113U000361).

В рамках выполняемой НИР решены также задачи практической реализации и внедрения на реальных объектах.

Список литературы: 1. Бодянский, С. В. Нейро-фаззи моделі в системах штучного інтелекту [Текст] / С. В. Бодянский, С. І. Кучеренко. – Х. : ХНУРЕ, 2006. – 177 с. 2. Танака, К. Итоги рассмотрения факторов неопределенности и неясности в инженерном искусстве [Текст] / К. Танака // Нечеткие множества и теория возможностей. – М. : Радио и связь, 1986. – С. 37–50. 3. Сироджа, И. Б. Квантовые модели и методы инженерии знаний в задачах искусственного интеллекта [Текст] / И. Б. Сироджа // Искусственный интеллект. – СПб.: «Наука і освіта», 2002. – No 3. – С. 161–171. 4. Анализ проблем использования математических моделей для снижения уровня неопределенности принятия УР... [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=45888>. 5. Вейцман, К. Распределенные системы мини- и микроЭВМ [Текст] / К. Вейцман. – М. : Финансы и статистика, 1983. – 362 с. 6. Филлипс, Д. Методы анализа сетей [Текст] / Д. Филлипс, А. Гарсия-Диас. – М. : Мир, 1984. – 496 с. 7. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем [Текст] / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М. : Мир, 1976. – 344 с. 8. Дмитриев, А. К. Основы теории построения и контроля сложных систем [Текст] / А. К. Дмитриев, П. А. Мальцев. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 192 с. 9. Глушков, В. М. Моделирование развивающихся систем [Текст] / В. М. Глушков, В. В. Иванов, В. М. Яненко. – М. : Наука, 1983. – 350 с. 10. Кучеренко, С. І. Геоінформаційні технології та фаззи-моделі в управлінні складними об'єктами [Текст] / С. І. Кучеренко, І. С. Глушенкова, С. О. Глушенко // Системи обробки інформації, 2014. – No 6. – С. 46–50. 11. Колесников, А. В. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем [Текст] / А. В. Колесников, И. А. Кириков. – М. : ИПИ РАН, 2007. – 387 с. 12. Котельников, В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи [Текст] / В. А. Котельников // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи в журнале УФН, 176:7 (2006). – С. 762–770. 13. Бодянский, С. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения [Текст] / С. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Х. : ТЕЛТЕХ, 2004. – 369 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bodjans'kij, Ye., Kucherenko, Ye. (2006). Neiro-fazzi modeli v sistemah shtuchnogo intelektu. Harkiv: HNURE, 177. 2. Tanaka, K. (1986). Itogi rassmotrenija faktorov neopredelennosti i nejasnosti v inzhenernom iskusstve. Nечetkie mnozhestva i teorija vozmozhnostej. Moscow: Radio i svjaz', 37–50. 3. Sirodzha, I. (2002). Kvantovye modeli i metody inzhenerii znaniy v zadachah iskusstvennogo intellekta. Iskusstvennyj intellekt. IPSH: «Nauka i osvita», 3, 161–171. 4. Analiz problem ispol'zovanija matematicheskijh modelej dlja snizhenija urovnja neopredelennosti prinjatija UR... – Rezhim dostupa: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=45888>. 5. Vejzman, K. (1983). Raspredelennye sistemy mini- i mikroEVM. Moscow: Finansy i statistika, 362. 6. Fillips, D., Garsia-Dias, A. (1984). Metody analiza setej. Moscow: Mir, 496. 7. Mesarovich, M., Mako, D., Takahara, I. (1976). Teorija ierarhicheskijh mnogourovnevnyh sistem. Moscow: Mir, 344. 8. Dmitriev, A., Mal'cev, P. (1988). Osnovy teorii postroenija i kontrolja slozhnyh sistem. Leningrad: Energoatomizdat, Leningr. otd-nie, 192. 9. Glushkov, V., Ivanov, V., Janenko, V. (1983). Modelirovanie razvivajushhijhsja sistem. Moscow: Nauka, 350. 10. Kucherenko, Ye., Glushenkova, I., Glushenkov, S. (2014). Geoinformacijni tehnologii' ta fazzi-modeli v upravlinni skladnymy ob'jektamy. Sistemy obrabotki informacii, 6, 46–50. 11. Kolesnikov, A., Kirikov, I. (2007). Metodologija i tehnologija reshenija slozhnyh zadach metodami funkcional'nyh gibridnyh intellektual'nyh sistem. Moscow: IPI RAN, 387. 12. Kotel'nikov, V. (2006). O propusknokj sposobnosti jefira i provoloki v telectrosvjazi. Materialy k I Vsesozuznomu s'ezdu po voprosam tehnicheckoj rekonstrukcii dela svjazj i razvitija slabotochnoj promyshlennosti, 1933. Reprint stat'i v zhurnale UFN, 176:7, 762–770. 13. Bodjanskij, Ye., Rudenko, O. (2004). Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primenenija. Harkov: TELETEH, 369.

Поступила (received) 16.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кучеренко Євген Іванович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри штучного інтелекту; пр. Леніна, 14, м. Харків, Україна, 61166;

Кучеренко Євгеній Іванович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри искусственного интеллекта; пр. Леніна, 14, г. Харьков, Украина,

Kucherenko Yevgeny – Dr.Sc., Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics; Lenin Ave, 14, Kharkiv, Ukraine, 61166; tel. (057) 702-13-37.

Глушенкова Ірина Сергіївна – кандидат технічних наук, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри геоінформаційних систем, оцінки землі та нерухомого майна; вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057)-707-33-29; e-mail: irina.glushenkova@kname.edu.ua.

Глушенкова Ірина Сергеевна – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, доцент кафедры геоинформационных систем, оценки земли и недвижимого имущества; ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057)-707-33-29;

Glushenkova Irina – Ph.D., Associate professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; Revolutsii street, 12, Kharkiv, Ukraine, 61002; tel.: (057)-707-33-29

Глушков Сергій Олександрович – Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, аспірант; вул. Революції, 12, м. Харків, Україна, 61002; тел.: (057)-707-33-58;

Глушков Сергей Александрович – Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова, аспирант; ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002; тел.: (057)-707-33-58;

Glushenkov Sergey – Postgraduate student, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv; Revolutsii street, 12, Kharkiv, Ukraine, 61002; tel.: (057)-707-33-58; e-mail: serge.glushenkov@kname.edu.ua.