

УДК 004.93: 621.313

**Г.Х.М. Аль-Джасри**  
**В.А. Болтенков**, к. т. н.,  
**П.П. Червоненко**, к. т. н.

### АЛГОРИТМЫ КООПЕРАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ТЕЧИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКУСТИЧЕСКОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

***Аннотация.** Исследованы алгоритмы кооперативного обнаружения сигнала течи теплоносителя в акустической сенсорной сети. Для энергетического детектора Прайса-Урковитца построены решающие правила и получены выражения показателей качества обнаружения. Рассмотрено кооперативное обнаружение сигнала по правилам AND, OR, MAJORITY. Путем компьютерного моделирования построены ROC-кривые, характеризующие качество обнаружения. Показатели качества исследованы по AUC и  $d_{01}$  критериям.*

***Ключевые слова:** течь теплоносителя, акустическая сенсорная сеть, кооперативное обнаружение, ROC-кривая.*

**Аль-Джасри Г.Х.М.,**  
**В.О. Болтъонков**, к. т. н.,  
**П.П. Червоненко**, к. т. н.

### АЛГОРИТМИ КООПЕРАТИВНОГО ДЕТЕКТУВАННЯ ТЕЧІ ТЕПЛОНОСІЯ В АКУСТИЧНІЙ СЕНСОРНІЙ МЕРЕЖІ

***Анотація.** Досліджено алгоритми кооперативного детектування сигналу течії теплоносія в акустичній сенсорній мережі. Для енергетичного детектора Прайса-Урковитця побудовані вирішальні правила та отримані вирази показників якості детектування. Розглянуто кооперативне детектування за правилами AND, OR, MAJORITY. Шляхом комп'ютерного моделювання побудовано ROC-криві, що характеризують якість детектування. Показники якості досліджено за AUC та  $d_{01}$  критеріями.*

***Ключові слова:** течія теплоносія, акустична сенсорна мережа, кооперативне детектування, ROC-крива.*

**Al-Jasri G. Kh. M.**  
**V.A. Boltenkoy, PhD.,**  
**P.P. Chervonenko, PhD.**

### ALGORITHMS OF COOPERATIVE HEAT TRASFER LEAK DETECTION IN ACOUSTIC SENSOR NETWORK

***Abstract.** The algorithms of heat transfer leak cooperative detection in acoustic sensor network have been studied. The decision rules for Price-Urcovitz's energy detector have been obtained. The expressions for quality indicators have been produced. The quantitative quality criteria of the skeleton were introduced. ROC-curves characterizing detection quality have been built with computer simulation. The quality indicators have been studied by AUC and  $d_{01}$  criteria.*

***Keywords:** heat transfer leak, acoustic sensor network, cooperative detection, ROC-curve.*

**Введение.** Своевременное обнаружение и локализация течей теплоносителя в теплотехническом оборудовании является важной практической задачей. С одной стороны обнаружение течей предохраняет от повреждения основной металл теплоэнергетической установки, с другой стороны – позволяет уменьшить энергетические потери. Одной из прогрессивных технологий обнаружения и локализаций таких течей является применение акустических сенсорных сетей (АСС) –

системы пространственно разнесенных по технологическому помещению микрофонов, регистрирующих интенсивный акустический сигнал, который возникает в месте истечения перегретого теплоносителя. Для решения задачи определения места течи (локализации) предложен ряд методов, основанных на технологии TDOA [1-3]. В то же время установлено, что задача локализации течи является вычислительно трудоемкой процедурой, требующей существенных компьютерных ресурсов [1]. Поэтому этапом, пред-

шествующим этапу локализации, должна быть процедура обнаружения сигнала течи с бинарным решением. Задача обнаружения сигнала одиночным приемником известна для некоторых моделей сигналов [4], в то же время решение задачи кооперативного обнаружения в АСС с оценками показателей качества обнаружения авторам не известно.

**Целью данной работы** является исследование кооперативных алгоритмов обнаружения сигнала течи в АСС и выбор правил, обеспечивающих наилучшие показатели качества обнаружения.

Для достижения цели решены следующие задачи:

- построение модели энергетического обнаружителя широкополосного акустического сигнала,
- аналитическая оценка показателей качества кооперативного обнаружения сигнала в АСС,
- моделирование кооперативного обнаружения с оценкой показателей качества.

### Основная часть

Акустический сигнал, сопровождающий и перегретого теплоносителя через дефект в основном металле, представляет собой широкополосный случайный процесс типа «розового шума» со спектральной плотностью мощности вида  $Af^{-1}$  ( $f$  – частота), лежащий в частотном диапазоне (20–40000) Гц [5].

Рассмотрим задачу обнаружения широкополосного сигнала одиночным акустическим сенсором, предполагая шумы аддитивными и гауссовыми. Задача обнаружения случайных сигналов на фоне аддитивного гауссова шума  $n(t)$  является задачей с предельным уровнем априорной определенности. Показано [6], что оптимальные обнаружители таких сигналов чрезвычайно трудоемки в практической реализации, поэтому наиболее простым в такой ситуации является применение энергетического обнаружителя Прайса-Урковитца [7].

Структурная схема одноканального широкополосного энергетического обнаружителя приведена на рис.1 и содержит полосовой фильтр с достаточно широкой полосой пропускания (широкополосный фильтр –

ШПФ), квадратичный детектор, интегратор и устройство сравнения. Такой обнаружитель

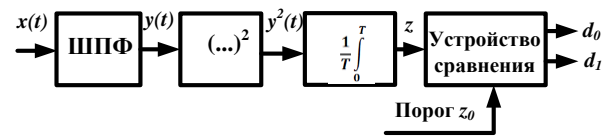


Рис.1. Структура энергетического обнаружителя

обеспечивает измерение энергии принятой реализации в пределах конечного времени интегрирования  $T$  и сравнение выходного сигнала интегратора  $z$  с порогом  $z_0$  для принятия решения. Алгоритм обнаружения имеет вид: принимается решение  $d_1$  о наличии сигнала  $s(t)$ , если статистика  $z \geq z_0$ , и решение  $d_0$  об отсутствии сигнала, если  $z < z_0$ :

$$z = T \int_0^T y^2(t) dt \begin{cases} \geq z_0 \Rightarrow; \text{сигнал есть}; \\ < z_0 \Rightarrow; \text{сигнала нет} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $y(t)$  - выходной сигнал полосового фильтра,

$$y(t) = \begin{cases} s(t) + n(t), & \text{сигнал плюс шум,} \\ n(t), & \text{шум.} \end{cases} \quad (2)$$

При отсутствии сигнала (гипотеза  $H_0$ ) выходная статистика интегратора  $z$  описывается центральным  $\chi^2$ -распределением с  $2u$  степенями свободы:  $z \sim \chi_{2u}^2$ ,  $u = \lfloor TW_s \rfloor$ ,  $W_s$  - ширина полосы пропускания полосового фильтра,  $\lfloor \dots \rfloor$  - символ целой части. При наличии сигнала (гипотеза  $H_1$ )  $z$  описывается нецентральным  $\chi^2$ -распределением, параметр нецентральности распределения  $\psi$  определяется как удвоенное отношения энергии сигнала  $E_s$  к энергии шума  $N$ :  $\psi = \frac{2E_s}{N}$ . Введя отношение сигнал/шум (ОШ)  $\gamma = \frac{E_s}{N}$ , можно связать его с параметром нецентральности  $\psi$ :  $\psi = \frac{\gamma}{2}$ .

Таким образом, статистика  $z$  распределена как

$$z \sim \begin{cases} \chi_{2d}^2 & \text{гипотеза } H_0, \\ \chi_{2d}^2(2\gamma) & \text{гипотеза } H_1 \end{cases} \quad (3)$$

В [8] показано, что вероятности правильного обнаружения  $P_{no}$  и ложной тревоги  $P_{lm}$  для установленного порога  $z$  выражаются как

$$P_{no} = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{z}), \quad (4)$$

$$P_{lm} = \frac{\Gamma(u, \frac{z}{2})}{\Gamma(u)}, \quad (5)$$

где  $Q_u$  - обобщенная Q-функция Маркума [9]

$$Q_u(a, b) = \int_0^\infty \frac{x^u}{a^{u-1}} e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{u-1}(ax) dx. \quad (6)$$

Здесь  $I_{u-1}(\dots)$  - функция Инфельда (модифицированная функция Бесселя 1-го рода) порядка  $(u-1)$ ,  $\Gamma(\dots)$  и  $\Gamma(\dots, \dots)$  - полная и неполная гамма-функция соответственно [9].

Далее перейдем к многоканальному или кооперативному обнаружению сигнала в сети из  $M$  акустических сенсоров (рис.2).

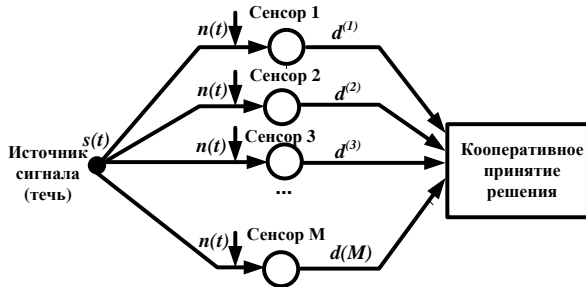


Рис.2. Схема кооперативного принятия решения

Предполагая индивидуальные решения об обнаружении сигнала на одиночных акустических сенсорах  $d^{(i)}$ ,  $(i = 1, \dots, M)$  некоррелированными, вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги в общем случае можно определить выражениями

$$P_{no} = \sum_{l=k}^M C_M^l P_{no,i}^l (1 - P_{no,i})^{M-l}, \quad (7)$$

$$P_{lm} = \sum_{l=k}^M C_M^l P_{lm,i}^l (1 - P_{lm,i})^{M-l}, \quad (8)$$

где  $P_{no,i}$  и  $P_{lm,i}$  ( $i = 1, \dots, M$ ) - соответствующие вероятности обнаружения сигнала оди-

ночным сенсором, определяемые выражениями (4,5).

Рассмотрим три частных случая кооперативного решающего правила.

1. Правило AND. В соответствии с этим правилом решение о наличии сигнала принимается, если на всех сенсорах принято независимое решение о его наличии. Показатели качества кооперативного обнаружения в этом случае можно получить из выражений (7-8), полагая в них  $k = M$  :

$$P_{no,AND} = \prod_{i=1}^M P_{no,i}, \quad (9)$$

$$P_{lm,AND} = \prod_{i=1}^M P_{lm,i}. \quad (10)$$

2. Правило OR. Решение о наличии сигнала принимается, если хотя бы на одном из сенсоров принято независимое решение о его наличии. Для этого случая из выражений (7-8) при  $k = 1$  имеем:

$$P_{no,OR} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{no,i}), \quad (11)$$

$$P_{lm,OR} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - P_{lm,i}). \quad (12)$$

3. Правило MAJORITY. Решение о наличии сигнала принимается при его обнаружении хотя бы половиной сенсоров. Полагая в (7-8)  $k = \lfloor M/2 \rfloor$ , имеем

$$P_{no,MAJORITY} = \sum_{l=\lfloor N/2 \rfloor}^N C_N^l P_{no,i}^l (1 - P_{no,i})^{N-l}, \quad (11)$$

$$P_{lm,MAJORITY} = \sum_{l=\lfloor N/2 \rfloor}^N C_N^l P_{lm,i}^l (1 - P_{lm,i})^{N-l}. \quad (12)$$

Для анализа показателей качества кооперативного обнаружения сигнала в АСС проведено компьютерное моделирование обнаружения сигнала для сети из 25 акустических сенсоров. Алгоритм моделирования выглядит так.

Шаг 1. Задаем вероятность ложной тревоги  $P_{lm}$ .

Шаг 2. Из выражения (5) для заданного  $u = \lfloor TW_s \rfloor$  находим порог  $z$ .

Шаг 3. Из выражения (4) для заданного ОСШ находим вероятность правильного об-

наружения  $P_{no}$ .

Шаг 4. Из выражений (7) – (12) находим  $P_{лт}$  и  $P_{но}$  для соответствующих кооперативных решающих правил.

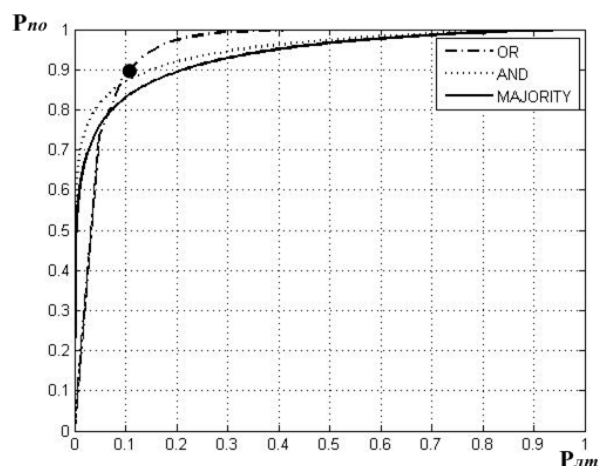
Выбраны типичные для пассивных акустических систем, работающих в условиях интенсивных технологических шумов в помещениях теплоэнергетических объектов, отношения сигнал/шум: 10 дБ (условно высокое ОСШ), 0 дБ (условно среднее ОСШ) и -10 дБ (условно низкое ОСШ). Полоса пропускания ШПФ выбрана равной (5000–15000) Гц, т.е.  $W_s = 1 \cdot 10^4$  Гц. Время интегрирования  $T = 1$  мс. Для вычисления функции Маркума  $Q_u$  применялась ее аппроксимация рядами Неймана [10].

Полученные в результате моделирования рабочие характеристики (ROC-кривые) для отношений сигнал/шум (ОСШ) 10 дБ, 0 дБ, -10 дБ приведены на рис. 3.

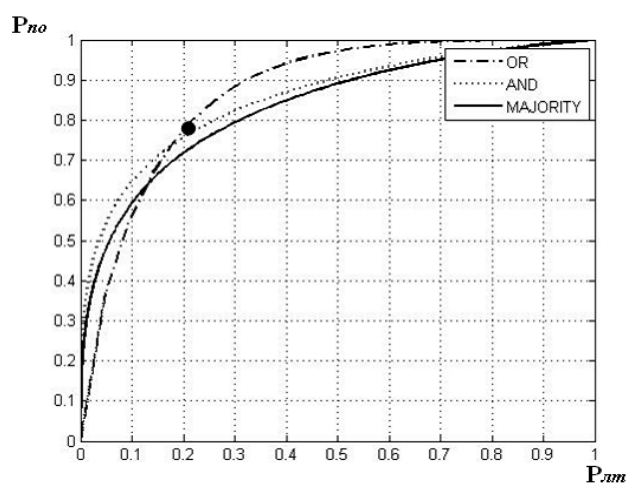
Анализ рабочих характеристик можно провести традиционным методом по показателю площади под ROC-кривой AUC (area under ROC curve). Такой анализ показывает, что по AUC-критерию при любых ОСШ наилучшим является правило OR. В тоже время для высоких ОСШ (рис.3а) правила AND и MAJORITY обеспечивают лучшее качество обнаружения, если в специальных случаях требуется обеспечить низкую вероятность ложных тревог. При средних ОСШ (рис.3б) для малого уровня ложных тревог  $P_{лт}$  предпочтительным является правило AND. Для низких ОСШ (рис.3с) все правила практически эквивалентны, но с точки зрения оперативности функционирования системы удобнее пользоваться правилом OR.

Поставим задачу определения показателей качества обнаружения в другом виде.

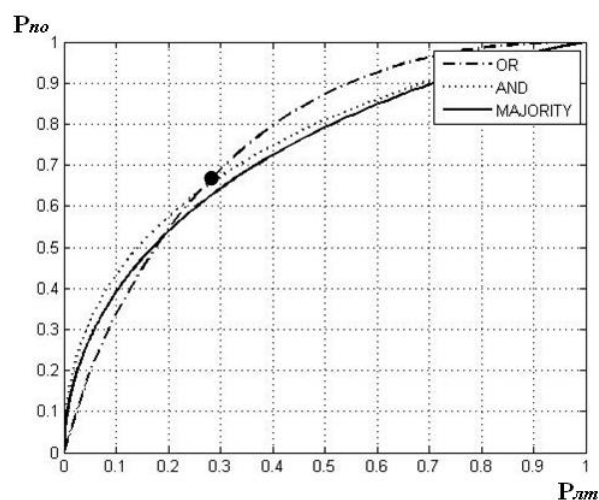
Пусть требуется определить наилучшую рабочую точку ROC-кривой, в которой обеспечивается максимальная вероятность  $P_{но}$  при минимальной вероятности  $P_{лт}$ . Очевидно, что такой точкой является точка ROC-кривой, имеющая минимальное удаление  $d_{01}$  от «идеальной точки» (0,1) (рис.4).



а)



б)



в)

Рис. 3. Рабочие характеристики АСС из 25 сенсоров (а – ОСШ=10 дБ, б – ОСШ=0 дБ, в – ОСШ=-10 дБ)

Назовем такую точку рабочей характеристики точкой, наилучшего качества по  $d_{01}$ -критерию.

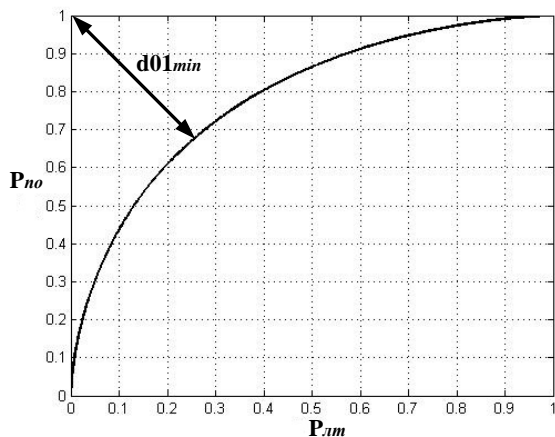


Рис. 4. Точка наилучшего качества ROC-кривой

С точки зрения введенного нового критерия качества можно определить из зависимостей, приведенных на рис.3 (на ROC-кривых отмечены соответствующие точки), что для всех трех вариантов ОСШ по  $d_{01}$ -критерию точка наилучшего качества ROC-кривой соответствует кооперативному правилу OR.

Таким образом, исследование показало, что по обоим рассмотренным критериям для практического применения следует рекомендовать кооперативное правило обнаружения OR.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** В результате исследования получены показатели качества и рекомендации по применению правил кооперативного обнаружения широкополосного сигнала течи теплоносителя в АСС.

В качестве направления дальнейших исследований укажем разработку методов обнаружения, учитывающих спектральные особенности «розового шума».

#### Список использованной литературы

1. Болтенков В.А. Исследование акустических систем мониторинга течей теплоносителя [Текст] / В.А. Болтенков, Г.Х. М. Аль-

Джасри// Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. –Луцьк: – 2015. – Вып.20. – С. 16 – 22.

2. Geiger, G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization [Text] // Oil and Gas European Magazine. – Hamburg: – 2006. – No.4. – P. 193-198. нет города

3. Shahul S. H. Automatic Detection and Analysis of Boiler Tube Leakage System [Text] / S. Shahul Hamid, D. Najumnissa Jamal, Murshitha Shajahan // International Journal of Computer Applications. – Delhi, India: – 2013. – Vol. 84. – No. 16. – P. 19-23.

4. Van Trees H.L.(2001) Detection, Estimation, and Modulation Theory: Radar-Sonar Signal Processing and Gaussian Signals in Noise, Part III. N.– Y., John Wiley & Sons, 626 p.

5. Болтенков В.А. Алгоритмы обработки информации при акустическом бесконтактном поиске протечек на верхнем блоке реактора ВВЭР-1000 [Текст] / В. А. Болтенков, А. В. Королев, М. В. Максимов, О. В. Маслов. // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ: Энергетика. Минск: – 2009. – Вып.3. – С. 67-72.

6. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев – М.: Радио и связь, 2000.– 384 с.

7. Urkowitz H. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals / H. Urkowitz // Proc. IEEE. N.–Y.: – 1967. – Vol. COM-55, No. 4. – P. 523-532.

8. Hossain M. A. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio / M. A. Hossain, M. S. Hossain, M. I. Abdullah // International Journal of Innovation and Applied Studies. – Rabat-Chellah, Morocco:– 2012. – Vol. 1, No. 2. – P. 236-245.

9. Abramowitz M. Handbook of mathematical functions / M. Abramowitz and I. A. N. Stegun . N.–Y.: National Bureau of Standarts.– 1972. – 1046 p.

10. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослу-

чайной последовательностью / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев, Н.П. Мухин, Г.С. Нахмансон. – М.: Радио и связь. – 2003. – 640 с.

Получено 28.02.2016

#### References

1. Boltenev V.A., Al-Jasri G.H.M. Issledovanie akusticheskikh sistem monitoringa techey teplonositelya [The study of acoustic coolant leak monitoring systems] (2015), *Komp'yuterno-integrovani tehnologii: osvita, nauka, virobnitstvo*. – Lutsk, Ukraine, vol.20, pp. 16-22. (In Russian).

2. Geiger, G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization (2006), *Oil and Gas European Magazine*, vol. 4, pp. 193-198.

3. Shahul S. H., Najumnissa D.J., Murshitha S. Automatic Detection and Analysis of Boiler Tube Leakage System (2013), *International Journal of Computer Applications*, vol. 84, no. 16, pp. 19-23.

4. Van Trees H.L. Detection, Estimation, and Modulation Theory: Radar–Sonar Signal Processing and Gaussian Signals in Noise. Part III (2001). N.–Y.: *John Wiley & Sons*. – 626 p.

5. Boltenev V. A., Korolev A. V., Maksimov M. V., Maslov O. V. Algoritmy obrabotki informatsii pri akusticheskom beskontaktnom poiske protechek na verhnem bloke reaktora VVER-1000 [Algorithms for data processing in acoustic contactless leaks finding on the top block of the reactor VVER-1000], (2009) *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG: Energetika*. – Minsk, Belarus, vol. 3, pp. 67-72. (In Russian).

6. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Pomehozaschischennost sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchaynoy perestroyki

rabochey chastoty [Interference immunity of radio systems with the expansion of the signal spectrum by a pseudo-random operating frequency hopping] (2000), Moscow, Russian Federation, *Radio i svyaz*, 320 p. (In Russian).

7. Urkowitz H. Energy Detection of Unknown Deterministic Signals (1967), *Proc. IEEE*, Vol. COM-55, No. 4, pp. 523-532.

8. Hossain M. A., Hossain M. S., Abdullah M. I. Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio (2012), *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 1, No. 2, pp. 236-245.

9. Abramowitz M. and Stegun I. A. Handbook of mathematical functions (1972). N.–Y.: *National Bureau of Standards*, 1046 p.

10. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mulin N.P., G.S. Nahmanson G.S. Pomehozaschischennost sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiy nesuchey psevdosluchaynoy posledovatel-nostyu [Interference immunity system radio spread spectrum signals modulated with carrier pseudo-random sequence] (2003). Moscow, Russian Federation, *Radio i svyaz*, 640 p. (In Russian).



Аль-Джасри  
Гамаль Халед Мохаммед,  
ас. каф. инф. сис.  
Одес. нац. полит. ун-та,  
тел.: (093) 511-14-46,  
email: aljasri@gmail.com



Болтенков  
Виктор Алексеевич,  
к. т. н., доц. каф. инф.  
сис.  
Одес. нац. полит. ун-та,  
тел.: (048) 743-08-15,  
e-mail: vaboltenev@mail.ru



Червоненко  
Петр Петрович, к. т. н.,  
доц. каф. инф. сис.  
Одес. нац. полит. ун-та,  
тел.: (066) 334-68-15,  
e-mail: ppchervonenko@ukr.net