

# КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

S.I. Lukash, I.D. Vojtovich,  
H. Ahlers

## FEATURES OF ACTIVITY OF SEMICONDUCTING SENSOR ARRAY IN A SYSTEM "ELEC- TRONIC NOSE" PART. 1

*The equipment and software for realization of selection of semiconducting sensors used in a system "electronic nose" is designed. On the basis of making mathematical model of interaction of molecules of gas and sensing surface of the sensor the capabilities of their usage for recognition of odors are analyzed.*

*Разработана аппаратура и программное обеспечение для проведения отбора полупроводниковых сенсоров, используемых в системе «электронный нос». На основе построенной математической модели взаимодействия молекул газа и чувствительной поверхности сенсора анализируются возможности их использования для распознавания запахов.*

© С.И. Лукаш, И.Д. Войтович,  
Х. Алерс, 2007

УДК 681.3: 591.3

С.И. ЛУКАШ, И.Д. ВОЙТОВИЧ, Х. АЛЕРС

## ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МАТРИЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИ- КОВЫХ СЕНСОРОВ В СИСТЕМЕ «ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС». Ч.1

**Введение.** Разработка системы распознавания запахов при использовании матрицы сенсоров [1] требует выяснения и оценки способа их применения, методики работы с таким устройством. Актуальность исследований в этом направлении подтверждается многочисленностью различных применений [2]. Это автоматизация технологических процессов, ранняя медицинская диагностика и др.

Как известно, одной из моделей распознавания запаха может быть формирование образа запаха в математическом или графическом представлении. В работах [2, 3] описаны подобные методы и возникающие при этом трудности.

При распознавании обработанный сигнал несет информацию не только о виде определяемого газа, но и о его концентрации.

Авторы работы [4] применили полупроводниковый сенсор с подогревом рабочего слоя и использовали информацию о состоянии слоя при многократном циклическом процессе: выдержка 6 с при  $T = 120$  °С, нагрев до 450 °С и отжиг при этой температуре в течение 0,5 с с последующим охлаждением вновь до рабочей температуры 120 °С для обнаружения задымленности помещения, возникающей при пожаре. Устройство показало хорошие результаты при обнаружении в воздухе газообразного монооксида углерода и водорода в диапазоне их концентраций от 0,001 до 0,01 %.

Альтернативой матричным сенсорам выступают сенсоры с температурным програм-

мированием. Использование температурного программирования, заключающегося в циклическом изменении температуры чувствительного слоя сенсора, позволяет осуществлять селекцию газов при помощи одного чувствительного элемента на основе анализа его динамических характеристик. Принцип селекции основан на том, что различные газы имеют различные скорости адсорбции, реакции и десорбции на поверхности для каждой температуры. Это является причиной того, что при одном и том же ходе изменения температуры сенсора изменение его сопротивления при различных составах окружающей газовой среды должно быть разным. Очевидное преимущество описываемого подхода – его гибкость. Меняя зависимость температуры от времени, можно изменять селективность сенсора к тому или иному газу.

В нашем распоряжении были подобные по конструкции полупроводниковые ( $\text{SnO}_2$ ) сенсоры, изготавливаемые немецкой фирмой [5], которые выпускаются в двух исполнениях: одиночные сенсоры в металлическом корпусе ТО 39 (рис. 1, позиция 1) и мультисенсоры в пластмассовом корпусе DIL (3 слоя на одной подложке, рис. 1, позиции 2, 3). Чувствительные слои нанесены на керамическую подложку размером 2,3 x 2,0 мм, на которой предварительно сформирован платиновый нагреватель.

Такие конструкции имеют разную теплоемкость и теплоотдачу, и в технической характеристике отмечается, что способ их изготовления обеспечивает до 30 % потерь подводимой к нагревателю мощности.

Время установления рабочего состояния сенсоров в матричном и одиночном вариантах исполнения различно. Также оно отличается при использовании различных методик, например, при измерениях состава газа в стационарных или проточных условиях. Если решается задача обнаружения присутствия газа, то ошибка даже в 20 % считается приемлемой. В задаче распознавания и определения концентрации погрешность должна быть значительно ниже. Отмеченные в работах [1, 2, 4] возникающие погрешности при измерениях могут быть связаны также с неучетом этого процесса.

Очевидно, что при изготовлении аналитической системы или узкоспециализированного портативного прибора с подобными сенсорами необходимо знать об изменении его характеристик в зависимости от времени, температуры нагрева, вида и концентрации газа, скорости его прокачки и т.д., которые влияют на показания прибора и отражают специфику методики измерений и свойства сенсоров.

Действующий макет из трех мультисенсоров как аналог 9-элементной матрицы показан на рис. 2. Цифрами 1 – 3 обозначены трехслойные мультисенсоры, 4 и 5 – датчики влажности и температуры соответственно.

Два вида используемых авторами объемов измерительных устройств изображены на рис. 3, а (7,5 мл), 3, б (8 л).

Для проведения испытаний разработан и используется лабораторный стенд позволяющий калибровать, испытывать и выполнять отбор сенсоров. Предусмотрена возможность получения газовых смесей в камере для формирования газовой смеси. Для отработки методик управление блоком питания и балансировки сенсоров осуществляется вручную.

Цель данной работы – исследование реакции чувствительных слоев матричных сенсоров при изменении условий: времени, температуры, газового состояния с возможностью одновременного испытания от 1 до 6 сенсоров.

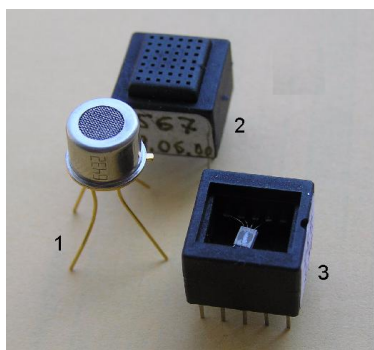


РИС. 1. Сенсоры типа GGS (1) и MGS (2, 3)

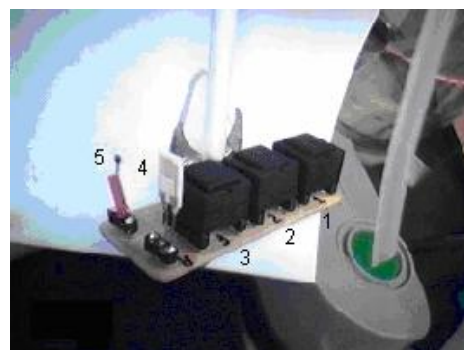


РИС. 2. Плата 11-сенсорного датчика



а



б

РИС. 3. Варианты используемого газового оборудования

**Аппаратура и методы.** Для измерений использовали сенсоры, предоставленные фирмой «Jenasensorgic», подключенный к компьютеру интерфейс с 10-разрядным АЦП и программное обеспечение, разработанное в Институте кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины [6]. Программное обеспечение работает в среде Windows-98/XP.

Использована мостовая схема измерения сопротивления слоев. Вначале мост уравнивается при начальной температуре. При повышении температуры равновесие моста нарушается, что отслеживается в блоке электронного потенциометра. Сигналы с исследуемых сенсоров предварительно усиливаются и преобразуются в напряжение, которое после преобразования в АЦП на плате интер-

фейса в качестве информационного сигнала обрабатывается программным обеспечением в персональном компьютере.

Если сбалансировать мост при оптимальной рабочей температуре сенсора, то установка позволяет проводить калибровку и проверку реакции датчиков на различные газовые составы.

Требования к устройству как стационарному с неперемешиваемой газовой средой, так и проточному определяются выбранной методикой работы в эксперименте. Основные требования: 1) герметичность камеры и подводящих трубок; 2) известный газовый состав внутри камеры для испытаний; 3) стандартная влажность; 4) определенный температурный режим для сенсоров; 5) визуальный вывод информации о сопротивлении газочувствительного слоя; 6) возможность адаптации для работы с различными типами газовых сенсоров.

При исследовании динамических характеристик сенсоров были исследованы зависимости сопротивления слоев сенсора во времени и в определенном интервале рабочих температур. Сопротивление при этом может меняться в диапазоне от сотен Ом до сотен килоОм. Изменение при ступенчатом переходе температур нагрева и для разных газов может происходить от долей секунды до десятка минут.

Устройство используемой конфигурации работает в качестве исследовательской аналитической системы обнаружения и распознавания запахов и газов. Его модификации могут быть в виде портативных приборов для конкретных технических задач.

Методика проведения эксперимента следующая:

- 1) исследуемый и подготовленный сенсор помещают в измерительный объем стационарного или принудительно-проточного типа;
- 2) подключают подачу газа;
- 3) включают программу Multiscan и осуществляют начальную балансировку;
- 4) включают нагрев сенсора;
- 5) после стабилизации режима работы сенсора выключают нагрев;
- 6) продувка измерительного объема воздухом и отжиг сенсора;
- 7) обработка данных.

Сенсоры помещали в измерительный объем и измеряли динамику разогрева и охлаждения каждого из слоев при использовании различных объемов и состояний аналитического газа (воздух) в стандартных условиях:  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $H = 50\%$  и  $P = 750\text{ мм рт. ст.}$  ( $T$ ,  $H$  и  $P$  – температура, относительная влажность и давление соответственно).

Программное обеспечение позволяет устанавливать рабочие режимы устройства и обрабатывать данные по закладываемой математической модели.

**Результаты и обсуждение.** Измерения проводили на полупроводниковых сенсорах с номенклатурными номерами от 1 до 7 [5]. Результаты имели хорошую воспроизводимость.

Такой сенсор можно рассматривать как термо-, газо- и влажочувствительное сопротивление. Общее сопротивление  $R$  полупроводникового материала, который является чувствительным слоем, зависит от температуры и легирующего компонента, обеспечивающего реакцию на определенный газ. При оптимальной

рабочей температуре нагрева сенсоры имеют максимальную чувствительность. Зависимость  $R(T)$  можно представить в виде [7]

$$R_T = f(T) = R_0 \exp\left(\frac{B}{T}\right), \quad (1)$$

где  $R_0$  – начальное сопротивление,  $B$  – электронная постоянная материала чувствительного слоя,  $T$  – температура.

Для оценки чувствительности сенсоров газа, работающих на принципе изменения поверхностной проводимости в зависимости от концентрации молекул газа, использовали относительное изменение сопротивления  $S_I$ :

$$\text{при } R_g > R_0: \quad S_I = \frac{R_g - R_0}{R_0} = \frac{R_g}{R_0} - 1, \quad (2)$$

$$\text{и при } R_0 > R_g: \quad S_I = \frac{R_0 - R_g}{R_g} = \frac{R_0}{R_g} - 1. \quad (3)$$

Здесь  $R_0$  и  $R_g$  – сопротивления в стандартном воздухе и в газе-аналите соответственно. В таком представлении информационный сигнал содержит признаки, способствующие распознаванию газа. В эксперименте в качестве информационного сигнала измеряли напряжение  $U = I \cdot R$  на слое, которое пропорционально его сопротивлению.

Мощность нагревателя расходуется на повышение температуры рабочего элемента и на потери в конструкции.

Уравнение теплового баланса для конструкции сенсора:

$$Q_t = Q_h + Q_l, \quad (4)$$

где  $Q_t$  – подводимая теплота;  $Q_h = cm(T_2 - T_1)$ ,  $Q_l = kQ_t$ ,  $c$ ,  $m$  – теплота нагрева, теплота потерь, теплоемкость и масса конструкции соответственно;  $T_1$  и  $T_2$  – начальная и конечная температура нагрева;  $k$  – коэффициент потерь (по паспорту  $k \cong 0,3$ ).

При включении теплота нагрева рассчитывается по приближенной формуле

$$Q_t = Q_{to} \cdot \exp[-(t - t_d) / \tau_h]. \quad (5)$$

При остывании слоя

$$Q_t = Q_{to} \{1 - \exp[-(t - t_d) / \tau_c]\}. \quad (6)$$

Параметры  $t_d$  и  $\tau$  характеризуют тепловую инерцию.

Длительность переходного процесса определяли по времени уменьшения информационного сигнала в  $e = 2,71$  раз. Время выхода в режим может быть уменьшено за счет включения большей мощности нагревателя [8].

Экспериментальные кривые приведены к виду, удобному для аппроксимации и анализа. Применена линейная фильтрация по 10 точкам для всех слоев.

Аппроксимация была выполнена для характеристического участка зависимости сопротивления слоя от его температуры. Коэффициенты уравнения были оптимизированы по методу наименьших квадратов.

На рис. 4 показана динамика ступенчатого нагрева и охлаждения слоев 1 и 6. Переходный процесс имеет ярко выраженный нелинейный характер с длительным, порядка десятка секунд временем установления более-менее стабильного режима. При этом в области высоких температур сопротивление слоев даже увеличивается. После остывания до начальной температуры сопротивление слоев близко к исходному.

Реакция слоев 1, 3, 4 и 6 на однократный нагрев до 300 °С и последующее охлаждение до 25 °С в стационарной системе показана на рис. 5. Следует отметить, что повышение температуры слоев начинается очень быстро, в пределах времени переключения каналов, равном 10 мс, хотя установление стабильного режима происходит на протяжении нескольких десятков секунд. Характер изменения сопротивления слоев 1 и 6 отличается от слоев 3 и 4, что определяется легирующими добавками.

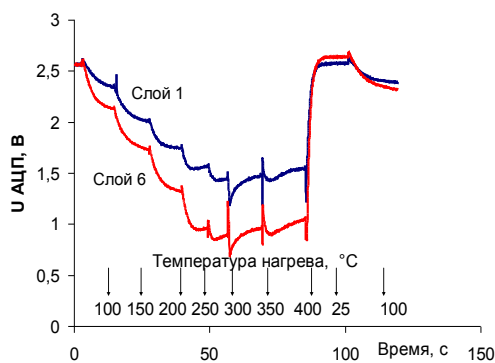


РИС. 4. Ступенчатый нагрев слоев 1 и 6

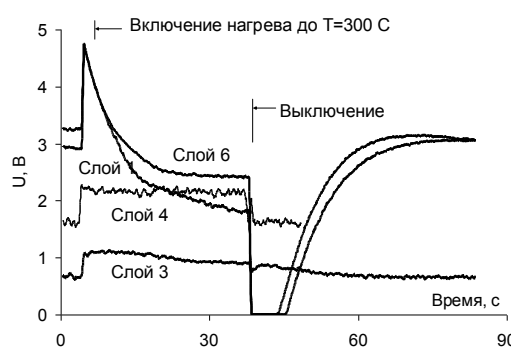
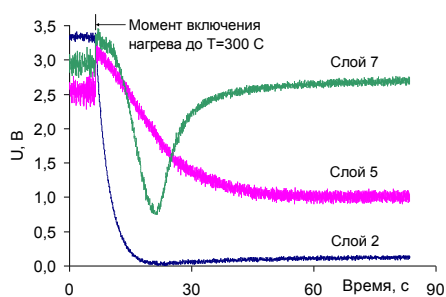
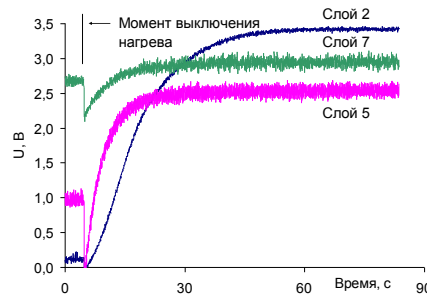


РИС. 5. Циклический нагрев слоев

Ход изменения сигнала во времени для слоев 2, 5 и 7 при нагреве до 300 °С и последующего охлаждения до комнатной температуры показан на рис. 6, а, б.



а



б

РИС. 6. Изменение напряжения на сопротивлении слоев 1 – 7 при нагревании от 25 до 300 °С (а) и остывании от 300 до 25 °С (б)

В начале разогрева существует участок более медленного снижения напряжения, что отражает параметр  $t_d$  в уравнении (6).

Спустя 15 – 25 с после начала разогрева обнаруживается немонотонный характер временной зависимости для слоя 7. Появляется нелинейное возрастание сопротивления слоя, хотя подводимая к нагревателю мощность, обеспечивающая нагрев слоя до 300 °С, оставалась постоянной. У слоя 2 такое свойство было выражено в гораздо меньшей степени.

Изменение напряжения при нагревании для большинства слоев от момента включения до установления стабильного режима может быть аппроксимировано экспериментально подобранным нелинейным уравнением вида

$$U_t = U_o \cdot \exp[-(t-t_d)/\tau_h] + a_1 \cdot t^3 + b_1 \cdot t^2 + c_1 \cdot t + d_1, \quad (7)$$

где  $a, b, c, d$  – коэффициенты;  $t_d$  – длительность задержки;  $t$  – время.

Так как интерес в этой работе представляет переходный процесс, то аппроксимацию целесообразно выполнить только для участка экспоненциального спада. Тогда аппроксимирующее выражение упрощается:

$$U_t = U_o \cdot \exp[-(t-t_d)/\tau_h]. \quad (8)$$

В таблице приведены коэффициенты аппроксимирующего уравнения для всех слоев.

ТАБЛИЦА. Коэффициенты аппроксимирующих уравнений зависимости сопротивления слоя при нагреве и охлаждении

Сенсоры	Номер слоя	Нагрев					Охлаждение				
		$R_o$ , кОм	$t_d$ , с	$\tau_h$ , с	$\nu_h$ , с <sup>-1</sup>	$R^2$	$R_o$ , кОм	$t_d$ , с	$\tau_c$ , с	$\nu_c$ , с <sup>-1</sup>	$R^2$
№ 1	1	2,32	2,1	8,27	0,12	0,98	2,32	2,1	8,27	0,12	0,96
	3		-	$\cong 10^{-2}$	$\cong 10^2$	-	-	-	-	$\cong 10^2$	-
	6	1,35	2,2	5,27	0,19	0,96	1,35	2,25	5,27	0,19	0,97
№ 2	2	3,35	-	3,17	0,32	0,99	3,52	0,09	10,20	0,09	0,98
	5	3,12	-	11,35	0,09	0,96	2,88	0,02	4,50	0,22	0,97
	7	18,03	-	3,13	0,32	0,93	0,90	-0,63	8,10	0,12	0,93
№ 3	4		-	$\cong 10^{-2}$	$\cong 10^2$	-	-	-	-	$\cong 10^2$	-

Примечание:  $R^2$  – величина достоверности аппроксимации.

Параметр  $t_d$  в большей степени проявляется при охлаждении слоев, и большее его значение соответствует большей массе этих слоев. Исходя из полупроводниковой модели [9, 10], параметры  $\tau_h$  и  $\tau_c$  могут свидетельствовать о заполнении и освобождении поверхностных состояний, отвечающих за проводимость слоя в присутствии газа, а им обратные величины  $\nu_h = 1/\tau_h$  и  $\nu_c = 1/\tau_c$  – скорости этих процессов соответственно.

В проточной системе показания сенсоров изменяются. Так, на рис. 7, а, б кривые 1 получены в стационарном состоянии, а кривые 2 – в проточной системе. Сопротивления слоев 1 и 2 в области установившегося режима отличаются примерно на 20 – 30 % при скорости потока воздуха 0,7 м/с.

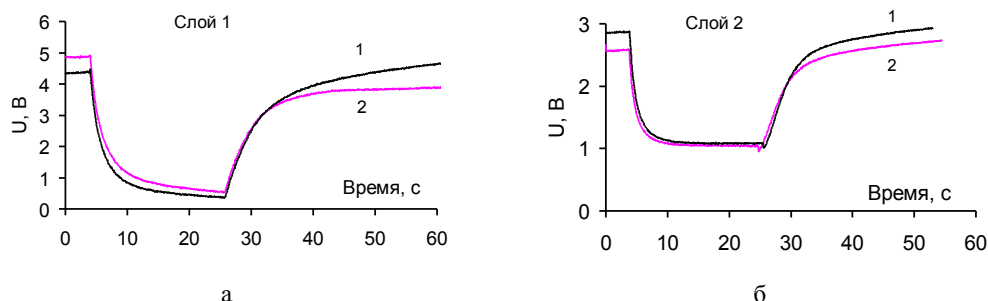


РИС. 7. Влияние состояния газа: стационарное (1) или поток (2) на информационный сигнал для слоев 1 (а) и 2 (б)

Выполненные эксперименты и анализ результатов показывают, что при использовании чувствительных полупроводниковых газовых сенсоров и соответствующей компьютерной системы регистрации и обработки данных возможно определение запаха ацетона в выдыхаемом пациентом воздухе даже при его низких концентрациях. Развитие разработанного подхода для более полного анализа состава воздуха позволит провести раннюю диагностику тех заболеваний человека, которые сопровождаются выделением специфического запаха [11].

**Выводы.** Экспериментально обнаружено, что в температурном диапазоне 100...300 °С наблюдалось изменение характера временных характеристик газочувствительных структур на основе тонких пленок диоксида олова при наличии газов. В области температур  $T > 250$  °С некоторые слои проявляют длительный характер стабилизации сопротивления и его нелинейное изменение.

Подобрана математическая модель переходных процессов при нагреве полупроводниковых чувствительных слоев, и по методу наименьших квадратов рассчитаны коэффициенты аппроксимирующих уравнений.

В соответствии с полупроводниковой моделью определены скорости адсорбции и десорбции молекул газа на поверхности чувствительного слоя, что позволяет получить дополнительные признаки для распознавания газов. Экспериментально обнаружен нелинейный характер изменения проводимости газочувствительных слоев на основе тонких пленок диоксида олова во времени.

Проведенные эксперименты позволяют определить диапазон оптимальных режимов работы сенсора для получения высокой чувствительности к определенному газу или для смеси газов и для конкретного режима их эксплуатации.

Отмечено, что нелинейные характеристики газочувствительных структур позволяют не только обнаруживать, но и распознавать сорт газа на основе анализа сигнала сенсора.

Подобный прибор может быть адаптирован к конкретной задаче и использован во многих областях народного хозяйства, в том числе для ранней диагностики заболеваний.

Таким образом, разработаны новые подходы к формированию признаков для распознавания образов запахов и сложных газовых смесей, основанные на пред-



варительной математической обработке сигналов мультисенсорных систем. Независящие от концентрации газа параметры позволяют проводить распознавание газовых смесей и запахов с помощью обработки сигналов даже при минимальном количестве чувствительных слоев. Применение предварительной обработки сигналов в соответствии с разработанными моделями повышают надежность распознавания.

Работа выполнена при поддержке фирмы «Jenasensoric». Авторы выражают благодарность Dr. Reish, W. Ring, D. Shulz, D. Fritze за оказанную помощь.

1. *Ширшов Ю.М., Кошец И.А., Христосенко Р.В.* Технология химического распознавания с помощью сенсорных массивов: фундаментальные проблемы и техническая реализация // *Sensor electronics and microsystem technologies*. – 2005. – № 1. – С. 27 – 33.
2. *Лукаш С.И., Колесницкий О.К., Войтович И.Д.* Техника и технология анализа объектов для экологической и медицинской диагностики по запаху // *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2006. – № 5. – С. 141 – 148.
3. *Лукаш С.И., Алерс Х., Райш Р.* Исследование изменения параметров сенсоров в устройстве газового анализатора в процессе измерений // *УСиМ*. – 2001. – № 3. – С. 20 – 27.
4. *Антоненко В.И., Васильев А.А., Олихов И.М.* Раннее обнаружение пожара // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. – 2001. – № 4. – С. 48 – 52.
5. *Проспект* фирмы UST UMWELTSENSORTECHNIK GmbH, DBR, – 1999. – 14 с.
6. *Лукаш С.И., Перетяцько В.Ю.* Комп'ютерна програма попередньої обробки даних: Свід. ПА № 4461 від 03.07.2001.
7. *Волошин И.Ф., Касперович А.С., Шашков А.Г.* Полупроводниковые термосопротивления. – Минск: Изд-во АН БССР, 1959. – 196 с.
8. *Справочник конструктора РЭА* / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. Радио, 1980. – 478 с.
9. *Волькенштейн Ф.Ф.* Электронные процессы на поверхности полупроводников при хемосорбции. – М.: Наука, 1987. – 432 с.
10. *Таланчук П.М., Мороз О.С.* Теорія напівпровідникових сенсорів. – К.: НДІ Сатурн, 1997. – 56 с.
11. *Лукаш С.И., Перетяцько В.Ю.* Компьютерная система определения ацетона в воздухе дыхания // *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2004. – № 3. – С. 50–56.

Получено 23.05.2007