



## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АНАЛОГОВОГО ТРАКТА ПРИБОРА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, Б. О. ОЛИЯРНИК, Р. М. ПЛАХТИЙ, Р. И. СУЛЫМ

*Рассматривается концепция построения аналогового тракта восьмиканального портативного акустико-эмиссионного прибора на современной элементной базе и схемотехнических решениях. Описаны принципиальные электрические схемы и основные узлы аналоговой части прибора: предварительного усилителя, фильтров низкой и высокой частот, усилителя с программируемым коэффициентом усиления, масштабного усилителя, коммутатора аналого-цифрового преобразователя и т. п. Предусмотрено совмещение его портативных узлов и блоков с ПК типа Note Book.*

*A concept of construction of an analog circuit of an eight-channel portable acoustic-emission instrument using modern components and circuit designs is considered. Elementary diagrams and the main components of the instrument analog part are described, namely pre-amplifier, low and high-frequency filters, amplifier with a programmed gain; scale amplifier, A/D converter switching unit, etc. Interfacing of its portable modules and blocks with a notebook type PC is envisaged.*

**Актуальность проблемы.** Аппаратурная база средств для АЭ исследований отмечается большим количеством модификаций приборов [1–3]. Большую часть их составляют дорогие и крупногабаритные АЭ комплексы и аппаратура для лабораторных исследований. Особенностью аппаратуры является универсальность ее применения, возможность проведения диагностики сложных конструкций, изделий и объектов, технологических процессов производства и т. п. Она также обеспечивает отбор АЭ информации как по одному АЭ тракту отбора и обработки, так и по нескольким каналам одновременно. Однако, в своем большинстве аппаратурные средства уже физически и морально устарели. Поэтому актуальность проблемы аппаратурного обеспечения для проведения неразрушающего контроля (НК) материалов и изделий, а также их технического диагностирования состоит в обеспечении потребностей сферы современного производства портативной аппаратурой, которую можно было бы использовать как в качестве контрольного или индикаторного средства в технологическом процессе производителей, так и для контроля крупногабаритных объектов длительной эксплуатации.

**Состояние проблемы.** Все известные в литературе разработки АЭ средств можно классифицировать по таким группам [2]: для комплексных исследований, специализированного назначения, для контроля состояния крупногабаритных объектов и портативные одно- и многоканальные.

Средства для комплексных исследований, предназначенные для приема сигналов АЭ во время развития дефектов, которые возникают в материалах, изделиях и конструкциях, как правило, оснащены устройствами, которые способны выделять сигналы на фоне шумов и помех. Они позволяют оценивать разнообразные параметры АЭ излучения и определять состояние контролируемого объекта. Представителями такого класса при-

боров являются АФ-11, АФ-15, АП-51 ЭМ, «Малахит-АЭ-1А», АВН-3 комплексная система АП-ЗЗЭ-УКД-44Э и т. п.

Из АЭ аппаратуры этой группы следует также отметить систему SIMS серии 3000 фирмы «Dugan/Endevco» (США), модель 920 той же серии, которые разрешают проводить многопараметрические исследования сигналов АЭ во время разнообразных испытаний образцов и конструкций. Для решения разных исследовательских задач могут быть использованы системы серии 9500 фирмы CGR (Франция), серии 7500 фирмы «Tгодуне» (США), а также прибор модели 4300 фирмы PАС (США).

Средства специализированного назначения разрабатывались большей частью для решения конкретных задач НК для отбраковывания изделий во время их механических испытаний; для регистрации по сигналам АЭ момента возникновения в конструкционных машиностроительных материалах напряжений, которые отвечают физическому пределу текучести; для оценки пластически деформированного объема материала; для исследования явления коррозии под напряжением; для регистрации и анализа сигналов АЭ во время трения твердых тел и т.п. Из этого класса приборов можно выделить РПТ-2А, АЭРКТ-8, РИФ, «Сигнал-5», ДСС-5АЭ, АКТ-1, АЭ-система ДСП-5, «Эхо» и прочие.

Существуют специальные разработки приборов для контроля качества сварных соединений: АР-КС-3, КМС-М207, приборы серии 2200 фирмы PАС (США), ИРТ-2, 4ИРДС-2 и другие.

Система «Малахит АЭ-2Б» применяется для отбраковочного контроля изделий с линейной локацией дефектов, а «Малахит-АЭ-4А» — для непрерывного контроля отдельных участков изделий. Известны также приборы типа FRP-1 фирмы PАС, предназначенные для регистрации сигналов АЭ во время испытаний изделий из стеклопластика



и типа 6120, способные контролировать состояние и прогнозировать срок службы подшипников скольжения. В строительной индустрии используется прибор ИИАЭ-3А для регистрации АЭ во время определения физико-механических свойств пористых композитных материалов (бетонов, растворов, керамических изделий, порошковых материалов и т. п.).

Известный ряд АЭ приборов, предназначенных для контроля состояния горных массивов, стабильности выработок, прогнозирования горных ударов. К ним относятся, в частности, «Прогноз-1» и «Прогноз-М», которые разрешают осуществлять контроль напряженно-деформированного состояния участков горных пород, оценивать степень их нестабильности.

Средства АЭ контроля крупногабаритных объектов разрешают определять местонахождение дефектов, которые развиваются. Знание координат источников АЭ дает возможность оценивать распределение дефектов в границах зоны контроля и с учетом энергетических параметров излучения оценить степень опасности повреждений. Такие АЭ системы служат для выявления опасности появления и накопления дефектов, определения местоположения источников АЭ и в качестве систем превентивного контроля аварийных ситуаций ответственных сооружений. К приборам и системам этой группы относятся АЭ комплексы АФ-32, АФ-33 и АФ-34, АМУР-6, «Малахит-АЭ-5Б», САКС, МАРС, а также «Locamat» и «Locarag-4» фирмы CGR, система 1032 фирмы «Dunegan/Endevco» и серии 3000 фирмы PAC.

Системы для АЭ контроля крупногабаритных объектов являются, как правило, многоканальными. Число каналов определяет количество первичных преобразователей АЭ (ПАЭ), которые можно объединять в антенны или розетки, наиболее часто по четыре в каждой. При сетевом расположении ПАЭ на объекте контроля число каналов определяется схемой их коммутации. В группе многоканальных систем можно выделить приборы для проверки акустически не связанных объектов. Среди них есть устройства с автоматической коммутацией каналов. Они поочередно подключаются к общей системе обработки сигналов. Тогда уменьшается объем аппаратурного комплекса, но вместе с тем теряется часть информации.

Чтобы повысить достоверность АЭ контроля, разработаны системы с коммутаторами, которые работают в режиме ожидания. Они разрешают подключать канал к системе обработки лишь в случае появления на входном тракте сигнала АЭ или если параметр, который регистрируется, достигает определенного значения. Так, в приборе «Малахит-АЭ-4А» подключение одного из восьми каналов к системе сбора информации происходит по определенному уровню активности в измерительном тракте. Потери информации при этом снижаются, однако при большой активности АЭ возникает проблема выбора приоритета каждого канала. Подобных недостатков лишены системы с автономными параллельными измерительными трактами.

Во время проверки состояния больших объектов сложной конфигурации определение координат или зон расположения источников эмиссии выполняется разнообразными средствами. Наиболее распространенными из них является метод вычисления координат путем проведения триангуляционных расчетов и зонный метод определения места нахождения источников АЭ. Оба базируются на регистрации разности времен прихода сигналов АЭ, которые приняты группой ПАЭ. Подобные принципы реализованы в приборах и системах: АФ-32 — АФ-34, «Малахит-АЭ-5Б», «Малахит-АЭ-6Б», МАРС, САКС, система 1032 серии 3000 фирмы PAC, аппаратура модификаций «ЕМА», MISTRAS 2001, а также четырехканальных средствах АЭ контроля, которые имеют многофункциональное назначение [1, 2].

В Физико-механическом институте им. Г. В. Карпенко НАН Украины разработан ряд АЭ средств. Среди них одноканальный прибор для регистрации сигналов АЭ, который нашел свое применение в производственных условиях машиностроительного комплекса [4]. Он может служить также базовым прибором для обретения необходимых знаний и практических навыков студентами высших учебных учреждений, инженерно-техническим персоналом или научными сотрудниками во время разработки и освоения методик отбора и регистрации САЭ в процессе технической диагностики изделий. Портативный накопитель выборок сигналов АЭ SVR-6 [5] предназначен для регистрации сигналов АЭ по четырем каналам в лабораторных, производственных и полевых условиях исследования объектов контроля и передачи записанной (накопленной) информации в ПК по интерфейсу RS-232 для дальнейшей ее обработки или сохранения. Прибор обеспечивает отбор сигналов АЭ на фоне помех с помощью частотной и амплитудной селекции, выделение абсолютного значения максимальной амплитуды за время дискретизации, аналого-цифровое преобразование, временную привязку и сохранение выборок в энергонезависимом запоминающем устройстве. Для оперативного контроля имеется индикация усредненной частоты прохождения выборок, суммарного количества их накопления, времени испытания и объема свободной памяти.

Модернизированный портативный накопитель выборок сигналов АЭ СК-7 [6] обеспечивает выделение, отбор, первичную обработку и сохранение в Flash-памяти сигналов АЭ, их визуализацию, необходимую вторичную обработку переданных интерфейсом в персональный компьютер. Средства самоконтроля прибора обеспечивают тестирование памяти, звуковую индикацию ее переполнения, контроль качества фиксации ПАЭ, цифровую индикацию напряжения аккумуляторной батареи, визуальную индикацию его разрядки и автоматическое отключение при глубоком разряде. Программное обеспечение прибора СК-7 выполнено в диалоговом режиме в соответствии со стандартной технологией и работает в среде операционной системы Windows 95/98 и выше.

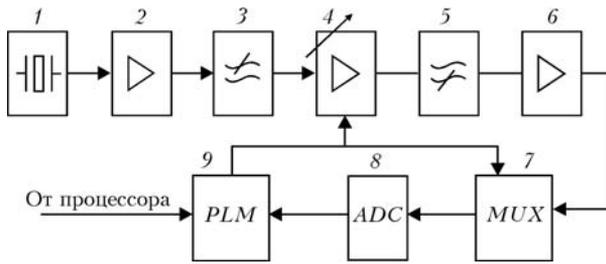


Рис. 1. Блок-схема аналоговой части прибора: 1 – ПАЭ; 2 – предварительный усилитель; 3 – фильтр низкой частоты (ФНЧ); 4 – усилитель с программируемым коэффициентом усиления; 5 – фильтр высокой частоты (ФВЧ); 6 – масштабный усилитель; 7 – коммутатор; 8 – аналогово-цифровой преобразователь (АЦП); 9 – программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС)

Достижения в области аппаратного обеспечения проведения АЭ исследований представляют возможность обратить особое внимание на интеллектуальные системы обработки сигналов АЭ [7], которые построены на применении нейроподобных процедур для их анализа. Такие процедуры используют набор определенных сигналов АЭ, которые обучают развитие памяти, которая дальше может использоваться для получения информации о неизвестном источнике. Большинство используемых сейчас нейронных сетей представляют собой сети с прямой связью, для которых входные данные необходимо предварительно обрабатывать. Автоассоциативные сети эффективны во время решения прямых и обратных, линейных и нелинейных задач. В работе [7] продемонстрирован способ обработки сигнала, алгоритм программирования, имеющий высокое быстродействие, нечувствительный к шумам. Необходимо подчеркнуть, что не во всех случаях применения АЭ нужны полные возможности нейроподобных систем. Показаны ситуации, когда детальный характер САЭ не имеет значения или же оценивается всего один параметр.

**Цель работы** – разработать аналоговую часть АЭ тракта восьмиканального портативного прибора АЭ.

**Результаты разработки.** В основу разработки восьми канального прибора АЭ положены полученные экспериментальные результаты и практи-

ческие наработки, а также известные литературные данные. Концепция построения прибора показана на рис. 1. В момент прихода сигналов, превышающих установленный пороговый уровень шумов по любому из восьми каналов, начинается запись их в цифровом формате всеми каналами с временной привязкой в каждом. Семь каналов прибора оцифровывают только огибающую сигнала, а один – его волновое отображение. Полученная информация отображается на дисплее ПК в реальном масштабе времени.

Для усиления электрических сигналов ПАЭ разработан предварительный усилитель (ПУ), который устанавливается непосредственно возле ПАЭ. Он предназначен для формирования основной полосы пропускания и компенсации потерь сигнала в соединительных кабелях (рис. 2). В разработанном ПУ применяются операционные усилители (ОУ) фирмы «Analog Devices». Указанные ОУ отмечаются малой потребляемой мощностью при сохранении основных электрических параметров необходимых для работы с сигналами малого уровня. Такие усилители широко используются для изготовления активных фильтров и предварительных усилителей в прецизионном оборудовании с автономным питанием, в медицинской аппаратуре.

**Основные электрические параметры ПУ**

Диапазон напряжений питания, В	3...36
Выходной ток, мА	15
Максимальная рабочая частота, МГц	16
Температурный дрейф, В/С°	2
Максимальный входной ток, пА	25
Входное сопротивление, Ом	10 <sup>13</sup>
Входная емкость, пФ	8
Уровень шумов, приведенный ко входу, нВ/√Гц	10

Для избежания перегрузок входных каскадов ПУ сигналами больших амплитуд на входе установлен симметричный диодный ограничитель с напряжением ограничения ±400 мВ. Первый каскад ПУ выполнен по схеме повторителя. Как известно, повторитель обладает большим входным и малым выходным сопротивлением и коэффициентом усиления, равным 1. Он служит для согласования большого сопротивления ПАЭ со входом усилителя. Второй каскад ПУ выполнен по схеме инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления 40 дБ. Конденсаторы, установленные в цепях отрицательных обратных связей ОУ, служат для частотной коррекции характеристик ОУ. Питание ПУ осуществляется по кабелю через выходной разъем. Для частотной развязки полезного сигнала и постоянного напряжения питания служат источник тока в основном блоке и блокировочный конденсатор в ПУ. ОУ питается через транзисторный параметрический стабилизатор с напряжением стабилизации 5 В.

Формируются рабочие полосы частот фильтрами ФНЧ и ФВЧ. Они выполнены в виде активных фильтров Баттерворта 2-го порядка с переключаемой частотой среза. По сравнению

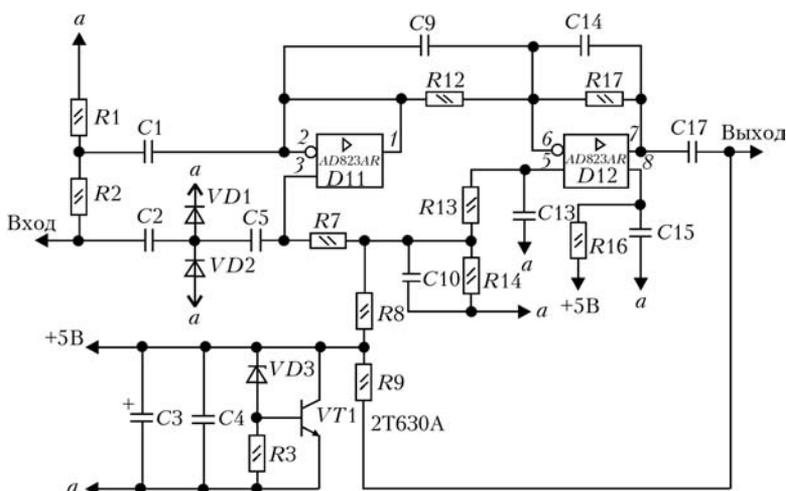


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема ПУ (а – аналоговая земля)

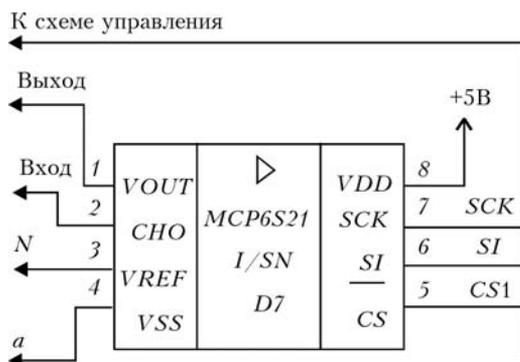


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема усилителя с программируемым коэффициентом усиления (a — аналоговая земля; N — напряжение смещения)

с фильтрами Чебышева, Бесселя, Кауера и Кея, фильтр Баттерворта имеет наиболее плоскую характеристику в полосе пропускания, хотя и меньшую крутизну спада к полосе затухания. Но для дальнейшего преобразования полезного сигнала в цифровую форму и получения заданной точности преобразования, неравномерность характеристики в полосе пропускания выходит на первый план, поскольку исследуемый сигнал лежит в полосе пропускания, а не на спаде характеристики. Вот почему наиболее полезным в данном случае является применение фильтра Баттерворта.

Для выполнения фильтра ФНЧ использовали ОУ той же фирмы. Фильтр реализован в виде неинвертирующего усилителя напряжения с коэффициентом усиления 1,59. Частотную характеристику фильтра формируют резисторы и конденсаторы, включенные в цепь положительной обратной связи. Для коммутации частот среза используется быстродействующий коммутатор фирмы «Analog Devices», который к постоянно подключенной цепочке резисторов подключает одну или две дополнительных цепочки. Управление коммутатором осуществляется командами процессора по цифровой шине.

Фильтр ФВЧ выполнен аналогичным образом. Для коммутации частот среза коммутатор к постоянно подключенной цепочке конденсаторов подключает одну или две дополнительных цепочки. Управление коммутатором аналогично.

Для основного усиления полезного сигнала в полосе рабочих частот использовали усилители с программируемым коэффициентом усиления фирмы «Microchip» (рис. 3). Они не требуют внешней обвязки и обратных связей. Управление коэффициентом усиления происходит программно, командами процессора по последовательному интерфейсу SPI. Коэффициент усиления может принимать восемь фиксированных значений от 1 до 32. По последовательному интерфейсу может быть установлен режим энергосбережения на время, когда усилитель не используется.

**Основные электрические параметры усилителя**

Программируемые коэффициенты усиления	.....+1, +2, +4,
	.....+5, +8, +10,
	.....+16, +32
Погрешность установленного коэффициента, %	...±1
Дрейф напряжения на выходе, мкВ	.....±275
Максимальная рабочая частота, МГц	.....12

Уровень шумов, приведенный ко входу, нВ/√Гц	..... 10
Ток потребления, мА	..... 1
Напряжение питания, В	..... 2,5...5,5

Для защиты от перегрузки элементов схемы и переполнения АЦП в случае не прогнозируемого превышения уровня сигнала в действие вступает масштабный усилитель. Он выполнен по схеме инвертирующего усилителя с коэффициентом усиления 3. В цепь отрицательной обратной связи ОУ включен симметричный диодный ограничитель. Во время достижения входным сигналом уровня около 0,8 В, диоды начинают открываться, соответственно, коэффициент усиления уменьшается. При входном напряжении больше 1,2 В масштабный усилитель работает как повторитель. Далее сигнал АЭ подается на коммутатор.

В приборе используются быстродействующие коммутаторы фирмы «Analog Devices». Они изготовлены по перспективной субмикронной технологии, что разрешило существенно уменьшить размеры интегрированных элементов и связей между ними. В результате удалось уменьшить переходное сопротивление коммутатора и потребляемую мощность, а также увеличить его быстродействие. Коммутаторы совместимы как с ТТЛ, так и с КМОП логикой.

АЦП служит для преобразования входных аналоговых сигналов каждого канала в цифровой вид для дальнейшего сохранения в памяти. В приборе использован быстродействующий АЦП фирмы «Analog Devices». Это параллельный 12-тиразрядный АЦП конвейерного типа. Он состоит из четырех внутренних АЦП, каждый из которых формирует свою часть разрядов. Первый внутренний АЦП формирует четырех старших разряда, которые в свою очередь снова превращаются в аналоговую форму на ЦАП с внутренним усилителем и вычитаются из общего полного сигнала. Полученный остаток подается на следующий внутренний АЦП, который формирует очередные младшие разряды, которые, в свою очередь, снова превращаются в аналоговую форму на втором ЦАП с внутренним усилителем. Полученный сигнал снова вычитается из предшествующего остатка и превращается в следующие младшие разряды на третьем АЦП. Благодаря таким сложным преобразованиям с промежуточными усилениями остатка получаем большую точность аналого-цифрового преобразования, в особенности относительно сигналов низкого уровня. Подготовленные таким образом дискреты выходных разрядов подаются на логику цифровой коррекции, которая устраняет возможные неточности и через выходные буфера выдаются на выход АЦП. При переполнении АЦП на специальном выходе появляется сигнал переполнения.

Для повышения помехоустойчивости входной каскад АЦП выполнен в виде дифференциального усилителя с запоминанием сигнала. Сигнал на время дискретизации запоминается на конденсаторах, а вход АЦП отключается от общей схемы. Таким образом, АЦП по очереди превращает в цифровую форму сигналы каждого канала. Период дискре-



тизации задается командами процессора через ПЛИС. Цифровой код, который отвечает аналоговому сигналу, с выхода АЦП через шинные формирователи поступает для записи на оперативное запоминающее устройство (ОЗУ). В приборе использовано ОЗУ фирмы «Samsung».

Для формирования сигналов управления коммутатором и усилителями с программируемым коэффициентом усиления, обеспечения записи данных в ОЗП, накопления и доступа к ним со стороны микропроцессора служит программированная логическая интегральная схема (ПЛИС). Здесь используется ПЛИС фирмы «Xilinx».

### Выводы

Разработана концепция построения аналогового тракта восьмиканального портативного АЭ-прибора совместимого с ПК типа Note Book с использованием современной элементной базы и схемотехнических решений. Созданы принципиальные электрические схемы и отработаны на макетах режимы работы основных узлов аналоговой части прибора:

предварительного усилителя, фильтров низкой и высокой частот, усилителя с программируемым коэффициентом усиления, масштабного усилителя, коммутатора АЦП и т. п.

1. Ерминсон А. Л., Муравин Г. Б., Шин В. В. Акустико-эмиссионные приборы и системы // Дефектоскопия. — 1986. — № 5. — С. 3–11.
2. Скальський В. Р., Демчина Б. Г., Карпунін І. І. Руйнування бетонів і акустична емісія (Огляд). Повідомлення 2. Корозія залізобетону. Апаратурні засоби. АЕ-контроль та діагностика будівельних споруд // Технич. діагностика і невідомлення. — 2000. — №2. — С. 9–27.
3. Ямагучі К. Системи акустико-емісійного контролю // Хіхакай кенса. — 1988. — 38, № 6. — С. 498–502.
4. Скальський В. Р. Прибор для регистрации сигналов акустической эмиссии СВР-4 // Технич. диагностика и неразруш. контроль. — 1995. — № 1. — С. 71–79.
5. Скальський В. Р., Пустовой В. М., Бархан А. Портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії SVR-6 // Там же. — 1999. — № 3. — С. 35–46.
6. Скальський В. Р., Карпунін І. І. Модернізований портативний накопичувач вибірок сигналів акустичної емісії СК-7 // Зб. наук. праць ФМІ НАН України «Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів», Київ-Львів, 2002. — Вип. 7. — С. 77–82.
7. Wolfgang S., Grabec I. Intelligent processing of acoustic emission signals // Mater. Eval. — 1992. — 50, № 7. — P. 826–832.

Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины,  
Львов

Поступила в редакцию  
18.02.2005



Национальная Академия наук Украины  
Институт физической химии им. Л. В. Писаржевского  
Государственное предприятие «КОЛОРАН»

## НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР И ВЫСТАВКА «Новые материалы и комплексные технологии по контролю, защите и ремонту ответственных металлоконструкций»

18–25 июня 2006 г.

г. Феодосия

### Уважаемые коллеги!

Научно-практический семинар и выставка «Новые материалы и комплексные технологии по контролю, защите и ремонту ответственных металлоконструкций» состоится 18–25 июня 2006 г. в г. Феодосия, в конференц-зале национальной Академии государственного Управления при Президенте Украины.

### Тематика семинара:

- разработка новых видов дефектоскопических материалов и их практическое применение;
- консервация поверхности материалов в межремонтный период и защита от коррозии;
- герметизация и ремонт металлоконструкций.

**Круглый стол:** «Новые направления в области контроля, защиты и ремонта металлоконструкций».

### Организационный комитет семинара и выставки:

Украина 03025, Киев-28, пр-т Науки, 31  
Тел.: +38044-525-65-67; моб. +38050-386-43-11  
e-mail: koloran@i.com.ua, m\_kazakevich@ukr.net